



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA ELEKTROTECHNIKY

A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION

ÚSTAV ELEKTROENERGETIKY

DEPARTMENT OF ELECTRICAL POWER ENGINEERING

MODELY AKTIVNÍCH TRAKČNÍCH NAPAJEČŮ ŽELEZNIC PRO ANALÝZU ZPĚTNÝCH VLIVŮ NA DISTRIBUČNÍ SÍŤ

DYNAMIC MODELLING OF ACTIVE RAILWAY TRACTION FEEDERS FOR POWER QUALITY ASSESSMENT

DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. Jan Bureš

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Jan Klusáček

BRNO 2024



Diplomová práce

magisterský navazující studijní program **Elektroenergetika**

Ústav elektroenergetiky

Student: Bc. Jan Bureš

ID: 220755

Ročník: 2

Akademický rok: 2023/24

NÁZEV TÉMATU:

Modely aktivních trakčních napaječů železnic pro analýzu zpětných vlivů na distribuční síť

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

1. Rešerše aktivních trakčních napaječů
2. Vytvoření dynamických modelů napaječů vhodných pro analýzu zpětných vlivů na distribuční síť
3. Vytvoření a definice realistického odběru trakční soustavy
4. Vytvoření a definice realistické testovací distribuční sítě
5. Srovnání jednotlivých napaječů z hlediska zpětných vlivů pomocí simulace realistického provozu

DOPORUČENÁ LITERATURA:

doporučená literatura podle pokynů vedoucího závěrečné práce

Termín zadání: 5.2.2024

Termín odevzdání: 20.5.2024

Vedoucí práce: Ing. Jan Klusáček

prof. Ing. Petr Toman, Ph.D.
předseda rady studijního programu

UPOZORNĚNÍ:

Autor diplomové práce nesmí při vytváření diplomové práce porušit autorská práva třetích osob, zejména nesmí zasahovat nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a musí si být plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č.40/2009 Sb.

Abstrakt

Diplomová práce se zabývá modelováním trakčních napaječů pro napájení trakční soustavy 25 kV 50 Hz s hodnocením zpětných vlivů na distribuční síť 110 kV v místě připojení. S ohledem na různorodou technologii trakčních napaječů jsou popsány jednotlivé technologie napaječů od konvenčního systému napájení po moderní měničové stanice a to s ohledem na princip funkce, strukturu silového obvodu a popis zpětných vlivů na distribuční síť. Vybrané technologie trakčních napaječů jsou dále modelovány v simulačním prostředí PSCAD a posléze je uveden příklad analýzy vlivu na kvalitu napětí v místě připojení na základě realistického provozu trakčních vozidel na napájeném úseku. Modely jsou parametrizovatelné a mohou být použity pro posouzení připojitelnosti dle PNE 33 3430-0. Mimo zpětných vlivů na napětí práce rozpracovává využití měničových napaječů pro podpůrné frekvenční služby, kde na příkladě ukazuje princip fungování, základní algoritmus a požadavky na řídicí vrstvu měničů. V rámci diplomové práce je nakonec navržen a pomocí modelu ukázán algoritmus procesu synchronizace napětí sousedních úseků trakčního vedení trakční soustavy 25 kV 50 Hz. Diplomová práce ukazuje použití dynamických modelů pro posouzení připojitelnosti do distribuční sítě v předprojektové fázi a pro vývoj a definování používání měničových napaječů nad rámec napájení železnice.

Klíčová slova

Trakční napaječ, SFC, trakční soustava, transformátor, aktivní měnič, kvalita napětí, podpora síťové frekvence, synchronizace, PSCAD.

Abstract

The thesis is focused on modelling of traction feeders for 25 kV 50 Hz traction system in order to assess the influence on voltage quality at point of the connection in 110 kV distribution grid. With respect to various technology of traction feeders, the feeder models, including conventional feeding system and modern converter stations, emphasize operating principle, detailed power circuit structure and description of influence on voltage quality in the distribution grid. The selected technologies of traction feeders are modeled in simulation software PSCAD and influence on voltage quality at the point of connection is assessed via an example, which reflects a realistic operation of traction vehicles in the typical traction system. The models are parametrizable and thus can be used for the connectivity assessment for the distribution system according to national

distribution system operators' standard PNE 33 3430-0. Moreover, the thesis also deals with the use of modern converter feeders for auxiliary frequency services. The operation principle is demonstrated on examples where the basic algorithm and requirements for control layer of converters is described. Finally, an algorithm for synchronization of the feeders supplying adjacent 25 kV 50 Hz railway traction system sections is designed and presented by means of simulation. In general, the thesis shows the use of dynamic models for connectivity assessment to the distribution grid in pre-project phase and for definition and development of converter feeders use cases upon feeding of the railway traction system.

Keywords

Traction feeder, SFC, traction system, transformer, active converter, voltage quality, grid frequency support, synchronization, PSCAD.

Bibliografická citace

BUREŠ, Jan. *Modely aktivních trakčních napaječů železnic pro analýzu zpětných vlivů na distribuční síť*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Ústav elektroenergetiky, 2024. 105 s., 15 s. příloh. Diplomová práce. Vedoucí práce: Ing. Jan Klusáček.

Prohlášení autora o původnosti díla

Jméno a příjmení studenta:	<i>Jan Bureš</i>
VUT ID studenta:	<i>220755</i>
Typ práce:	<i>Diplomová práce</i>
Akademický rok:	<i>2023/24</i>
Téma závěrečné práce:	<i>Modely aktivních trakčních napaječů železnic pro analýzu zpětných vlivů na distribuční síť</i>

Prohlašuji, že svou závěrečnou práci jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucí/ho závěrečné práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce.

Jako autor uvedené závěrečné práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této závěrečné práce jsem neporušil autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhl nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a jsem si plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č. 40/2009 Sb.

V Brně dne: 20. května 2024

podpis autora

Poděkování

Děkuji vedoucímu diplomové práce Ing. Janovi Klusáčkovi za pedagogickou a odbornou pomoc a další cenné rady při zpracování mé diplomové práce.

V Brně dne: 20. května 2024

podpis autora

Obsah

SEZNAM OBRÁZKŮ	9
SEZNAM TABULEK.....	11
ÚVOD	12
1. DEFINICE PARAMETRŮ KVALITY EL. ENERGIE	13
1.1 NESYMETRIE NAPĚTÍ	13
1.2 HARMONICKÉ A MEZIHARMONICKÉ ZKRESLENÍ NAPĚTÍ.....	14
1.3 ZMĚNY NAPĚTÍ	15
1.4 FLIKR	16
2. TECHNOLOGIE TRAKČNÍCH NAPAJEČŮ 25 KV 50 HZ.....	18
2.1 JEDNOFÁZOVÝ TRANSFORMÁTOR 110/27 KV	18
2.2 AKTIVNÍ BALANCÉR	19
2.3 ČTYŘKVADRANTOVÝ MĚNIČ SE STEJNOSMĚRNÝM MEZIOBVODEM	23
2.3.1 Řízení třífázového aktivního usměrňovače.....	24
2.3.2 Řízení jednofázového aktivního střídače.....	25
2.3.3 Znaménková konvence	26
2.3.4 PQ diagram.....	29
2.4 ČTYŘKVADRANTOVÝ MĚNIČ S PROKLÁDANÝM SPÍNÁNÍM	32
2.5 PŘÍMÝ MĚNIČ.....	36
3. POROVNÁNÍ TECHNOLOGIÍ TRAKČNÍCH NAPAJEČŮ	39
4. MODELOVÁNÍ TRAKČNÍCH NAPAJEČŮ	43
4.1 MODEL JEDNOFÁZOVÉHO TRANSFORMÁTORU 110/27 KV	43
4.2 MODEL ČTYŘKVADRANTOVÉHO MĚNIČE SE STEJNOSMĚRNÝM MEZIOBVODEM (SFC)	45
4.3 MODEL REALISTICKÉ TESTOVACÍ DS 110 KV.....	48
4.4 MODEL REALISTICKÉ TESTOVACÍ TS 25 KV 50 HZ	49
5. ANALÝZA ZPĚTNÉHO VLIVU NA NAPĚTÍ V DS 110 KV.....	50
6. FREKVENČNÍ PODPORA NAPÁJECÍ SÍTĚ POMOCÍ SFC	54
6.1 ODBĚROVÝ REŽIM VLAKU	58
6.2 REŽIM REKUPERACE	66
7. SYNCHRONIZACE VÍCE SFC JEDNOTEK V TS 25 KV 50 HZ.....	71
8. ZÁVĚR.....	77
SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK	79
SEZNAM PŘÍLOH.....	87
LITERATURA.....	103

SEZNAM OBRÁZKŮ

1	Zapojení do „T“, překresleno z [11].	18
2	Zapojení do „V“, překresleno z [11].	19
3	Zapojení aktivního balancéru do konvenčního systému napájení, překresleno z [12].	20
4	Schéma zapojení SVC, překresleno z [13].	20
5	Princip Steinmetzova obvodu, překresleno z [14].	21
6	Schéma zapojení STATCOM, překresleno z [16].	23
7	Blokové schéma čtyřkvadrantového měniče se stejnosměrným meziobvodem, překresleno z [18].	24
8	Třífázový aktivní usměrňovač a SVM, překresleno z [20].	25
9	Jednofázový aktivní střídač včetně SPWM, překresleno z [21].	26
10	Znaménková konvence – kvadranty, překresleno z [22].	27
11	Znaménková konvence – diagram ω - M , překresleno z [23].	28
12	Znaménková konvence – toky výkonů, překresleno z [22].	29
13	Příklad PQ diagramu třífázového aktivního usměrňovače, překresleno z [24].	30
14	Příklad PQ diagramu jednofázového aktivního střídače, překresleno z [24].	31
15	Blokové schéma vícehladinového čtyřkvadrantového měniče, překresleno z [26].	33
16	Třífázový tříhladinový aktivní usměrňovač, překresleno z [17].	34
17	Průběhy modulovaného napětí vícehladinových měničů, překresleno z [27].	34
18	Jednofázový tříhladinový aktivní střídač včetně zjedn. schématu řízení, překresleno z [20].	35
19	Napájení TS 15 kV 16,7 Hz, překresleno z [11].	37
20	Modulární vícehladinový přímý měnič, překresleno z [28].	37
21	Výhody/nevýhody konvenční TNS, překresleno z [31].	42
22	Výhody/nevýhody měničové TNS, překresleno z [31].	42
23	Model jednofázového transformátoru 110/27 kV v zapojení do „T“.	44
24	Model jednofázového transformátoru 110/27 kV v zapojení do „V“.	45
25	Fázový závěs a Parkova transformace pro proud sekundárního vinutí transformátoru.	46
26	Řídící struktura SFC měniče.	47
27	Model čtyřkvadrantového měniče se stejnosměrným meziobvodem.	48
28	Model realistické testovací DS 110 kV.	49
29	Charakteristika omezení proudu vlaku [32].	55
30	Implementace charakteristiky omezení proudu vlaku do modelu Loko 3.	56
31	Průběhy frekvence v DS dle tří způsobů měření.	58
32	Charakteristika $\Delta U_{\text{vlak,žád}}/\Delta f$ a $\Delta U_{\text{SFC,žád}}/\Delta f$.	60
33	Schéma pro simulaci odezvy napětí SFC měniče na změnu frekvence.	61
34	Schéma procesu odezvy napětí SFC měniče na změnu frekvence.	62
35	Schéma procesu odezvy napětí SFC měniče na změnu frekvence.	63
36	Průběhy napětí, proudů a výkonů v čase při změně hodnoty frekvence sítě.	64
37	Závislost $\Delta P_{\text{mech}}/\Delta f$ v jednotlivých krocích simulace.	66
38	Závislost maximální hodnoty napětí TS na době trvání [35].	67
39	Implementace povolení rekuperace s výstupem binárních hodnot do modelu Loko 3.	68
40	Průběhy napětí, povolení rekuperace a výkonů v čase při změně frekvence sítě.	69
41	Schéma pro synchronizaci napětí TS 25 kV 50 Hz.	71
42	Implementace procesu synchronizace napětí pro model měniče SFC 2.	73
43	Průběhy efektivních hodnot napětí a úhlů napětí spínací stanice.	74
44	Průběhy zatížení jednotlivých měničů SFC ze strany DS a TS při oboustranném napájení.	75
45	Schéma připojení modelu transformátoru 110/27 kV v zapojení do „T“ do DS.	88
46	Profil mechanického výkonu pro simulaci realistického provozu.	88

47	Schéma připojení modelu transformátoru 110/27 kV v zapojení do „V“ do DS.	89
48	Profil mechanického výkonu pro simulaci realistického provozu.	89
49	Schéma připojení modelu SFC měniče do DS.	90
50	Profil mechanického výkonu pro simulaci realistického provozu.	90
51	Profil ef. hod. napětí v DS 110 kV a profil zatížení v DS a TS – Transformátor do „T“.....	91
52	Průběh okamžité míry vjemu blikání – Transformátor do „T“.....	91
53	Profil ef. hod. napětí v DS 110 kV a profil zatížení v DS a TS – Transformátor do „V“.....	92
54	Průběh okamžité míry vjemu blikání – Transformátor do „V“.....	92
55	Profil ef. hod. napětí v DS 110 kV a profil zatížení v DS a TS – SFC.	93
56	Průběh okamžité míry vjemu blikání – SFC.....	93
57	Průběh okamžité hodnoty fázových napětí DS při max. zatížení – Transformátor do „T“.....	94
58	Harmonické spektrum úrovní napětí – Transformátor do „T“.....	94
59	Histogram rozložení THD_U – Transformátor do „T“.....	95
60	Průběh okamžité hodnoty fázových napětí DS při max. zatížení – Transformátor do „V“.....	96
61	Harmonické spektrum úrovní napětí – Transformátor do „V“.....	96
62	Histogram rozložení THD_U – Transformátor do „V“.....	97
63	Průběh okamžité hodnoty fázových napětí DS při max. zatížení – SFC.....	98
64	Harmonické spektrum úrovní napětí – SFC.....	98
65	Histogram rozložení THD_U – SFC.....	99
66	Průběh činitele nesymetrie napětí a profil zatížení v DS a TS – Transformátor do „T“.....	100
67	Histogram rozložení u_2 – Transformátor do „T“.....	100
68	Průběh činitele nesymetrie napětí a profil zatížení v DS a TS – Transformátor do „V“.....	101
69	Histogram rozložení u_2 – Transformátor do „V“.....	101
70	Průběh činitele nesymetrie napětí a profil zatížení v DS a TS – SFC.....	102
71	Histogram rozložení u_2 – SFC.....	102

SEZNAM TABULEK

1	Porovnání technologií trakčních napaječů, vychází z [4].	41
2	Parametry modelu testovací DS.	49

ÚVOD

Hlavním cílem diplomové práce je tvorba modelů, reprezentující reálné napaječe trakční soustavy 25 kV 50 Hz pro analýzu zpětných vlivů na distribuční síť 110 kV.

Motivací diplomové práce je nasazování moderních frekvenčních měničů pro napájení trakční soustavy 25 kV 50 Hz v České republice. Je obecně uvažováno, že frekvenční měniče mají v porovnání s konvenčním napájením transformátory pozitivní dopad na kvalitativní ukazatele elektrické energie v místě připojení do distribuční sítě. Tato práce ukazuje, jak tuto výhodu kvantifikovat na základě předpokládaného provozu v čase prostřednictvím realistických dat zatížení dle grafikonu vlakové dopravy. Vzhledem k relativně vyšším pořizovacím nákladům v porovnání s konvenčním systémem napájení jsou v práci ukázány další možnosti využití statických frekvenčních měničů nad rámec pouhého napájení trakční soustavy. Jednou z nich je ukázka použití statických měničů pro poskytování podpůrných služeb v případě umístění většího počtu měničů do různých míst distribuční sítě. V takovém případě je ale nutné navrhnout a ověřit očekávaný přínos, případně posoudit závažnost omezení provozu. Další možností využití statických měničů spočívá ve vytvoření jednotné synchronizované fáze trakční soustavy, což vede k eliminaci neutrálních polí v místě styku sousedních úseků trakčního vedení. Pro ukázkou této vlastnosti je v práci vytvořen algoritmus pro proces synchronizace napětí dvou úseků trakčního vedení se simulací zatížení statických měničů při trakčním odběr. Všechny uvedené vlastnosti a funkcionality jsou implementovány do obecných modelů trakčních napaječů, vytvořených v programu PSCAD.

Diplomová práce je rozdělena do sedmi kapitol. V první kapitole jsou popsány relevantní ukazatele kvality elektrické energie včetně způsobu vyhodnocení dle platných norem. Další kapitolou je rešerše jednotlivých technologií trakčních napaječů z hlediska principu funkce, struktury silového obvodu a zpětných vlivů na distribuční síť. Třetí kapitola popisuje porovnání konvenčního systému napájení s měničovými napájecími stanicemi a také porovnání jednotlivých technologií trakčních napaječů z hlediska vlivu na kvalitu napětí v distribuční síti a z hlediska způsobu provozu trakční soustavy 25 kV 50 Hz. Ve čtvrté kapitole je popsána samotná realizace modelů vybraných trakčních napaječů a také tvorba a parametrizace modelu realistické testovací distribuční sítě 110 kV a trakční sítě 25 kV 50 Hz. V páté kapitole je uveden realistický provoz trakční soustavy 25 kV 50 Hz a jsou zde uvedeny příklady analýzy vlivu na kvalitu napětí pro jednotlivé trakční napaječe s vyhodnocením kvalitativních ukazatelů, porovnáním hodnot s plánovacími úrovněmi dle PNE 33 3430-0 a porovnání jednotlivých modelů napaječů z hlediska zpětných vlivů na distribuční síť. V šesté kapitole je uvedeno použití modelu SFC měniče pro podpůrné frekvenční služby s ukázkou základního algoritmu a principu funkce. V poslední kapitole je uvedena ukázkou algoritmu principu funkce synchronizace napětí sousedních úseků trakčního vedení soustavy 25 kV 50 Hz.

1. DEFINICE PARAMETRŮ KVALITY EL. ENERGIE

Z oblasti kvality elektrické energie je v práci hodnocena především kvalita napětí v DS při provozu trakčních napaječů. Z toho důvodu jsou vybrány některé relevantní ukazatelé ze skupiny událostí a průběžných jevů, kterými jsou nesymetrie napětí, harmonické a mezharmónické zkreslení napětí, změny napětí a flickr. V následujících kapitolách jsou tyto ukazatelé popsány podrobněji.

1.1 Nesymetrie napětí

Pod pojmem nesymetrie napětí je definován stav v síti, kdy vlivem nerovnoměrného rozložení zatížení v jednotlivých fázích třífázové soustavy dochází ke změně amplitudy napětí a úhlů mezi napětími. Nesymetrii napětí lze rozdělit na: 1) amplitudovou, 2) úhlovou a 3) kombinovanou. Podle daného rozdělení se nesymetrie napětí projevuje pouze změnou amplitudy napětí (1. případ) nebo pouze změnou úhlů mezi napětími v soustavě (2. případ) nebo kombinací předchozích případů (3. případ). Výrazná nesymetrie napětí může být do soustavy zanesena např. vlivem nesymetrického odběru, kdy dochází k rozdílnému zatížení jednotlivých fází, což vede k úbytkům napětí rozdílné velikosti a úhlu [1].

Obecně jakoukoliv nesymetrickou soustavu lze rozložit do složkových soustav, které jsou symetrické. Tyto složkové soustavy se nazývají sousledná, zpětná a netočivá, které popisují sled jednotlivých fází a úhel mezi nimi při respektování jednoho směru točení fázorů napětí. Součtem těchto tří složek získáme výsledný fázor pro danou fázi soustavy. Pro napětí platí:

$$\begin{aligned}\bar{U}_A &= \bar{U}_{AI} + \bar{U}_{AII} + \bar{U}_{AO} \\ \bar{U}_B &= \bar{U}_{BI} + \bar{U}_{BII} + \bar{U}_{BO} \\ \bar{U}_C &= \bar{U}_{CI} + \bar{U}_{CII} + \bar{U}_{CO},\end{aligned}\tag{1}$$

kde \bar{U}_A , \bar{U}_B a \bar{U}_C jsou fázory napětí jednotlivých fází A, B, C nesymetrické soustavy, příznak I přísluší sousledné složce napětí, příznak II zpětné složce napětí a příznak 0 netočivé složce napětí. Pokud uvažujeme fázi A jako referenční, je mezi symetrickými složkami vzájemný vztah pomocí operátoru natočení \bar{a} , jehož hodnota je rovna $1 \cdot e^{j120^\circ}$. Lze tak zpětnou transformační maticí získat jednotlivé složky napětí

$$\begin{bmatrix} \bar{U}_I \\ \bar{U}_{II} \\ \bar{U}_0 \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \cdot \begin{bmatrix} 1 & \bar{a} & \bar{a}^2 \\ 1 & \bar{a}^2 & \bar{a} \\ 1 & 1 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \bar{U}_A \\ \bar{U}_B \\ \bar{U}_C \end{bmatrix},\tag{2}$$

kde \bar{U}_I je fázor sousledné složky napětí první harmonické, \bar{U}_{II} je fázor zpětné složky napětí první harmonické a \bar{U}_0 je fázor netočivé složky napětí první harmonické. Pro

fázory proudů platí stejné vztahy. Míru nesymetrie napětí v procentech lze vyjádřit pomocí tzv. součinitele nesymetrie napětí u_2 a nesymetrie proudu i_2 jako poměr velikosti zpětné složky napětí na první harmonické U_{II} , velikosti sousledné složky napětí na první harmonické U_I a velikosti zpětné složky proudu na první harmonické I_{II} , velikosti sousledné složky proudu na první harmonické I_I

$$u_2 = \frac{U_{II}}{U_I} \cdot 100 \quad (3)$$

$$i_2 = \frac{I_{II}}{I_I} \cdot 100 .$$

DS má pro tyto součinitele stanoveny limity, které jsou dány normou a nesmí být překročeny. Podle aktuální platné podnikové normy energetiky pro rozvod elektrické energie PNE 33 3430-0 [2] jsou pro jednotlivé napěťové hladiny stanoveny doporučené plánovací úrovně a pro činitel nesymetrie napětí je pro napěťovou hladinu velmi vysokého napětí (vvn) stanovena hodnota plánovací úrovně na 1,4 % [3].

TS svým působením produkuje výraznou zpětnou složku v DS, čímž negativně ovlivňuje veškeré točivé stroje, především asynchronní motory. V důsledku toho mohou být pro redukci nesymetrie napětí použity tzv. aktivní balancéry [1][4].

1.2 Harmonické a meziharmonické zkreslení napětí

Pod pojmem harmonický signál je definován periodický signál sinusového průběhu o systémové frekvenci. V reálných rozvodných sítích jsou z hlediska harmonického průběhu sledovanými veličinami napětí a proud, které však nemají ideální sinusový průběh. Tato skutečnost je způsobena rušením v síti a emisemi tzv. vyšších harmonických složek proudu, které jsou synchronizovány s frekvencí sítě a jsou superponovány na základní harmonickou složku proudu, čímž se jedná o tzv. harmonické zkreslení proudu. Zdrojem vyšších harmonických složek proudu jsou převážně spotřebiče s charakterem nelineární zátěže. V důsledku odporu této zátěže, který je závislý na několika veličinách a není tedy konstantní hodnotou, je závislost mezi napětím a proudem nelineární, což je projevem změny velikosti amplitudy proudu dle aktuální velikosti odporu. Vlivem vazební impedance sítě mezi zdrojem a zátěží vznikají v důsledku harmonického zkreslení proudu úbytky napětí na jednotlivých harmonických, které mají za následek vznik harmonického zkreslení napětí v uzlech sítě. Typickým příkladem nelineární zátěže jsou zařízení, založená na polovodičové technologii např. různé typy měničů, usměrňovačů a spínacích zdrojů [5].

Určení celkového obsahu vyšších harmonických složek napětí je možné prostřednictvím činitele harmonického zkreslení proudu THD_U

$$THD_U = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{50} U_h^2}}{U_1} \cdot 100 , \quad (4)$$

kde h je řád harmonické složky, U_h jsou efektivní hodnoty napětí jednotlivých harmonických složek a U_1 je efektivní hodnota napětí první harmonické složky. Dle normy PNE 33 3430-0 [2] je stanovena plánovací úroveň pro síť vvn na hodnotu 3 %. Tento parametr ale pouze vyjadřuje procentuální zastoupení vyšších harmonických složek napětí v základní harmonické složce a pro podrobnější posouzení je možné hodnotit procentuální velikost jednotlivých harmonických složek vzhledem k základní harmonické složce napětí, pro které jsou rovněž stanoveny plánovací úrovně. Pakliže hodnoty vyšších harmonických jsou mimo tyto limity, je využito filtračně-kompenzačního zařízení (FKZ) pro částečnou eliminaci těchto vyšších harmonických složek.

Vyšší harmonické jsou generovány, pokud je v síti uvažována konstantní frekvence, což v reálném systému nemusí být dodrženo. Může docházet k odchylkám od systémové frekvence sítě vlivem stochastických i deterministických dějů. V takovém případě jsou produkovány i tzv. meziharmonické složky proudu, které nejsou synchronizované se systémovou frekvencí sítě, jejichž frekvence není celistvým násobkem frekvence základní harmonické složky. Tento problém nastává právě u aktivních měničů, jejichž spínací frekvence nemusí být synchronizována se základní frekvencí. V důsledku meziharmonického zkreslení proudu vznikají na vazební impedanci sítě úbytky napětí na jednotlivých meziharmonických, což vede k meziharmonickému zkreslení napětí. Pro hodnocení meziharmonického zkreslení je dle normy PNE 33 3430-0 [2] užito procentuálního vyjádření napětí u_m na jednotlivých meziharmonických vztažených k základní harmonické napětí

$$u_m = \frac{U_m}{U_1} \cdot 100, \quad (5)$$

kde U_m je efektivní hodnota napětí na dané meziharmonické složce a m je řád meziharmonické. Dle [2] je pro napěťovou hladinu vvn stanovena plánovací úroveň pro procentuální hodnotu napětí na hodnotu 0,1 % pro řád meziharmonické $m < 2$ a na hodnotu 0,2 % pro řád meziharmonické $m > 2$ [5].

1.3 Změny napětí

Obecně změnou napětí je myšlena odchylka efektivní hodnoty napětí od předem stanovené hodnoty napětí, která je brána jako referenční. Tyto změny napětí se v reálných sítích vyskytují téměř nepřetržitě z důvodů velkého množství přechodných jevů, které jsou součástí každé provozované soustavy. Dělení změn napětí je možné provést podle profilu skutečné efektivní hodnoty napětí na poklesy a zvýšení napětí a podle doby trvání na pomalé změny napětí a rychlé změny napětí [6].

Pomalé změny napětí jsou definovány změnou efektivní hodnoty napětí od nominální či smluvené hodnoty napětí v dané napěťové hladině sítě v dlouhodobém měřítku, např. v řádu hodin. Tyto pomalé změny napětí jsou způsobeny změnami zatížení v síti, a tedy

provozními proudy v celém systému, které mají stochastický charakter o určité intenzitě. V důsledku dlouhodobého působení těchto provozních proudů je možné získat napěťový profil s dynamickými změnami efektivní hodnoty napětí v rádech hodin i několika dnů. Stanovení pomalých změn napětí je provedeno jako poměrná hodnota pomalé změny napětí a jejich plánovací úrovně nejsou pevně stanoveny pro danou napěťovou hladinu. Rychlé změny napětí (RVC – Rapid Voltage Change) jsou definovány jako rychlá změna efektivní hodnoty napětí od referenční hodnoty, kterou je aritmetický průměr skutečné efektivní hodnoty v době 100 půlperiod pro systém o systémové frekvenci 50 Hz. Tyto rychlé změny napětí jsou způsobené především spínacími operacemi v síti, které způsobují rychlý přechod efektivní hodnoty napětí mezi dvěma ustálenými stavy. Celý postup vyhodnocení RVC je v souladu s normou ČSN EN 61000-4-30 [7]. Z důvodu neustálé změny skutečné efektivní hodnoty jsou stanoveny prahové hodnoty jako procentní hodnota, které jsou normované. Detekování RVC začíná v čase, kdy skutečná efektivní hodnota napětí opustí toleranční pásmo dané prahovými hodnotami a odchylka napětí je poté stanovena jako rozdíl libovolné efektivní hodnoty napětí během doby trvání RVC a referenční hodnoty těsně před zahájením RVC. Tento rozdíl hodnot je označován jako hloubka, vyjádřena procentuální hodnotou rozdílu efektivní hodnoty napětí vztáženou k nominální hodnotě napětí sítě. Pro RVC nejsou stanoveny konkrétní plánovací úrovně pro danou napěťovou hladinu, lze však zjištěnou hodnotu hloubky porovnat se stanovenými limity dle normy PNE 33 3430-0 [2] pro danou napěťovou hladinu. Kromě RVC je dle normy ČSN EN 61000-4-30 [7] možné vyhodnocovat také krátkodobé poklesy/zvýšení napětí, kde je podle normy referenční hodnotou napětí buď dohodnuté napětí, které je konstantní, nebo klouzavé referenční napětí. To je určeno prostřednictvím filtru prvního řádu, aplikovaného na skutečnou efektivní hodnotu napětí. Opět jsou zde stanoveny normované prahové hodnoty dle normy ČSN EN 61000-4-30 [7] a krátkodobý pokles napětí je detekován, pokud efektivní hodnota napětí klesne pod prahovou hodnotu. Odchylka napětí je poté určena jako rozdíl referenční hodnoty napětí a zbytkového napětí, což je nejnižší hodnota napětí naměřená během krátkodobého poklesu. V případě zvýšení napětí se jedná o krátkodobé zvýšení efektivní hodnoty napětí nad prahovou normovanou hodnotu. Vyhodnocení zvýšení napětí je obdobné jako u poklesů napětí s respektováním příslušné prahové hodnoty napětí. Zvýšení napětí mohou vznikat v důsledku poruch zemním spojením, zanesením Ferrantiho jevu do energetické sítě vlivem odlehčení vedení či nabíjení kondenzátorových baterií. TS svým dynamickým provozem přispívá k rychlým změnám napětí, ať už vlivem velkého odběru nebo rekuperací elektrické energie [6].

1.4 Flikr

Flikr je jev, který vzniká v důsledku RVC, meziharmonickými složkami napětí a fázovými skoky napětí v síti. Tyto průběžné jevy mají negativní důsledek na světelné zdroje. V případě RVC v místě připojení světelného zdroje jsou způsobeny také změny

proudu světelného zdroje a prostřednictvím lidského mozku se tyto změny jeví jako rychlé změny světelného toku, nazývané jako tzv. flickr, na který je lidské oko citlivé ve frekvenčním pásmu 0,01 – 40 Hz. Pro vyhodnocení flickru dle normy ČSN EN 61000-4-15 [8] je použit algoritmus zahrnující sadu filtrů, kde jedním z nich je váhový filtr s frekvenčním rozsahem 0,01 – 40 Hz, jehož přenosová funkce odpovídá invertované normalizované křivce pro citlivost lidského oka. Soubor jednotlivých filtrů zajišťuje úpravu měřeného napětí na požadovaný výstup, kterým je průběh okamžité míry vjemu blikání. Z tohoto průběhu jsou pomocí pravděpodobnostní funkce určeny úrovně blikání překročené po určitých procentech doby během periody pozorování. Výsledkem statistického výpočtu je míra vjemu blikání při měření napětí v intervalu deseti minut – krátkodobá míra vjemu blikání P_{st} nebo v intervalu dvou hodin – dlouhodobá míra vjemu blikání Plt .

$$P_{st} = \sqrt{0,0314 \cdot P_{0,1} + 0,0525 \cdot P_{1S} + 0,0657 \cdot P_{3S} + 0,28 \cdot P_{10S} + 0,08 \cdot P_{50S}}, \quad (6)$$

kde percentil $P_{0,1}$ je úroveň blikání překročená po 0,1 % doby během periody pozorování a percentily P_{1S} , P_{3S} , P_{10S} a P_{50S} jsou vyhlazené úrovně blikání překročené po 1; 3; 10 a 50 % doby během periody pozorování. Vyhlazené hodnoty úrovně blikání označené indexem S jsou vypočteny jako aritmetický průměr z následujících rovnic

$$\begin{aligned} P_{1S} &= \frac{P_{0,7} + P_1 + P_{1,5}}{3} \\ P_{3S} &= \frac{P_{2,2} + P_3 + P_4}{3} \\ P_{10S} &= \frac{P_6 + P_8 + P_{10} + P_{13} + P_{17}}{5} \\ P_{50S} &= \frac{P_{30} + P_{50} + P_{80}}{3}, \end{aligned} \quad (7)$$

kde percentily $P_{0,7}$, P_1 , $P_{1,5}$, $P_{2,2}$, P_3 , P_4 , P_6 , P_8 , P_{10} , P_{13} , P_{17} , P_{30} , P_{50} a P_{80} jsou úrovně blikání překročené po 0,7; 1; 1,5; 2,2; 3; 4; 6; 8; 10; 13; 17; 30; 50 a 80 % doby během periody pozorování. Krátkodobá míra vjemu blikání je určena z desetiminutového okna měření napětí, což je standardní agregovaný interval pro krátkodobá měření kvality napětí. Z hlediska dlouhodobého měření kvality napětí je agregovaný interval stanoven na dobu dvou hodin, ze kterého je určena dlouhodobá míra vjemu blikání. Dle normy [8] je při výpočtu Plt uvažováno 12 hodnot P_{st} po desetiminutových intervalech

$$Plt = \sqrt[3]{\frac{\sum_{i=1}^{12} P_{st_i}^3}{12}}, \quad (8)$$

kde P_{st_i} je krátkodobá míra vjemu blikání každého desetiminutového intervalu. Dle [2] je pro krátkodobou míru vjemu blikání P_{st} stanovena plánovací úroveň 0,7 a pro dlouhodobou míru vjemu blikání Plt 0,46 pro napět'ovou hladinu vvn [6][8].

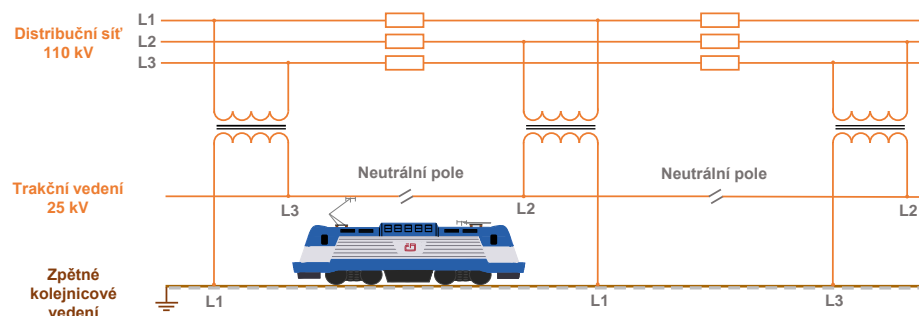
2. TECHNOLOGIE TRAKČNÍCH NAPAJEČŮ 25 kV 50 Hz

Dodávka elektrické energie do TS 25 kV 50 Hz je zajištěna z DS 110 kV prostřednictvím trakční napájecí stanice (TNS). Podle technologie TNS existují obecně dva způsoby napájení TS 25 kV 50 Hz: 1) prostřednictvím jednofázového transformátoru 110/27 kV a 2) pomocí aktivních měničů. V následujících kapitolách jsou podrobně popsány jednotlivé technologie trakčních napáječů pro systém 25 kV 50 Hz [4][9].

2.1 Jednofázový transformátor 110/27 kV

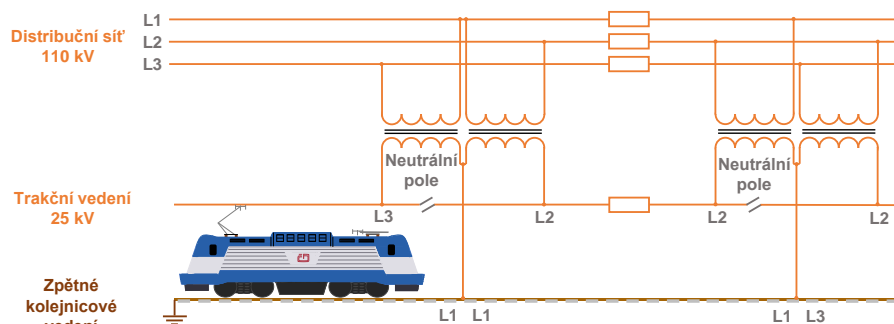
Tento způsob napájení je obecně nazýván jako konvenční systém napájení, protože je užíván téměř u všech TNS v České republice (ČR). Dodávka elektrické energie z DS je zajištěna pomocí dvou jednofázových olejem chlazených transformátorů 110/27 kV, z nichž jeden slouží jako záložní zdroj v případě poruchy. Součástí konvenční napájecí stanice je také FKZ pro kompenzaci induktivního jalového výkonu a zařízení pro filtraci vyšších harmonických složek proudu. Transformátory jsou vybaveny osmi odbočkami na straně primárního vinutí pro regulaci napětí v důsledku jejich změn v DS [10][12].

U konvenčního systému napájení rozeznáváme dva druhy zapojení transformátorů k DS: 1) zapojení transformátorů do „T“ a 2) zapojení transformátorů do „V“. V případě prvního způsobu zapojení je každý úsek trakčního vedení napájen jedním transformátorem, jehož primární vinutí je zapojeno na dvě fáze DS 110 kV (viz. obrázek 1) [11]. Z této skutečnosti plyne, že každý úsek trakčního vedení musí být od vedlejšího oddělen tzv. neutrálním polem z důvodu napájení úseků z odlišných fází DS, což vede k rozdílnému úhlu napětí mezi jednotlivými úseky. Pokud je úsek trakčního vedení zatížen odběrem hnacího vozidla, dojde k velké nesymetrii napětí v DS vlivem velikosti odběru, odvozený od nominálního výkonu trakčních transformátorů, který může být až 16 MVA dle [11]. Dosáhnout symetrického stavu je v praxi velmi obtížné z důvodu nesoudobosti odběrů z jednotlivých úseků trakčního vedení. Z toho důvodu se zapojení do „T“ v současnosti nevyužívá.



Obrázek 1 Zapojení do „T“, překresleno z [11].

V ČR a ve střední Evropě je však vhodnějším způsobem zapojení transformátorů do „V“ (viz. obrázek 2) [11], přičemž uvedená topologie trakčních transformátorů vede k tomu, že z hlediska dlouhodobého měření nesymetrie napětí se TNS v daném místě připojení chová více symetricky v porovnání se zapojením transformátorů do „T“. Nicméně je zde stále problém v nesoudobosti odběrů. Topologie zapojení transformátorů spočívá ve spojení dvou jednofázových transformátorů mezi dva trakční úseky. Na sekundární straně těchto dvou transformátorů jsou spojeny vývody, které jsou připojeny ke zpětnému kolejnicovému vedení.



Obrázek 2 Zapojení do „V“, překresleno z [11].

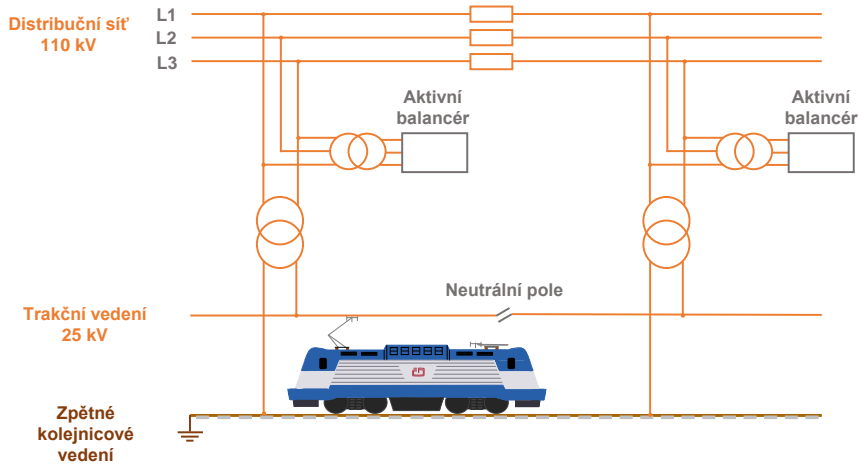
Přestože u zapojení transformátorů do „V“ dochází dlouhodobě k menší nesymetrii napětí oproti zapojení do „T“, je u těchto konvenčních stanic nesymetrie napětí stále značná, což je jejich hlavní problém. Situaci zhoršuje rekuperativní režim brzdění trakčních vozidel, kdy vlivem odběru v jednom trakčním úseku a rekuperace v druhém trakčním úseku vznikají lokální místa v DS poklesu a zvýšení napětí, čímž nesymetrie napětí narůstá [4][9].

Napájení TS prostřednictvím jednofázového transformátoru vykazuje řadu nevýhod, především vznik značné nesymetrie napětí při provozu hnacích vozidel a nutnost FKZ situovaného v TNS, které zvyšuje vlastní spotřebu stanice. Jedinou výhodou tohoto typu napájení je jeho jednoduchost a spolehlivost, avšak svou stálou přítomností v trakčním systému z důvodu navyšování výkonu trakčních vozidel již nespĺňuje standardy pro kvalitu elektrické energie, a proto je tento způsob napájení u nově stavěných TNS zakázáný [10].

2.2 Aktivní balancér

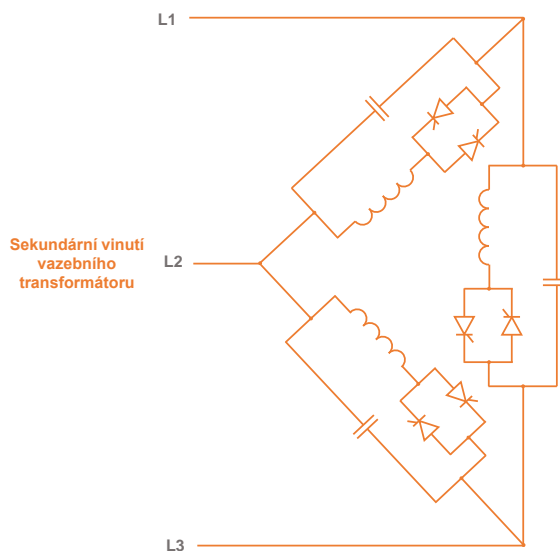
Pro částečnou redukci nesymetrie napětí jsou použity tzv. aktivní balancéry, které lze díky svému principu chování chápat jako vyrovnávač zatížení. Vhodným způsobem zapojení aktivního balancéru k jednofázovému transformátoru 110/27 kV se celková TNS chová jako převodník jednofázového odběru TS na symetrický třífázový odběr, připojený do DS. Aktivní balancér je připojen paralelně pomocí třífázového vazebního transformátoru na primární vinutí jednofázového transformátoru, přičemž zbývající fáze

je přímo připojena k nevyužitým fázím DS (viz. obrázek 3) [12]. Touto technologií je docíleno napájení TS jednotnou fází, nicméně izolace úseků vedení pomocí neutrálních polí je stále přítomna z důvodu rozdílné fáze napájecího napětí v místech připojení TNS pro zamezení nekontrolovatelného přenášení výkonu přes TS 25 kV 50 Hz [10][13].



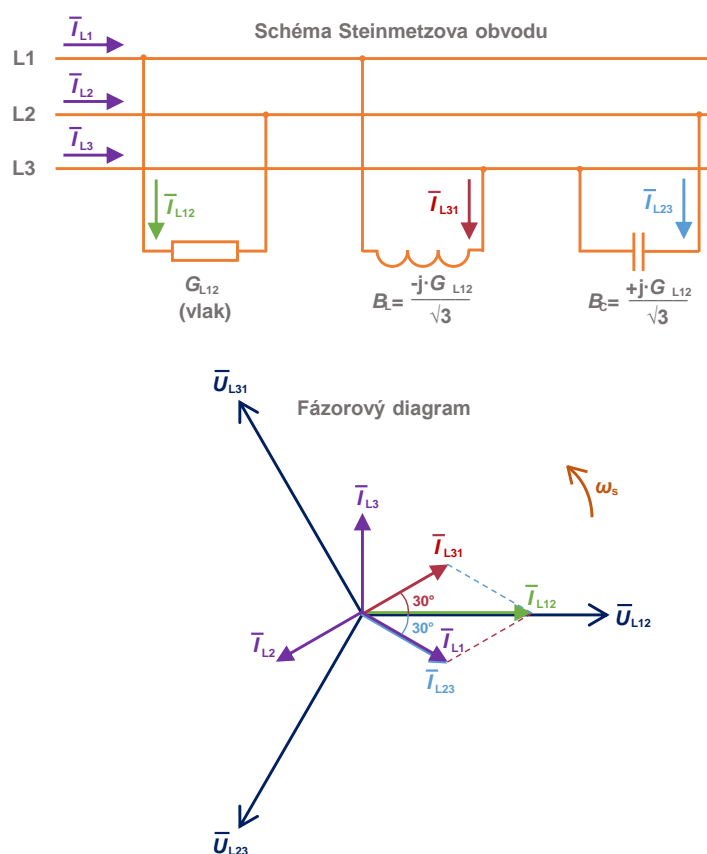
Obrázek 3 Zapojení aktivního balancéru do konvenčního systému napájení, překresleno z [12].

Jedním ze způsobů provedení aktivního balancéru může být statický var kompenzátor (SVC – Static Var Compensator). Tento kompenzátor představuje starší koncepci aktivního balancéru, jehož topologie je v rámci jedné větve tvořena antiparalelně zapojenými tyristory v sérii s tlumivkou a paralelně napevno připojeným kondenzátorem. Tímto způsobem jsou koncipovány celkem tři větve, které jsou zapojené do trojúhelníka (viz. obrázek 4) [13] k DS.



Obrázek 4 Schéma zapojení SVC, překresleno z [13].

Vyrovnávání zátěže, a tedy nesymetrického odběru TS, je založeno na Steinmetzově obvodu (viz. obrázek 5) [14], jehož principem je převod nesymetrické zátěže na symetrickou připojením prvků se schopností regulace jalového výkonu, tedy tlumivek a kondenzátorů. V soustavě symetrických složek se vyrovnání zátěže projevuje eliminací zpětné složky proudu, čímž dochází k redukci nesymetrie napětí. Pokud by byl zatížen úsek trakčního vedení, který je připojený např. mezi fází L₁ a L₂, je podle Steinmetzova obvodu tento nesymetrický odběr vyrovnáván tlumivkou, zapojenou mezi fází L₁ a L₃, a kondenzátorem mezi fází L₂ a L₃. V důsledku toho vzniká balance mezi fázory proudů jednotlivých fází v DS co do velikosti a vzájemného úhlu mezi proudy.



Obrázek 5 Princip Steinmetzova obvodu, překresleno z [14].

V důsledku topologie SVC, která je tvořena celkem třemi tlumivkami a kondenzátory, je možné vyrovnávat zátěž při zapojení TS mezi libovolné dvě fáze DS. Řízení SVC je realizováno tyristory, které pomocí úhlu otevření α regulují proud tlumivkou v každé půlperiodě od úhlu otevření 90° po 180° . Z toho důvodu dochází ke změně indukční susceptance dané tlumivky, což má vliv na vyrovnávání zátěže. Podle aktuální velikosti zatížení úseku trakčního vedení je odvozena velikost susceptance tlumivky a pro její dosažení je řídicím algoritmem nastaven požadovaný úhel otevření. Paralelně k sériově řazené tlumivce s tyristory je napevno připojen kondenzátor s konstantní hodnotou

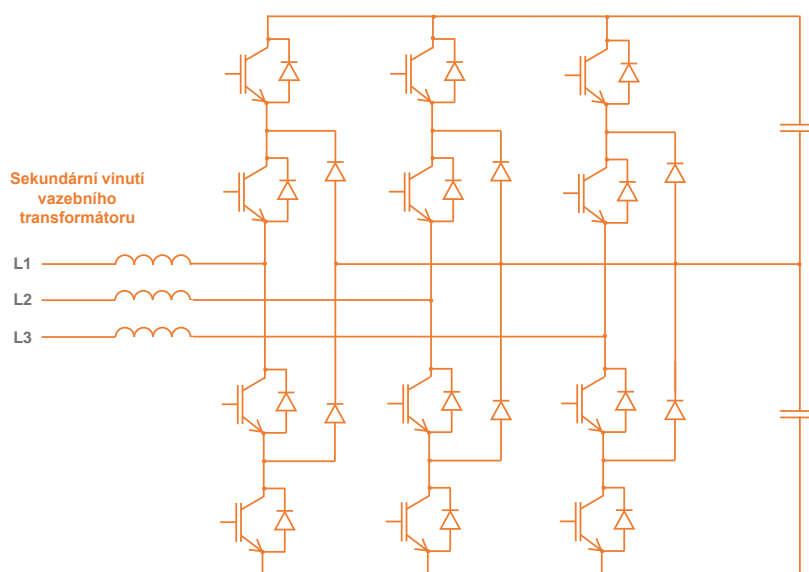
kapacitní susceptance, jejíž hodnota je známá. Z její hodnoty a hodnoty aktuálního úhlu otevření tyristorů je možné zjistit induktivní reaktanci tlumivky

$$X_L = \frac{\alpha - \sin\alpha}{\pi \cdot B_C}, \quad (9)$$

kde α je úhel otevření tyristorů a B_C je kapacitní susceptance kondenzátoru.

V místě připojení konvenční TNS vlivem rovnoměrnějšího rozložení zatížení v jednotlivých fázích DS je nesymetrie napětí částečně eliminována. Nevýhodou SVC je však emise vyšších harmonických složek proudu do DS v důsledku spínání tyristorů. Pro potlačení těchto nežádoucích harmonických složek lze použít přídavné LC filtry, které ve funkci dolní propusti zachovávají základní harmonickou složku proudu v DS. Pro trakční účely je u funkce SVC kladen důraz především na vyvažování nesymetrie napětí, avšak jeho účelem je také kompenzace jalového výkonu a zlepšování účinníku na základní harmonické v DS [14][15].

Další možností realizace aktivního balancéru je pomocí statického synchronního kompenzátoru (STATCOM – Static Synchronous Compensator). Jedná se o modernější technologii, která svým konceptem rozšiřuje možnosti použití SVC. Jeho topologie je tvořena vícehladinovým aktivně řízeným usměřovačem s IGBT tranzistory, stejnosměrným meziobvodem a vyrovnávací tlumivkou (viz. obrázek 6) [16]. STATCOM se tak chová jako proudový zdroj, který injektuje do DS zpětnou složku proudu v protifázi se zpětnou složkou proudu generovanou z TS. Tím je zajištěna eliminace zpětné složky proudu v DS, což vede na symetrizaci odběru na straně DS v případě provozu TS. Další vlastností statického kompenzátoru je kompenzace induktivního jalového výkonu. Pokud je napětí generované kompenzátozem nižší než napětí na vstupu měniče, chová se STATCOM jako induktivní zátěž a odebírá induktivní jalový výkon z DS. Pakliže je napětí generované kompenzátozem vyšší v porovnání s napětím na vstupu měniče, chová se STATCOM jako kapacitní zátěž a induktivní jalový výkon je tak dodáván do DS. Kromě vyvažování nesymetrie napětí a kompenzace jalového výkonu v DS způsobuje STATCOM menší harmonické zkreslení v DS. Vzhledem k použití vícehladinového usměřovače je STATCOM vybaven sofistikovanějším řídicím algoritmem v porovnání s SVC a tvar odebíraného proudu z DS více respektuje sinusový průběh. Odpadá tak nutnost použití přídavných LC filtrů pro eliminaci vyšších harmonických složek proudu [16].

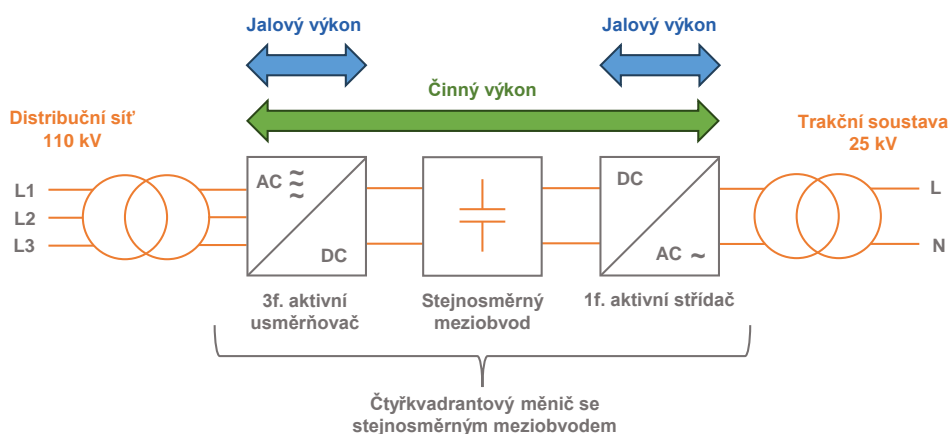


Obrázek 6 Schéma zapojení STATCOM, překresleno z [16].

2.3 Čtyřkvadrantový měnič se stejnosměrným meziobvodem

Další způsob napájení TS 25 kV 50 Hz je prostřednictvím čtyřkvadrantového měniče se stejnosměrným meziobvodem neboli frekvenčním měničem, označovaném zkratkou SFC (Static Frequency Converter), umožňující připojení do třífázové DS 110 kV na straně vstupu měniče a připojení do jednofázové TS 25 kV na výstupní straně měniče. Topologie TNS u tohoto typu napájení je zcela odlišná od konvenčního systému napájení z důvodu plného nahrazení původního jednofázového transformátoru 110/27 kV novou technologií aktivních měničů. Celý blok napájecího systému je tvořen třífázovým transformátorem 110/27 kV, aktivním měničem a jednofázovým transformátorem pro napájení trakčního vedení. Aktivní měniče pro napájení TS pracují s oboustranným tokem energie, tedy dodávkou energie do TS v důsledku trakčního odběru a dodávkou energie do DS z důvodu rekuperace trakčních vozidel [17].

Čtyřkvadrantový měnič se stejnosměrným meziobvodem představuje moderní technologii aktivního měniče pro napájení TS 25 kV 50 Hz. Topologie tohoto čtyřkvadrantového měniče (viz. obrázek 7) [18] je tvořena třífázovým aktivním usměrňovačem na straně vstupu, stejnosměrným meziobvodem a jednofázovým aktivním střídačem na straně výstupu.

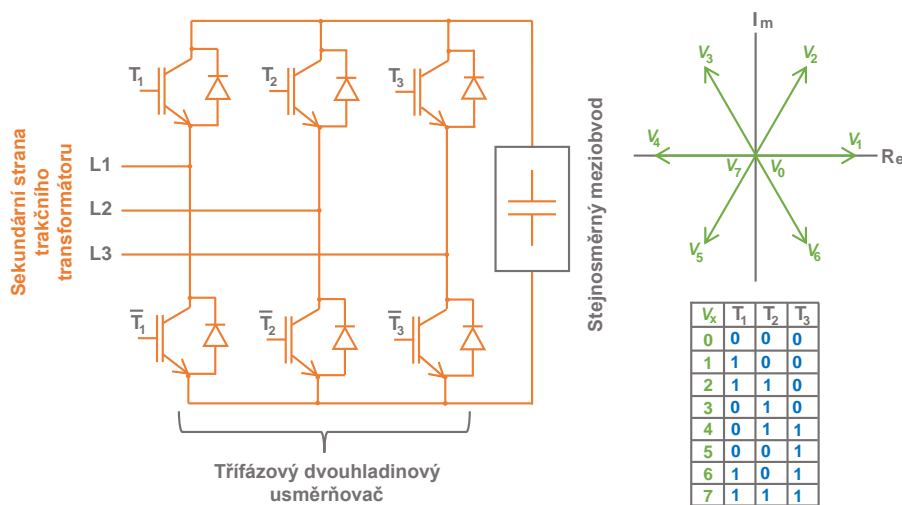


Obrázek 7 Blokové schéma čtyřkvadrantového měniče se stejnosměrným meziobvodem, překresleno z [18].

2.3.1 Řízení třífázového aktivního usměrňovače

Třífázový aktivní usměrňovač (viz. obrázek 8) [20] je tvořen spínacími prvky, konkrétně IGBT tranzistory, které vhodným spínáním usměrňují napětí třífázové soustavy na straně vstupu čtyřkvadrantového měniče na stejnosměrné napětí. Jednou z možností spínání IGBT tranzistorů je vektorové řízení (SVM – Space Vector Modulation), které pracuje na principu generování vektoru napětí v komplexní rovině. Základem regulace je rovina dq souřadnic, do kterých je nutné třífázové napětí na vstupu usměrňovače transformovat pro vytvoření vektorů o určité amplitudě a fázi. Jelikož třífázový usměrňovač obsahuje šest IGBT tranzistorů, je možné dosáhnout celkem osmi spínacích stavů, kde každý stav generuje jeden vektor. Spínání je prováděno vždy pro horní tři tranzistory a pro spodní tři tranzistory je spínání inverzní. Je tak vytvořeno celkem osm vektorů, z nichž šest tvoří hvězdicový fázorový diagram (viz. obrázek 8) [20] s fázovým posuvem vektorů 60° vůči sobě a zbývající dva vektory jsou nulové. Každý vektor je tvořen reálnou a imaginární složkou, přičemž reálná složka je tvořena stacionární složkou d a imaginární složka složkou q . Generování každého sousedního vektoru je odlišeno pouze jednou spínací operací, a tak je dosaženo konkrétní hodnoty požadovaného napětí. Tento způsob řízení je výhodný především z hlediska sníženého počtu spínacích operací pro vytvoření požadované hodnoty napětí a z hlediska deformace průběhu vstupního proudu do aktivního usměrňovače, který více respektuje sinusový tvar průběhu.

Hlavním benefitem aktivně řízeného usměrňovače je plynulá změna fázového posunu vůči napětí, tedy i volba kapacitního charakteru. Aktivní usměrňovač této konfigurace je schopen pracovat ve čtyřkvadrantovém režimu, tedy s oběma polaritami napětí a proudu, a lze tak zajistit obousměrný tok energie mezi DS a stejnosměrným meziobvodem.

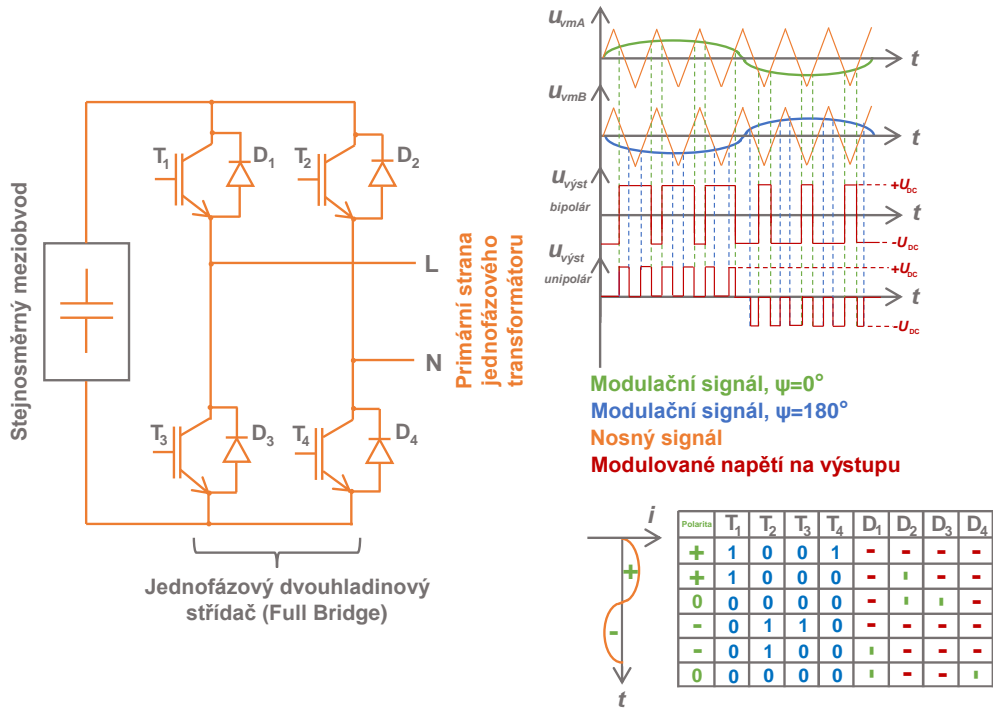


Obrázek 8 Třífázový aktivní usměrňovač a SVM, překresleno z [20].

2.3.2 Řízení jednofázového aktivního střídače

Stejnoseměrný meziobvod je tvořen vysokokapacitním kondenzátorem, kterým je zajištěna podpora pro získání konstantní hodnoty stejnosměrného napětí a slouží jako zdroj napětí pro jednofázový aktivní střídač (viz. obrázek 9) [21]. Jelikož se jedná o zapojení typu Full Bridge, které obsahuje celkem čtyři IGBT tranzistory, je možné vytvořit na výstupu střídavé napětí, jehož amplituda nabývá hodnot $+U_{DC}$ a $-U_{DC}$. Řízení jednofázového střídače je provedeno pomocí sinusové pulzní šířkové modulace (SPWM – Sinusoidal Pulse-Width Modulation), jejíž princip je komparace modulačního signálu sinusového průběhu o síťové frekvenci s nosným vysokofrekvenčním signálem trojúhelníkového průběhu, jehož frekvence je dána spínací frekvencí střídače. Řízení jednofázového střídače může být provedeno např. jako bipolární, při němž jsou použity dva modulační signály sinusového průběhu, které jsou navzájem ve fázi. V důsledku toho je výsledné modulované napětí tvořeno obdélníky, nabývajícími hodnot $+U_{DC}$ a $-U_{DC}$ bez rozdílu na polaritu modulačních signálů (viz. obrázek 9) [21]. Spínací proces začíná současným sepnutím tranzistoru T_1 a T_4 , čímž začíná protékat proud do zátěže v kladném směru. Poté se tranzistor T_4 odpojí a proud protéká kladným směrem přes sepnutý tranzistor T_1 a nulovou diodu D_2 . Po vypnutí tranzistoru T_1 je proud zátěží vynulován přes nulové diody D_2 a D_3 . Záporná polarita proudu zátěží vzniká po společném sepnutí tranzistorů T_2 a T_3 . Analogicky s kladnou půlperiodou proudu zátěží je poté tranzistor T_3 vypnut a proud je veden v záporné půlperiodě sepnutým tranzistorem T_2 a nulovou diodou D_1 . Proud je poté vynulován po vypnutí tranzistoru T_2 diodami D_1 a D_4 . Tento cyklus se poté opakuje pro další periody. Frekvence výstupního modulovaného napětí je ve výsledku shodná s požadovanou frekvencí modulačního sinusového signálu, která je volena podle systémové frekvence v síti. Podobně jako u třífázového usměrňovače je zde

pomocí SPWM dosaženo kvazisinusového průběhu proudu na výstupu střídače. Střídač může být navíc vybaven filtrem z důvodu pulzující charakteristiky jednofázového odběru. Způsob řízení střídače také umožňuje oboustranný tok energie ze strany stejnosměrného meziobvodu do TS a naopak [18][20].

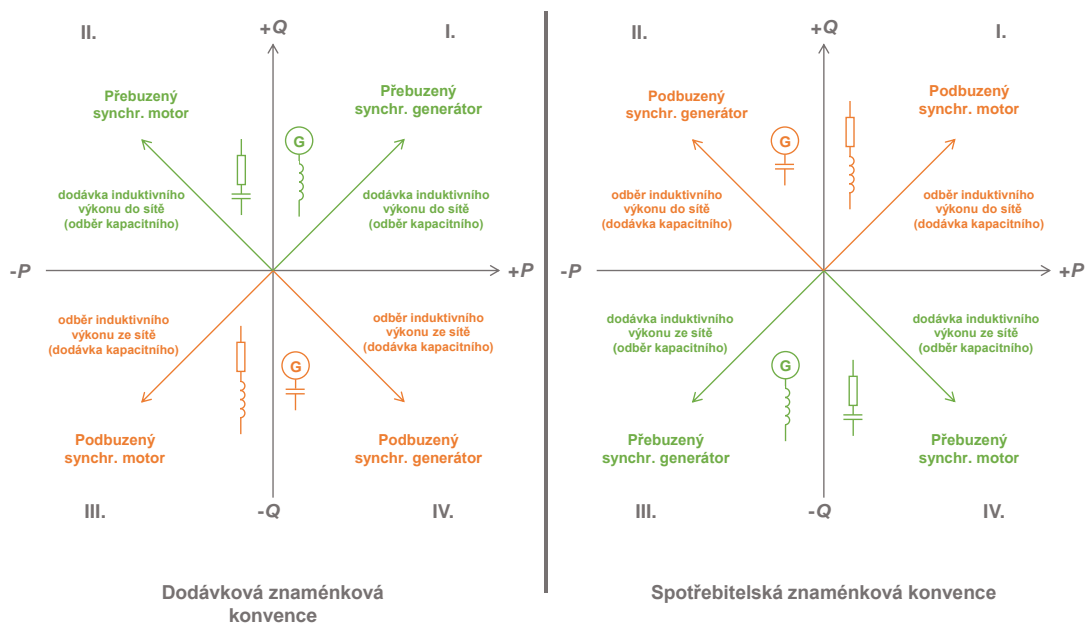


Obrázek 9 Jednofázový aktivní střídač včetně SPWM, překresleno z [21].

Díky stejnosměrnému meziobvodu je možné čtyřkvadrantovým měničem propojit dvě různé sítě, které jsou na sobě nezávislé a mohou mít i odlišnou frekvenci. Z obrázku 7 je patrné, že činný výkon může být distribuován oběma směry skrze celý napájecí blok ze strany DS do TS a naopak [20].

2.3.3 Znaménková konvence

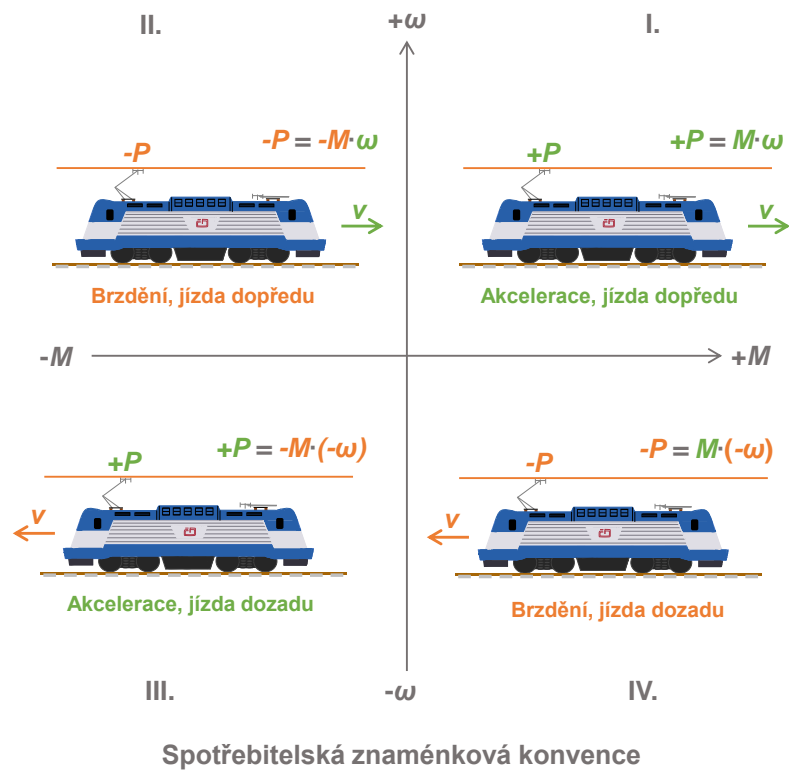
Pro relevantní popis směru toku energie z DS do TS při trakčním odběru a z TS do DS při rekuperaci hnacího vozidla je nezbytné definovat dodávkovou znaménkovou konvenci a spotřebitelskou znaménkovou konvenci. Tyto dva typy znaménkových konvencí jsou odvozeny od chování synchronního stroje, který může být provozován v přebuzeném či podbuzeném stavu (viz. obrázek 10) [22].



Obrázek 10 Znaménková konvence – kvadranty, překresleno z [22].

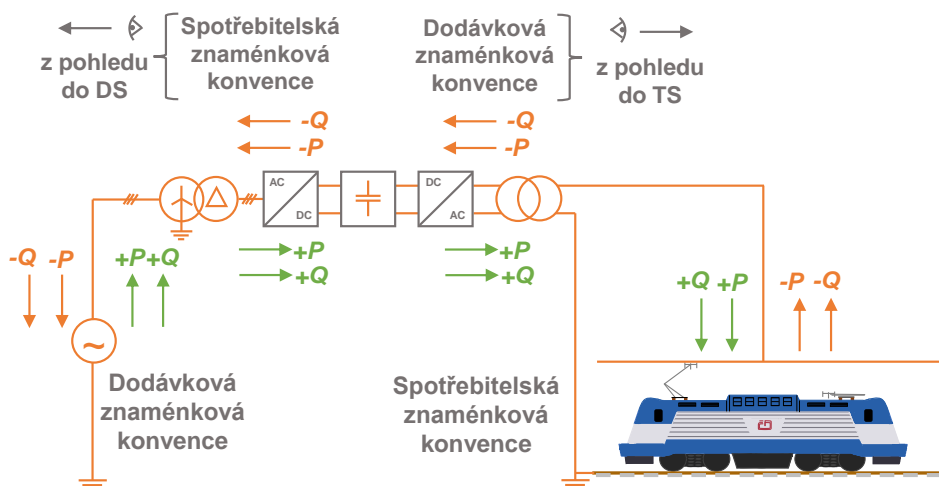
Pro dodávkovou znaménkovou konvenci je dodávaný činný a jalový (induktivní) výkon kladný a odebíraný činný a jalový (induktivní) výkon záporný. Z obrázku 10 levé části je patrné, že na straně kladného činného výkonu je označen I. a IV. kvadrant se synchronním generátorem. Tuto oblast poté rozděluje stav nabuzení generátoru na I. a IV. kvadrant podle dodávky či odběru jalového výkonu. Synchronní motor je spotřebičem, a proto je označen na straně záporného činného výkonu ve II. a III. kvadrantu. Pokud je motor přebuzení, je dodáván induktivní výkon do sítě. V případě podbuzeného synchronního motoru, je induktivní výkon ze sítě odebírán. Pakliže je definována spotřebitelská znaménková konvence, je dodávaný činný a jalový (induktivní) výkon záporný a odebíraný činný výkon a jalový (induktivní) výkon kladný. V důsledku toho je v porovnání s dodávkovou konvencí I. kvadrant zaměněn za III. kvadrant a II. kvadrant je umístěn místo IV. kvadrantu (viz. pravá část obrázku 10).

Pro určení znaménkové konvence výkonů v případě trakčního vozidla se vychází z tzv. diagramu ω - M , který zobrazuje závislost mechanického momentu na úhlové rychlosti nápravy vozidla (viz. obrázek 11) [23].



Obrázek 11 Znaménková konvence – diagram ω - M , překresleno z [23].

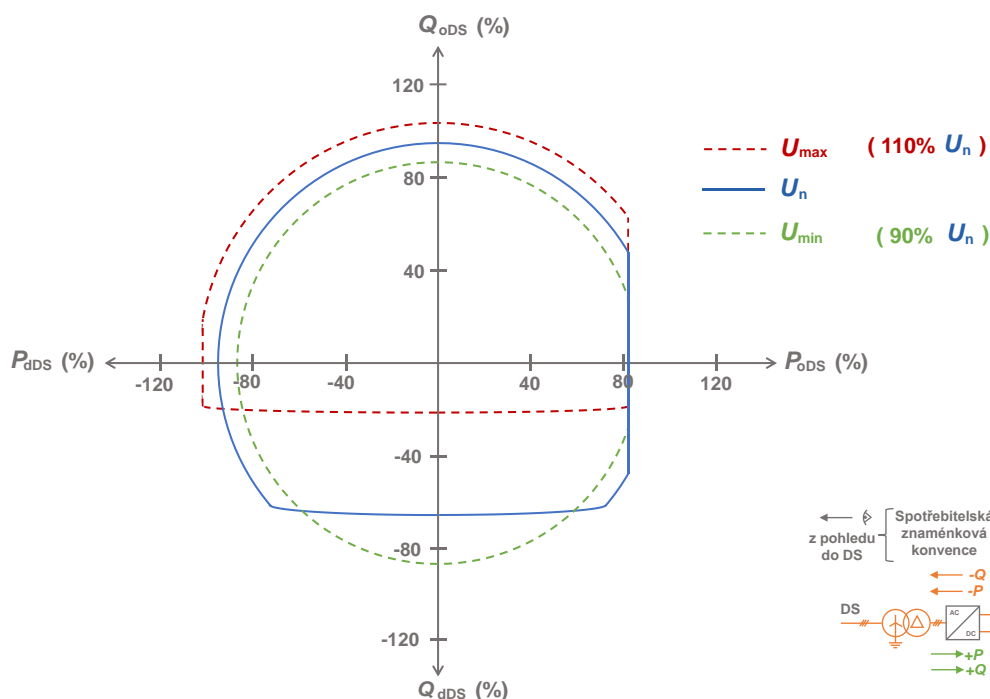
Podle smyslu mechanického momentu a směru točení nápravy hnacího vozidla je vypočten mechanický výkon na hřídeli vozidla. Pokud hnací vozidlo akceleruje, je vyvíjen kladný mechanický výkon, který je důsledkem kladného odebíraného činného výkonu z trakčního vedení. Pakliže hnací vozidlo brzdí, změní se smysl mechanického momentu a mechanický výkon na hřídeli má záporné znaménko, čímž je do trakčního vedení prostřednictvím rekuperace dodáván činný výkon se záporným znaménkem. Z této skutečnosti plyne, že pro hnací vozidlo je zavedena spotřebitelská znaménková konvence. Pro celý systém, zahrnující zdroj napájení DS, čtyřkvadrantový měnič a TS, je tedy nutné dodržet zvolenou znaménkovou konvencí pro zachování směru toku energie, což je reprezentováno kladným či záporným činným a jalovým výkonem (viz. obrázek 12) [22].



Obrázek 12 Znaménková konvence – toky výkonů, překresleno z [22].

2.3.4 PQ diagram

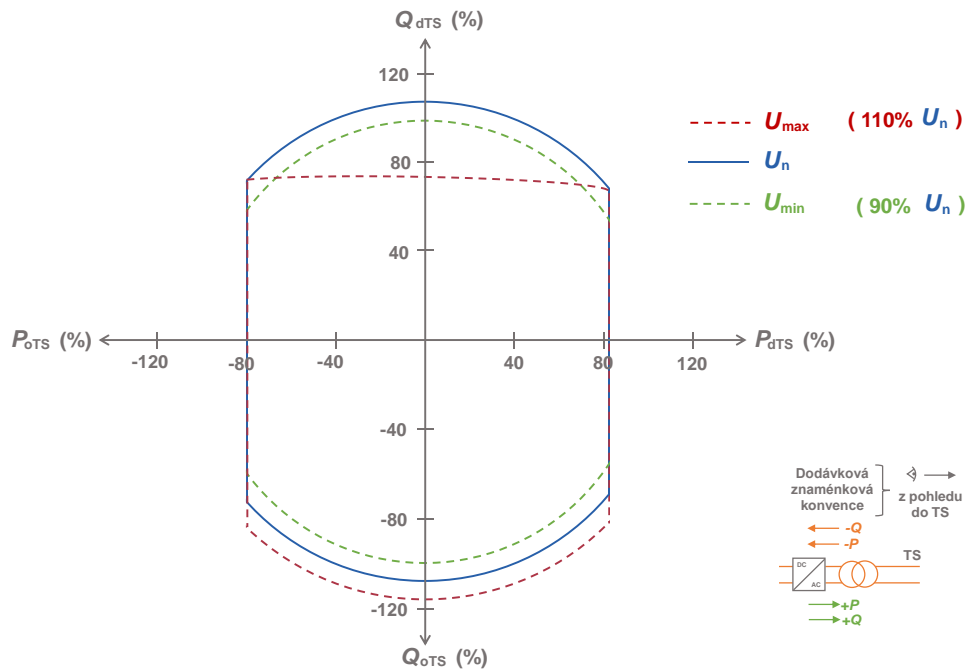
Vzhledem k sofistikovanému řízení třífázového usměrňovače a jednofázového střídače lze činný výkon procházející měničem regulovat pomocí činného proudu měniče podle aktuálního odběru TS či rekuperace do DS. Jalový výkon je však řízen zvláště třífázovým usměrňovačem na straně vstupu měniče a zvláště jednofázovým střídačem na straně výstupu měniče prostřednictvím změny fázového posuvu mezi napětím a proudem v dané síti. Z toho důvodu je možné variabilně regulovat jalový výkon v DS síti bez ohledu na jalový výkon v TS a naopak. Tato regulace jalového výkonu je také nezávislá na dodávaném či odebíraném činném výkonu TS a je tedy možné dodávat nebo odebrat jalový výkon bez ohledu na aktuální velikost činného výkonu, ať už v režimu dodávky či odběru. Pracovní oblast měniče z hlediska toku činného a jalového výkonu je dána PQ diagramem pro třífázový aktivní usměrňovač a jednofázový aktivní střídač. Příklad PQ diagramů pro usměrňovač a střídač je uveden na obrázku 13 a 14 [24].



Obrázek 13 Příklad PQ diagramu třífázového aktivního usměrňovače, překresleno z [24].

Charakteristiky PQ diagramu jsou tvořeny kružnicemi, které reprezentují maximální zdánlivý výkon v příslušných kvadrantech diagramu a ohraničují tak pracovní oblast měniče. Kružkové charakteristiky jsou tvořeny pro tři úrovně napětí: maximální napětí (červeně), nominální napětí (modře) a minimální napětí (zeleně). Maximální a minimální hodnota napětí jsou limity napětí pro napěťovou soustavu 110 kV, jejichž hodnota $\pm 10\%$ je určena dle Kodexu přenosové soustavy [25]. Jelikož měnič pracuje jako proudový zdroj, je při vyšším napětí dosaženo většího činného výkonu. Pro třífázový aktivní usměrňovač byla definována spotřebitelská znaménková konvence z pohledu do DS. V takovém případě je dodávaný činný a jalový výkon do DS záporný a odebíraný činný a jalový výkon kladný. Kružkové charakteristiky mohou však disponovat určitým omezením výkonu v rámci provozu měniče. Například odebíraný činný výkon z DS může být omezen pro všechny tři úrovně napětí na 85 % vzhledem k aktuálnímu zatížení TS. V diagramu je také zaznačen příklad omezení dodávky jalového výkonu do DS, přičemž je omezení určeno proporcionálně pro danou úroveň napětí. Pro stav v DS, kdy je velikost napětí na minimální úrovni, tedy 99 kV, není dodávka jalového výkonu žádným způsobem omezena, aby mohlo dojít ke zvýšení napětí v DS a vzdálit se tak od spodní meze pro minimální napětí v DS. V opačném případě, kdy je v DS velikost napětí na horní mezi, je dodávka jalového výkonu do DS výrazně redukována. Podobné vlastnosti platí také pro PQ diagram jednofázového aktivního střídače. Je zde však definována dodávková znaménková konvence z pohledu do TS. Dodávaný činný a jalový výkon do TS je s kladným znaménkem, odebíraný činný a jalový výkon z TS je se záporným

znaménkem. Kruhové charakteristiky mohou být podobně jako u aktivního usměrňovače omezeny na určitou hodnotu výkonu. Zde je ukázán příklad omezení dodávky činného výkonu do TS cca na hodnotu 85 % a odběru činného výkonu z TS na hodnotu 80 %. Je zde také patrná podpora TS z hlediska regulace napětí v důsledku dodávky jalového výkonu do TS, který je omezen v případě dosažené horní hranice tolerance napětí.



Obrázek 14 Příklad PQ diagramu jednofázového aktivního střídače, překresleno z [24].

Regulace velikosti napětí je zde opět možná pomocí jalového výkonu, čímž lze kompenzovat úbytky napětí na trakčním vedení vlivem velkého odběru hnacích vozidel, a je tak možné zvýšit vzájemné vzdálenosti TNS [18][24].

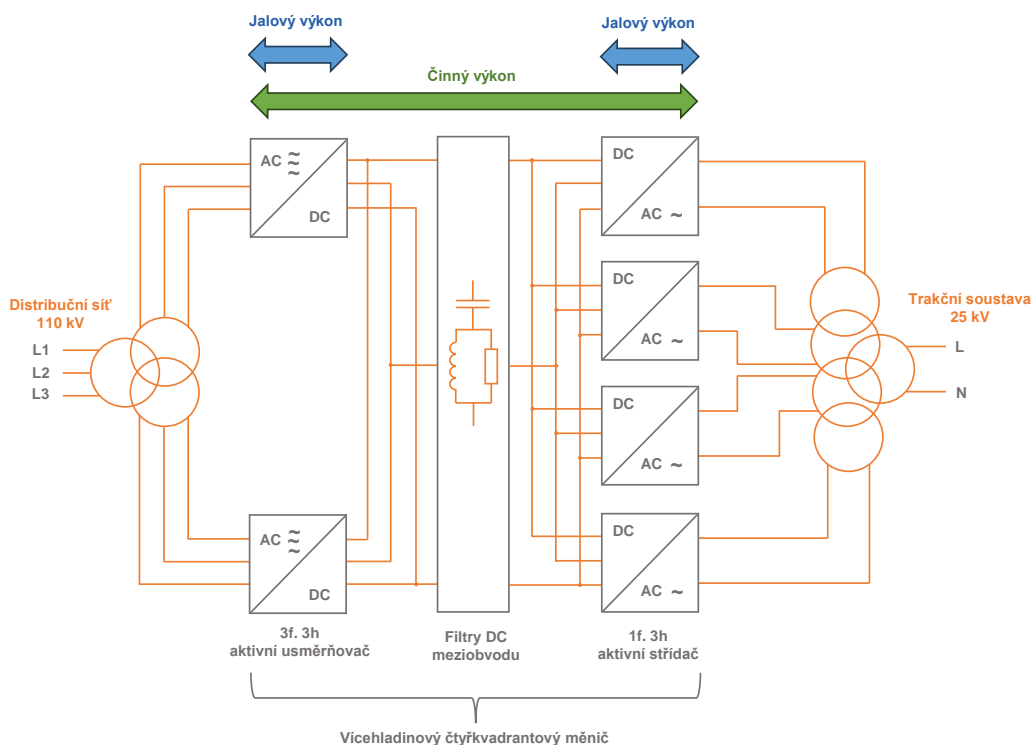
Z hlediska kvality napětí v DS vykazuje čtyřkvadrantový měnič se stejnosměrným meziobvodem řadu výhod. Je to dáno především v použití třífázového aktivního usměrňovače na straně vstupu měniče a třífázovým trakčním transformátorem, pomocí kterého je měnič připojen do DS 110 kV. Měnič tak představuje symetrickou zátěž pro DS, kdy je odebíraný proud z trakčního vedení měničem rovnoměrně rozložen do všech fází DS a nedochází tak k výrazné nesymetrii napětí v DS v porovnání s konvenčním systémem napájení. Aktivní usměrňovač svým řídicím algoritmem může zajistit téměř nulový fázový posun mezi napětím a odebíraným proudem z DS, čímž účinník na první harmonické nabývá přibližně hodnoty 1 i v případě odběru lokomotivami starší generace s účinníkem 0,7. Emise vyšších harmonických a mezipharmonických složek proudu způsobené lokomotivami starší generace s implementovaným dvoucestným usměrňovačem, který emituje do trakční sítě především 3. a 5. harmonickou složku proudu, způsobují výrazné harmonické zkreslení proudu. Vyšší harmonické složky proudu emitované z TS mohou být eliminovány a v DS se nemusí vyskytovat. Toto

vyjádření však není pravidlem. Spínání IGBT tranzistorů aktivního usměrňovače zajišťuje odběr proudu, jehož tvar průběhu je nepatrně zkreslený vlivem vstupních filtrů měniče. Toto harmonické zkreslení v DS je však minimální v porovnání s konvenčními TNS a z toho důvodu nemusí být instalována nákladná FKZ. Z důvodu synchronizace úhlu napětí na vícero TNS je zajištěna synchronní jednofázová TS, čímž je zajištěn stejný úhel napětí na styku dvou úseků trakčního vedení. V důsledku toho je možné eliminovat neutrální pole mezi sousedními úseky a napájet tak každý úsek vedení z obou stran. Při použití oboustranného napájení a regulace napětí v TNS na straně trakčního vedení je možné docílit nižších hodnot úbytků napětí na trakčním vedení i při použití větších vzdáleností TNS. Prostřednictvím čtyřkvadrantového měniče je možné do jisté míry kontrolovat dodávku elektrické energie do DS při rekuperaci hnacích vozidel [18][24].

2.4 Čtyřkvadrantový měnič s prokládaným spínáním

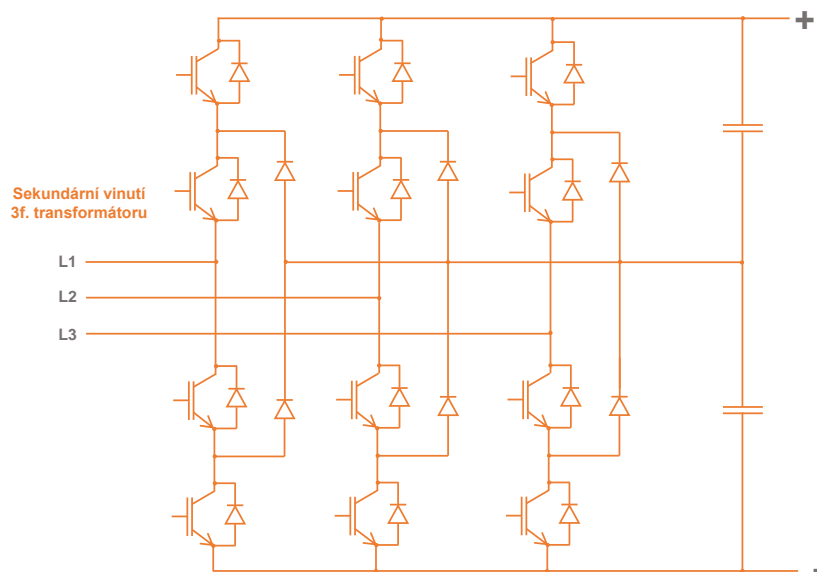
Čtyřkvadrantový měnič se stejnosměrným meziobvodem je aplikovaná moderní technologie pro trakční účely. Reálné provedení takového měniče však disponuje složitější topologií silového obvodu v porovnání s blokovým schématem na obrázku 7, 8 a 9. V důsledku toho je řídicí struktura rozsáhlejší a sofistikovanější, čímž je dosaženo menších negativních vlivů na DS. V porovnání se základním dvouhladinovým měničem (viz. kap. 2.3) mohou být v reálných systémech použity tzv. vícehladinové měniče, které disponují větším počtem třífázových aktivních usměrňovačů a jednofázových aktivních střídačů. Jednotlivé usměrňovače jsou propojeny paralelně a přes soubor několika kondenzátorů tvořících stejnosměrný meziobvod jsou vázány na paralelně propojené jednofázové střídače. Na vstupní straně měniče je umístěn sčítací třífázový transformátor pro docílení prokládaného spínání [17].

Jedním z představitelů vícehladinového čtyřkvadrantového měniče pro napájení TS 25 kV 50 Hz je měnič PCS6000 od společnosti Hitachi. Struktura měniče (viz. obrázek 15) [26] je tvořena dvěma třífázovými tříhladinovými aktivními usměrňovači, tříhladinovým stejnosměrným meziobvodem a čtyřmi tříhladinovými aktivními střídači.

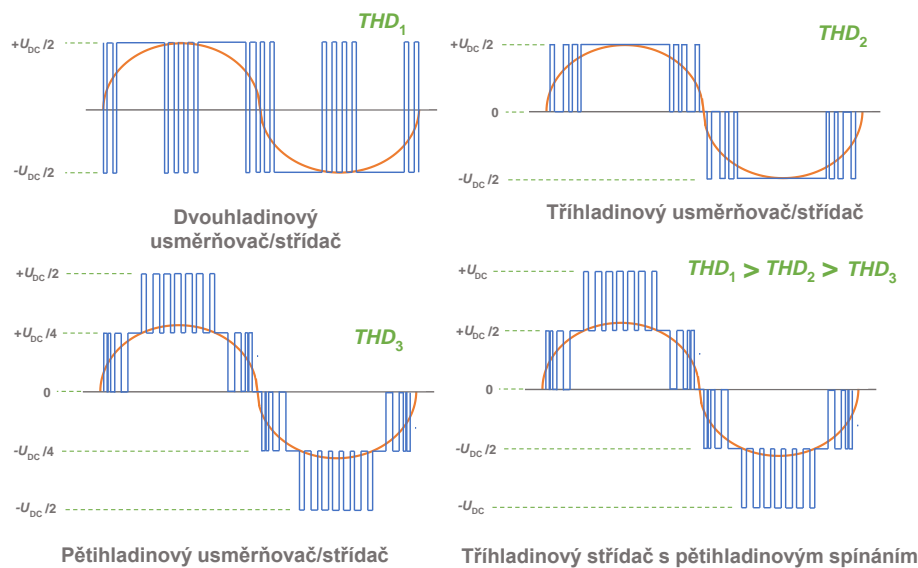


Obrázek 15 Blokové schéma vícehladinového čtyřkvadrantového měniče, překresleno z [26].

Tříhladinový aktivní usměrňovač (viz. obrázek 16) [17] je tvořen dvěma paralelně propojenými třífázovými aktivními usměrňovači, které umožňují modulaci vstupního napětí ve třech hladinách. V porovnání s klasickou koncepcí třífázového usměrňovače je u vícehladinového uspořádání přítomen nulový bod. Pod pojmem tříhladinový usměrňovač je chápána konverze vstupního střídavého napětí na tři úrovně stejnosměrného napětí. Je to dáno způsobem zapojení IGBT tranzistorů, které jsou spínány tak, aby na straně výstupu byla vždy jedna ze tří možných hodnot napětí. V důsledku toho je možné na vstupu tříhladinového stejnosměrného meziobvodu dosáhnout celkem tří hodnot (hladin) napětí: $+U_{DC}/2$ (kladné napětí), 0 (nulové napětí), a $-U_{DC}/2$ (záporné napětí). Tím je dosažena v porovnání s dvouhladinovým usměrňovačem (viz. kap. 2.3) větší variabilita spínacích operací IGBT tranzistorů. Způsob řízení tříhladinového usměrňovače je podobný jako dvouhladinového, tedy např. pomocí SVM. Rozdíl spočívá ve zvýšení počtu spínacích operací, a tedy k většímu množství možností generování vektorů napětí, což vede k menšímu zkreslení modulovaného signálu.



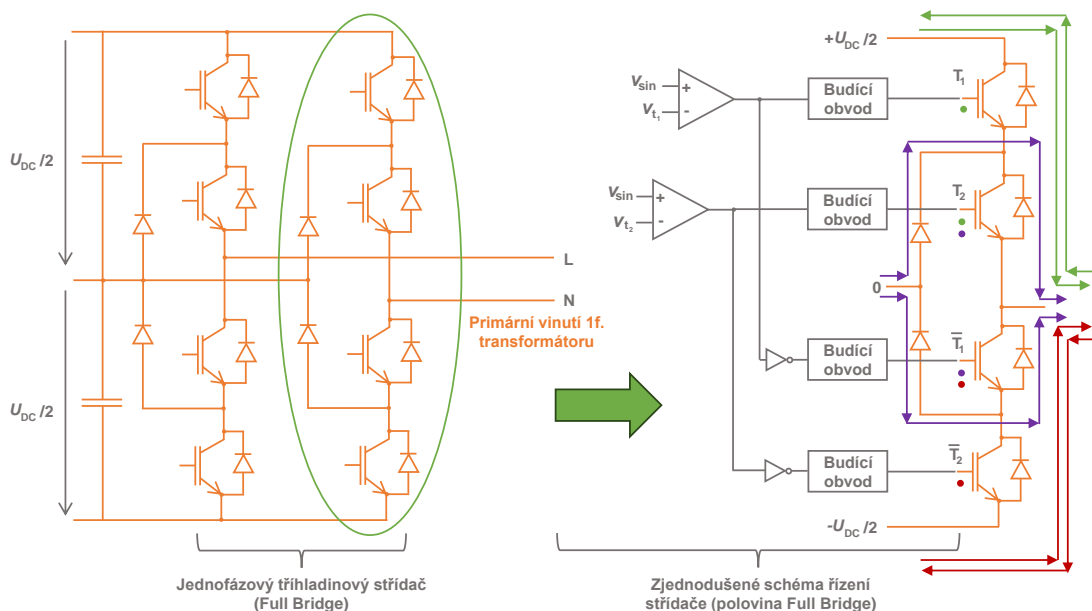
Obrázek 16 Třífázový tříhladinový aktivní usměrňovač, překresleno z [17].



Obrázek 17 Průběhy modulovaného napětí vícehladinových měničů, překresleno z [27].

Výstupní stranu čtyřkvadrantového měniče tvoří čtyři jednofázové aktivní střídače, které jsou paralelně propojeny, a tvoří tak tříhladinové zapojení (viz. obrázek 18) [20]. Topologie tříhladinového střídače podle obrázku 18 je řešena jako Full Bridge, je tak dosaženo pětihladinového spínání a výstupní napětí může dosáhnout těchto hladin: $+U_{DC}$, $+U_{DC}/2$, 0 , $-U_{DC}/2$ a $-U_{DC}$ (viz. obrázek 17 – tvar modulovaného výstupního napětí je totožný s modulovaným fázovým vstupním napětím usměrňovače) [27]. Pokud je řídicí algoritmus pro jednofázový tříhladinový střídač řešen pomocí SPWM, je využita

komparace sinusového signálu o frekvenci 50 Hz a vysokofrekvenčních signálů trojúhelníkového tvaru zvlášť pro kladnou a zápornou půlperiodu sinusového signálu. Počet nosných signálů je dán počtem úrovní střídače $n-1$, tzn. pro tříhladinový střídač jsou využity dva nosné signály (jeden pro kladnou půlperiodu modulačního signálu a druhý pro zápornou půlperiodu modulačního signálu). Tento způsob modulace je také označován jako LS-PWM (Level-Shifted Pulse-Width Modulation). V rámci poloviny můstku jsou využity dva komparátory, přičemž první porovnává sinusový signál a trojúhelníkový signál pro kladnou půlperiodu sinusového signálu. Z vývodu komparátoru jsou přivedeny signály na dvojici budících obvodů, z nichž jeden je negovaný. Úkolem budícího obvodu je zajistit jednotlivé úrovně napětí, které jsou přivedeny na hradla IGBT tranzistorů, a galvanické oddělení. Druhý komparátor slouží ke stejnému účelu, ale porovnává sinusový signál s trojúhelníkovým signálem pro zápornou půlperiodu sinusového signálu. Vlivem řídicího algoritmu jsou vůči sobě obě části tříhladinového střídače spínány v jiný časový okamžik. Délka spínacích cyklů IGBT tranzistorů každé části usměrňovače v rámci jedné půlperiody je jiná a modulovaný průběh vstupního napětí má schodovitý tvar (viz. obrázek 17) [27], čímž více respektuje tvar sinusového průběhu. Všechny čtyři tříhladinové střídače jsou připojeny na sčítací jednofázový transformátor, který napájí TS 25 kV. V důsledku pětiúrovňového spínání čtyř jednofázových střídačů v návaznosti na čtyři primární vinutí sčítacího transformátoru může tvořit celkem 16 napěťových hladin + nulovou hladinu v TS [20][21].



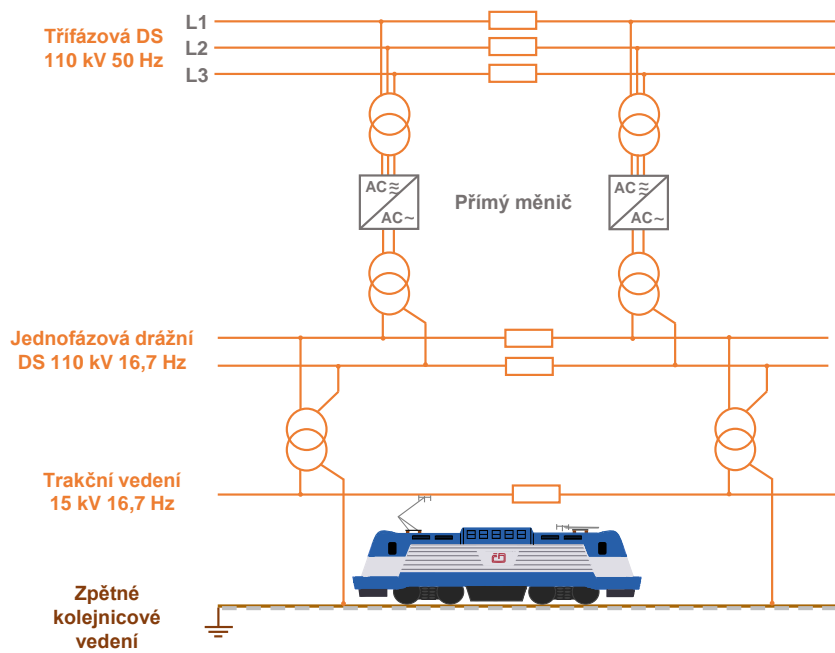
Obrázek 18 Jednofázový tříhladinový aktivní střídač včetně zjedn. schématu řízení, překresleno z [20].

V důsledku zachování základní topologie dvouhadinového čtyřkvadrantového měniče (viz. kap. 2.3), je regulace činného a jalového výkonu obdobná jako u dvouhadinového měniče. Lze tedy z hlediska energetických toků uplatnit vlastnosti, zmíněné v předešlé kapitole včetně popisu PQ diagramů. Větší počet spínacích stavů však vede ke kvalitnější modulaci proudové vlny, čímž je celkový modulovaný průběh napětí v DS podobný sinusovému průběhu a činitel harmonického zkreslení nabývá nižších hodnot v porovnání s dvouhadinovým měničem [20][21].

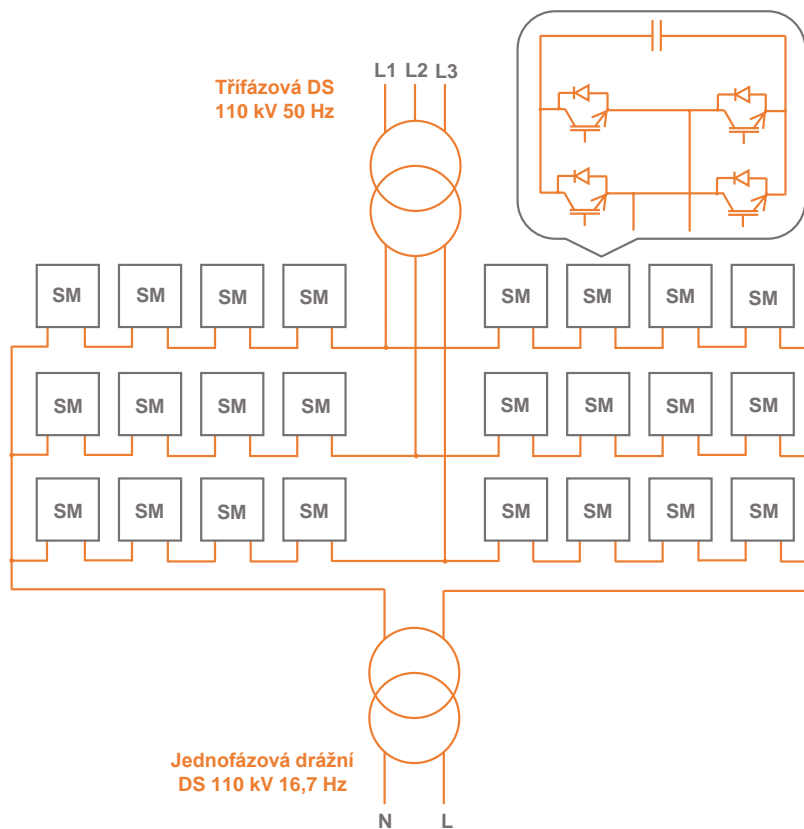
2.5 Přímý měnič

Přímé měniče, na rozdíl od měničů s DC meziobvodem, provádí přímou konverzi střídavého napětí DS na střídavé napětí TS z důvodu absence stejnosměrného meziobvodu [21].

V oblasti trakce zajišťují přímé měniče konverzi střídavého napětí pro napájení TS 15 kV 16,7 Hz v Německu a Švýcarsku, které mohou zastoupit majoritní konvenční rotační měniče. Topologie napájení TS je však odlišná v porovnání s TS 25 kV 50 Hz, kdy je trakčním měničem napájena jednofázová drážní DS 110 kV 16,7 Hz, ke které jsou připojeny jednofázové transformátory, snižující napětí DS 110 kV na napětí TS 15 kV 16,7 Hz (viz. obrázek 19) [11]. Jedním z používaných měničů pro napájení TS 15 kV 16,7 Hz je měnič Sitras SFC plus od společnosti Siemens. Struktura je tvořena jako modulární vícehadinový přímý měnič s výkonovými submoduly (SM), řazenými do série v každé větvi měniče (viz. obrázek 20) [28]. Každý SM obsahuje aktivně řízený bipolární článek s IGBT tranzistory a modulovým kondenzátorem, který redukuje pulzující výkon TS. Počet SM v každé větvi se pro trakční účely pohybuje v rozmezí 10 až 30, čímž je možné řídit výkon až do 120 MVA. Vstupní stranu měniče tvoří dvouvinutový třífázový transformátor, zapojený do třífázové DS 110 kV, na jehož sekundární straně je generováno napětí v několika hladinách. Výstupní strana měniče je opatřena jednofázovým transformátorem, který napájí jednofázovou drážní DS 110 kV.



Obrázek 19 Napájení TS 15 kV 16,7 Hz, překresleno z [11].



Obrázek 20 Modulární vícehladinový přímý měnič, překresleno z [28].

Pro řízení přímého měniče je možné použít např. SVM pro stabilizaci napětí na každém SM v každé větvi. SM, u kterých není napětí stabilizováno a jsou zde maximální a minimální úrovně napětí, jsou vybrány pro další spínací operace. Častějším způsobem je použití jednodušší metody pomocí PS-PWM (Phase-Shift Pulse-Width Modulation). Na rozdíl od dříve zmiňované LS-PWM nejsou zde nosné signály trojúhelníkového průběhu vůči sobě posouvány vertikálně ale horizontálně, tedy s určitým fázovým posuvem. V případě, že jsou aktivní prvky v každém SM bipolární, jsou nosné signály posunuty vůči sobě o 180° děleno počtem SM na fázi. V důsledku sériového propojení jednotlivých SM v každé větvi je fázovými posuvy nosných signálů dosaženo vstupního a výstupního napětí měniče v několika hladinách [11][21][29].

Při provozu přímého měniče vznikají mezi jednotlivými větvemi cirkulační proudy v důsledku sériově propojených SM. Tyto proudy vytváří cirkulační výkon se dvěma frekvencemi, které vzniknou součtem a rozdílem frekvence napětí DS a frekvence napětí TS. Tento cirkulační výkon je rozložen mezi jednotlivými větvemi přímého měniče a kompenzuje pulzující výkon jednofázové TS. Pokud platí rovnost mezi frekvencí napětí DS a frekvencí napětí TS, je cirkulační výkon nulový a pulzující výkon TS není kompenzován. Z hlediska kvality napětí obsahují cirkulační proudy především tři harmonické složky proudu. Jednou z nich je základní harmonická složka proudu s frekvencí 50 Hz, která zprostředkovává výměnu energie mezi DS a přímým měničem. Další harmonická složka proudu disponuje 1/3 frekvence základní harmonické 16,7 Hz, která zajišťuje výměnu energie mezi TS a přímým měničem. Poslední harmonická složka má frekvenci 2/3 frekvence základní harmonické 33,3 Hz v důsledku rozdílu frekvence napětí na vstupu a výstupu přímého měniče, která zajišťuje výměnu energie mezi jednotlivými větvemi měniče [30].

V důsledku potřebného cirkulačního výkonu mezi větvemi jsou přímé měniče vhodné pro napájení TS s nižší frekvencí v porovnání s frekvencí v DS z důvodů nižších požadavků na filtry. Praktické použití těchto měničů je tedy omezené na systémy s rozdílnou frekvencí a vyžadují sofistikované řízení [30].

3. POROVNÁNÍ TECHNOLOGIÍ TRAKČNÍCH NAPAJEČŮ

Každá technologie trakčního napaječe (viz. kap. 2) je řešena různou topologií zapojení, v jejímž důsledku je určitým způsobem ovlivňována DS při provozu TS. Z hlediska kvality napětí lze pomocí definovaných relevantních ukazatelů kvality elektrické energie (viz. kap. 1) vyhodnotit zpětný vliv na DS, a tedy porovnat míru negativních vlivů jednotlivých technologií na DS. Odlišnost jednotlivých technologií trakčních napaječů má také vliv na způsob provozování TS. Uvedené technologie trakčních napaječů jsou srovnány podle následujících atributů: symetrie v DS, nutnost použití FKZ, přítomnost neutrálních polí mezi úseky trakčního vedení, schopnost napájení TS v případě poruchy měniče či jednofázového transformátoru, spolehlivost z hlediska složitosti konstrukce a možnost rekuperace.

Jednofázový transformátor 110/27 kV zapojený do „T“ je z hlediska symetrie napětí v DS z uvedených technologií napaječů nepřijatelnou variantou. Pro eliminaci vyšších harmonických a kompenzaci jalového výkonu v DS je nutné u této koncepce použít FKZ. V důsledku napájení sousedních úseků trakčního vedení z odlišných fází DS je nutná přítomnost neutrálních polí s možností propojení úseků spínací stanicí v případě výpadku napájení sousední TNS. V konvenční TNS jsou umístěny dva jednofázové transformátory 110/27 kV, z nichž jeden slouží jako záložní zdroj pro napájení TS 25 kV 50 Hz, čímž je možné při výpadku jednoho transformátoru stále zajišťovat dodávku do TS. V porovnání s konstrukcí ostatních technologií trakčních napaječů je tento koncept napájení velmi jednoduchý, a tedy velmi spolehlivý. Rekuperace je však zakázána z důvodu možného navyšování nesymetrie napětí v DS. V případě zapojení transformátoru do „V“ jsou vlastnosti trakčního napaječe stejné jako u zapojení do „T“ ale nesymetrie napětí v DS je částečně redukována [4][9].

Další uvedenou technologií trakčního napaječe je použití aktivního balancéru, realizovaného prostřednictvím SVC, který je paralelně připojen k jednofázovému transformátoru 110/27 kV. V důsledku aktivně spínaných tlumivek je zatížení jednofázové TS téměř rovnoměrně rozloženo do všech fází DS, čímž je dosaženo větší symetrie v DS v porovnání s technologií jednofázového transformátoru zapojeného do „V“. Tato technologie způsobuje emise vyšších harmonických složek v DS v důsledku spínání tyristorů SVC, a tak je pro redukci těchto zařízení použito FKZ. Také zde jsou přítomna neutrální pole mezi jednotlivými úseky trakčního vedení. V případě poruchy SVC je možné stále zajišťovat dodávku elektrické energie do TS, ovšem bez možnosti redukce nesymetrie napětí. V důsledku přidaného zařízení k jednofázovému transformátoru je konstrukce TNS rozsáhlejší, což snižuje spolehlivost v porovnání s přechodící technologií. Rekuperace energie do DS je u tohoto systému napájení povolena [4][15].

Třetí uvedenou technologií napájení trakční soustavy 25 kV 50 Hz je použití čtyřkvadrantového měniče se stejnosměrným meziobvodem, označovaného také jako SFC. V porovnání s jednofázovým transformátorem a TNS s aktivním balancérem má tento způsob napájení velmi pozitivní vliv na symetrii v DS díky třífázovému připojení do DS. V důsledku použitého aktivního usměrňovače a způsobu řízení jsou redukovány emise vyšších harmonických složek proudu v DS a odebíraný proud má kvazisinusový průběh. Je možné také měnit účinník na první harmonické, čímž v porovnání s předchozími technologiemi odpadá nutnost FKZ pro kompenzaci jalového výkonu a eliminaci vyšších harmonických složek. Vzhledem k synchronizovanému úhlu napětí mezi jednotlivými úseky trakčního vedení je možné také eliminovat neutrální pole mezi sousedními úseky trakčního vedení. Pokud však dojde k poruše na čtyřkvadrantovém měniči, je možné zajistit dodávku energie pomocí záložního transformátoru. V důsledku složitosti konstrukce čtyřkvadrantového měniče s ohledem na množství komponent je SFC méně spolehlivé v porovnání s jednofázovými transformátory a aktivními balancéry. Benefitem této technologie napájení je možnost rekuperace energie do DS bez výrazného ovlivnění napěťové nesymetrie. Pro čtyřkvadrantový měnič s prokládaným spínáním platí téměř stejné vlastnosti jako u jednoduchého SFC. Hlavní rozdíl je zde v použití vícehladinového usměrňovače, stejnosměrného meziobvodu a střídače, čímž je na vstupu usměrňovače modulované napětí ve více hladinách, což má za následek schodovitý tvar průběhu napětí a průběh odebíraného proudu tak více respektuje sinusový tvar v porovnání s jednoduchým čtyřkvadrantovým měničem [4][10].

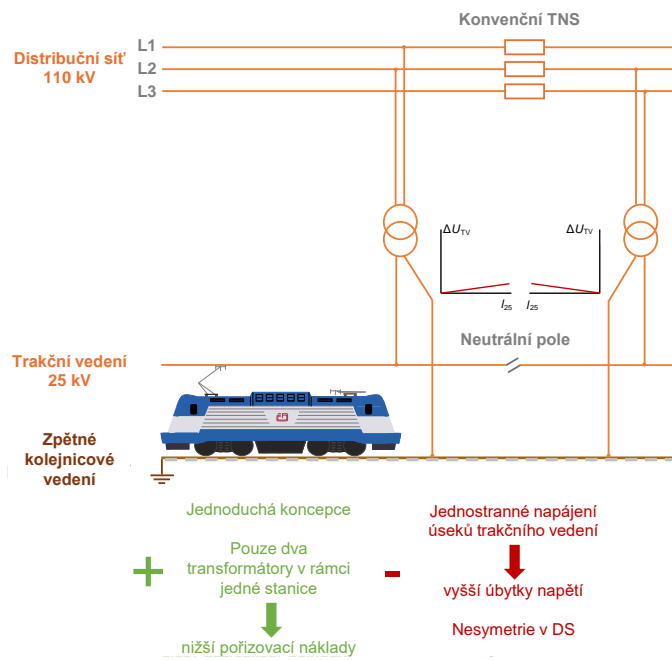
Poslední technologií je přímý měnič, jehož princip a vlastnosti jsou krátce uvedeny v kap. 2.5. Vlastnosti této technologie jsou podobné s vlastnostmi technologie SFC. Na vstupu měniče je umístěn třífázový transformátor, připojený do DS a je tak zajištěn symetrický odběr z DS. Vzhledem k obsahu meziharmonických složek v cirkulačních proudech jednotlivých větví měniče je zapotřebí FKZ pro eliminaci těchto složek proudu. V důsledku zajištění synchronní TS není zapotřebí neutrálních polí mezi jednotlivými úseky vedení. V případě poruchy na přímém měniči je TNS odpojena od DS a není zajištěna záloha napájení pro TS. Byť zde figuruje absence stejnosměrného meziobvodu, je konstrukce měniče relativně složitá s ohledem na počet SM v jednotlivých větvích měniče, čímž je dosaženo horší spolehlivosti. Rekuperace energie je zde opět možná. V tabulce 1 je uvedeno porovnání jednotlivých technologií trakčních napáječů se shrnutými vlastnostmi [4][30].

Tabulka 1 Porovnání technologií trakčních napaječů, vychází z [4].

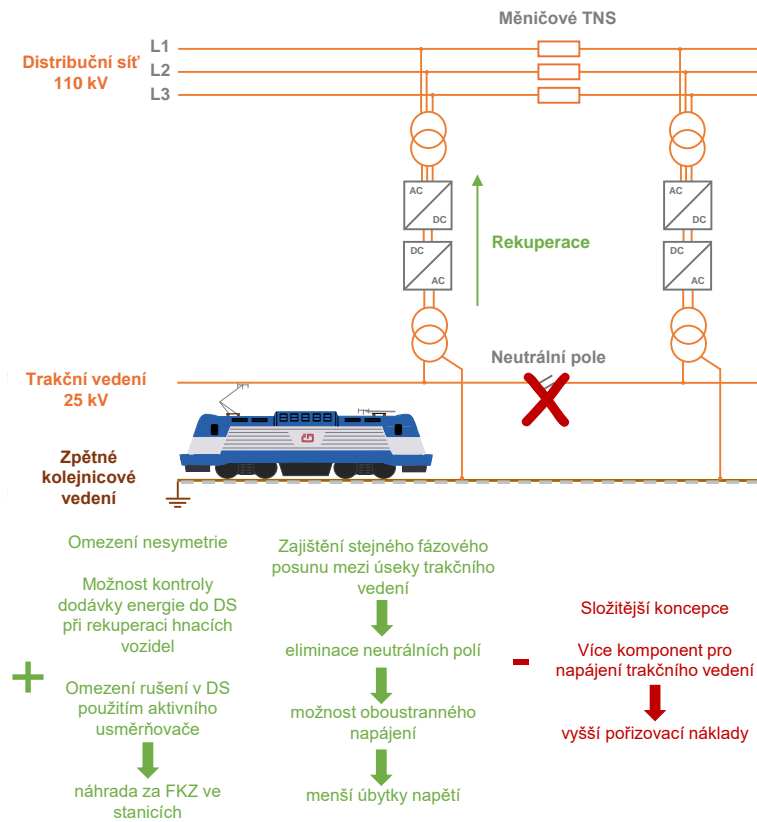
Napaječ	Symetrie v DS	Nutnost FKZ	Neutrální pole	Provoz při poruše	Spolehlivost dle konstrukce	Rekuperace
TRF do „T“	--	ANO	ANO	Záloha	++	Omezena
TRF do „V“	-	ANO	ANO	Záloha	++	Omezena
TRF+SVC	+	ANO pro v.h.	ANO	TRF -záloha, měniče -ANO	+	ANO
TRF+STATCOM	+	NE	ANO	TRF -záloha, měniče -ANO	+	ANO
SFC	++	NE	NE	Záloha	-	ANO
Přímý měnič	++	ANO pro v.h.	NE	NE	-	ANO

Legenda:	Symetrie v DS	Spolehlivost
--	Výrazná nesymetrie	Velice nízká úroveň spolehlivosti (Velmi komplexní struktura TNS)
-	Nesymetrie	Nízká úroveň spolehlivosti (Komplexní struktura TNS)
+	Symetrie v případě malých rozdílů odběrů při nesoudobosti	Vyšší úroveň spolehlivosti (Jednodušší struktura TNS)
++	Symetrie zaručena vždy	Velice vysoká úroveň spolehlivosti (Velmi jednoduchá struktura TNS)
Záloha	Záložní transformátor	
v.h.	Vyšší harmonické	

Z uvedených vlastností jednotlivých technologií trakčních napaječů vyplývá, že měničové TNS disponují řadou výhod v porovnání s konvenčním systémem napájení. Jsou jimi především omezení nesymetrie v DS, možnost do jisté míry kontrolovat dodávku energie do DS při rekuperaci hnacích vozidel, omezení rušení v DS a synchronizace napětí sousedních úseků trakčního vedení. Jedná se však o složitější koncepci, což vede k vyšším pořizovacím nákladům. Stěžejní výhody a nevýhody konvenčních TNS a měničových TNS jsou také graficky vyjádřeny na obrázku 21 a 22.



Obrázek 21 Výhody/nevýhody konvenční TNS, překresleno z [31].



Obrázek 22 Výhody/nevýhody měničové TNS, překresleno z [31].

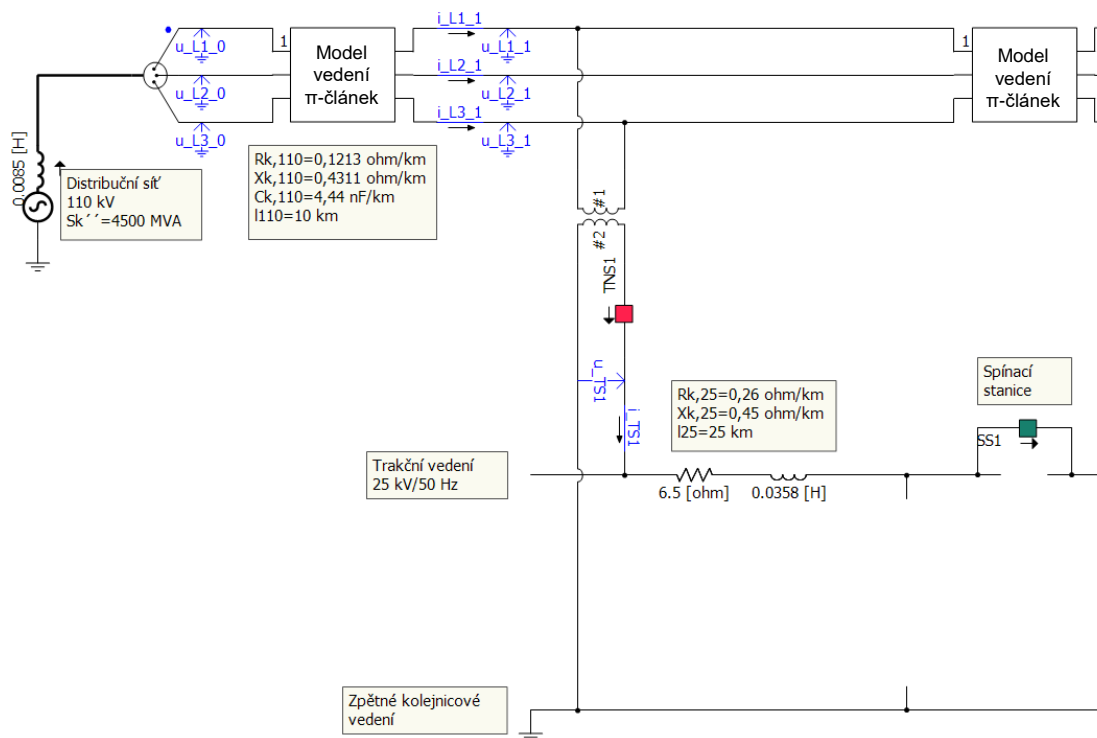
4. MODELOVÁNÍ TRAKČNÍCH NAPAJEČŮ

Modely trakčních napaječů jsou vytvořeny na základě teorie napájení TS 25 kV 50 Hz a na základě jednotlivých technologií, uvedených v předchozích kapitolách. Topologie daných modelů trakčních napaječů je do jisté míry zjednodušená za účelem vytvoření obecného modelu pro danou technologii trakčního napaječe, který je v souladu s chováním reálného trakčního napaječe příslušné technologie. V důsledku toho je možné simulovat prostřednictvím zjednodušeného modelu trakčního napaječe realistické scénáře, běžné v reálném provozu TS 25 kV 50 Hz se zřetelem na hodnocení kvality napětí a zpětných vlivů na DS. Pro hodnocení relevantních ukazatelů kvality napětí DS v místě připojení daného trakčního napaječe jsou vybrány takové technologie trakčních napaječů, u nichž je v důsledku zcela odlišné topologie a chování při provozu TS 25 kV 50 Hz predikován výrazný kontrast v hodnocených parametrech kvality napětí v DS a také způsob provozu TS 25 kV 50 Hz. Na základě této úvahy jsou vytvořeny modely jednofázového transformátoru 110/27 kV v zapojení do „T“ a do „V“ představující systém konvenčního způsobu napájení a čtyřkvadrantový měnič se stejnosměrným meziobvodem v zastoupení aktivních trakčních napaječů. Jednotlivé modely trakčních napaječů jsou detailněji popsány v následujících kapitolách.

4.1 Model jednofázového transformátoru 110/27 kV

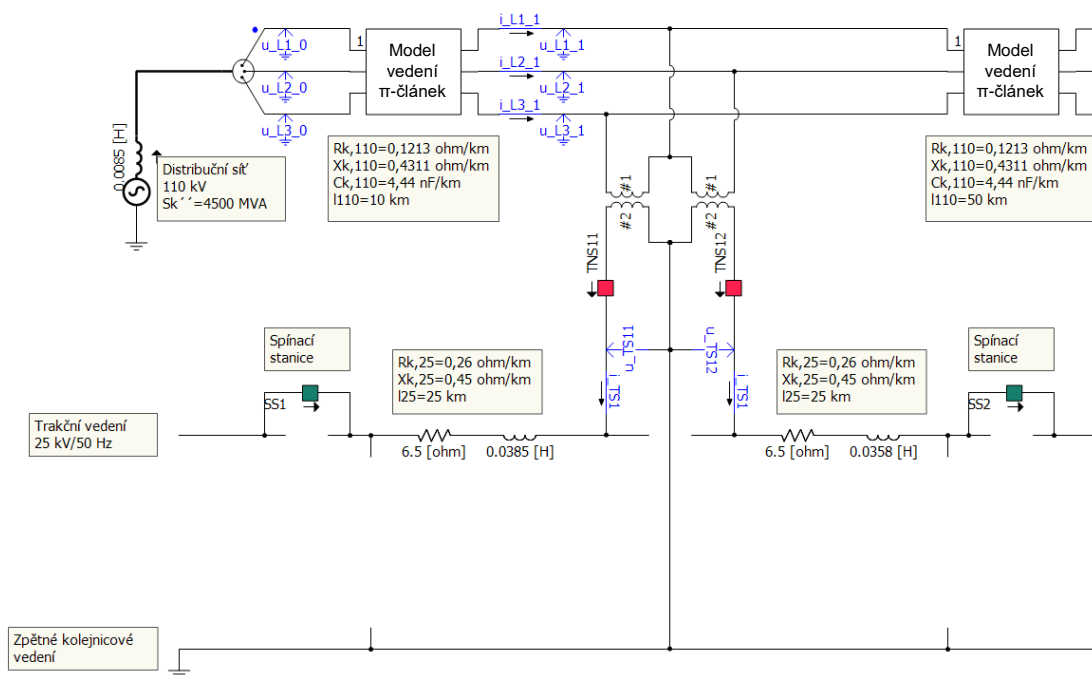
Model jednofázového transformátoru 110/27 kV je tvořen komponentou z knihovny programu PSCAD jakožto jednofázový dvouvinutový transformátor. Vzhledem k simulaci vlivu provozu TS 25 kV 50 Hz na DS je při simulaci kladen důraz na přenos rušení z TS do DS a vliv nesymetrie napětí v DS. V důsledku toho je pro simulaci postačující ideální model transformátoru bez nutné analýzy sycení jádra transformátoru. Model transformátoru je parametrizován dle běžných trakčních transformátorů dle [11] s jmenovitým převodem 110/27 kV a jmenovitým výkonem 12,5 MVA. Pro účely porovnání parametrů kvality napětí v DS z hlediska zapojení transformátorů v konvenčních TNS jsou vytvořeny dva modely trakčních transformátorů v zapojení do „T“ a do „V“.

Model transformátoru v zapojení do „T“ (viz. obrázek 23) je tvořen jedním jednofázovým transformátorem přímo spojující DS 110 kV a TS 25 kV 50 Hz. Primární vinutí transformátoru je připojeno do DS mezi fázové vodiče L1 a L3, opatřené měřením fázových napětí a proudů na vstupu trakčního transformátoru. Sekundární vinutí je připojeno jedním pólem přes vypínač k trakčnímu vedení 25 kV 50 Hz a druhým pólem ke zpětnému kolejnicovému vedení, které je účinně uzemněno. Výstup transformátoru je opět opatřen měřením napětí a proudu.



Obrázek 23 Model jednofázového transformátoru 110/27 kV v zapojení do „T“.

Model transformátoru v zapojení do „V“ (viz. obrázek 24) je vytvořen spojením dvou jednofázových transformátorů, přičemž do DS je tento celek připojen na fázi L3 jedním pólem prvního transformátoru, na fázi L2 jedním pólem druhého transformátoru a na fázi L1 spojením zbývajících pólů obou transformátorů. Přívody TNS jsou opatřeny měření fázových napětí a proudů. Sekundární strany transformátorů jsou propojeny jedním společným pólem ke zpětnému kolejnicovému vedení a zbývající pól každého transformátoru je připojen k příslušnému úseku trakčního vedení, které jsou odděleny neutrálním polem. Každý přívod k trakčnímu vedení je oddělen vypínačem a opatřen měření napětí a proudu.



Obrázek 24 Model jednofázového transformátoru 110/27 kV v zapojení do „V“.

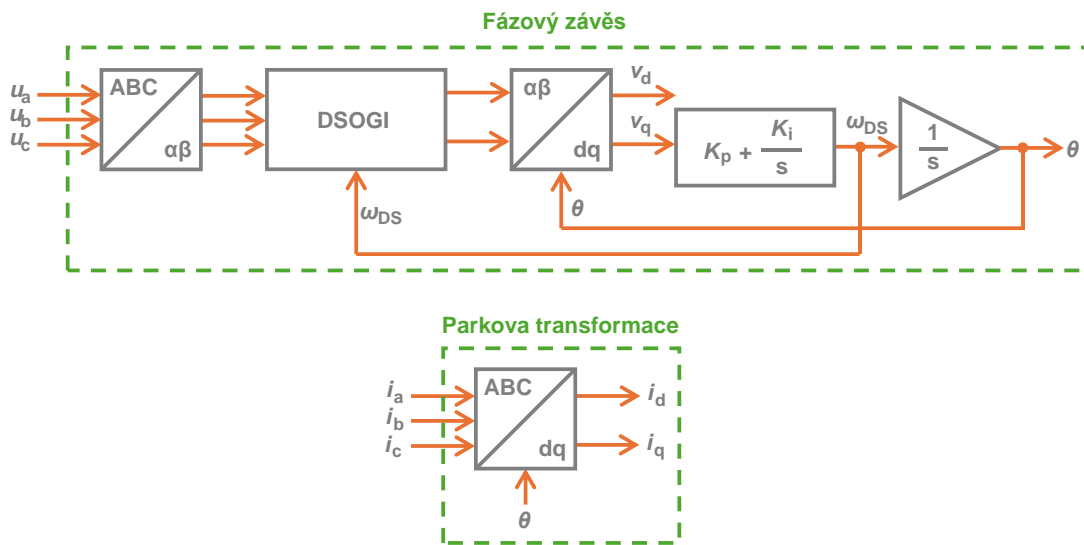
4.2 Model čtyřkvadrantového měniče se stejnosměrným meziobvodem (SFC)

Tento model je vytvořen kombinací aktivního třífázového dvouhladinového usměrňovače, stejnosměrného meziobvodu a aktivního jednofázového střídače.

Připojení do DS 110 kV je provedeno prostřednictvím třífázového dvouvinutového transformátoru s jmenovitým převodem 110/3,3 kV v zapojení Yn/d a jmenovitým výkonem 16 MVA. Pro simulace zpětných vlivů daného měniče na DS je opět zanedbán vliv sycení jádra transformátoru, a tak je transformátor modelován jako ideální. Parametry transformátoru a způsob zapojení vinutí jsou voleny s ohledem na napěťovou hladinu DS, zavedený jednotný způsob uzemnění transformátorů v DS a požadované vstupní napětí na straně aktivního usměrňovače. Sekundární vinutí transformátoru tvoří sériový RL filtr pro vytvoření charakteristického kvazisinusového průběhu odebíraného proudu z DS.

Třífázový usměrňovač sestává ze skupiny šesti IGBT tranzistorů se zpětnými diodami, na jehož výstup je připojen velkokapacitní kondenzátor tvořící stejnosměrný meziobvod s hodnotou 10 mF pro zajištění dostatečně vyhlazeného napětí a setrvačnosti při dynamickém profilu zatížení TS 25 kV 50 Hz. Řídicí struktura aktivního usměrňovače je konstruována dle [21] prostřednictvím vnější napěťové regulační smyčky a vnitřních proudových regulačních smyček. Vstupními hodnotami do regulačních smyček jsou

měřené hodnoty fázového napětí u_a , u_b a u_c a proudu i_a , i_b a i_c na sekundární straně transformátoru a napětí stejnosměrného meziobvodu U_{DC} v poměrných jednotkách. Řídicí struktura je založena na regulaci napětí a proudu v dq souřadnicích, které jsou synchronizovány s úhlovým kmitočtem DS 110 kV ω_{DS} . Za tímto účelem je do řídicí struktury implementován fázový závěs s technologií DSOGI (viz. obrázek 25), jejímž pozitivem je generování synchronizované fáze θ DS 110 kV s eliminací vlivu harmonického zkreslení v DS. Algoritmus pro fázový závěs je rovněž zdrojem sekundárního napětí transformátoru v dq-souřadnicích, které vstupují do řídicí struktury aktivního usměrňovače. Proudů sekundárního vinutí transformátoru v dq-souřadnicích jsou vypočítány Parkovou transformací.

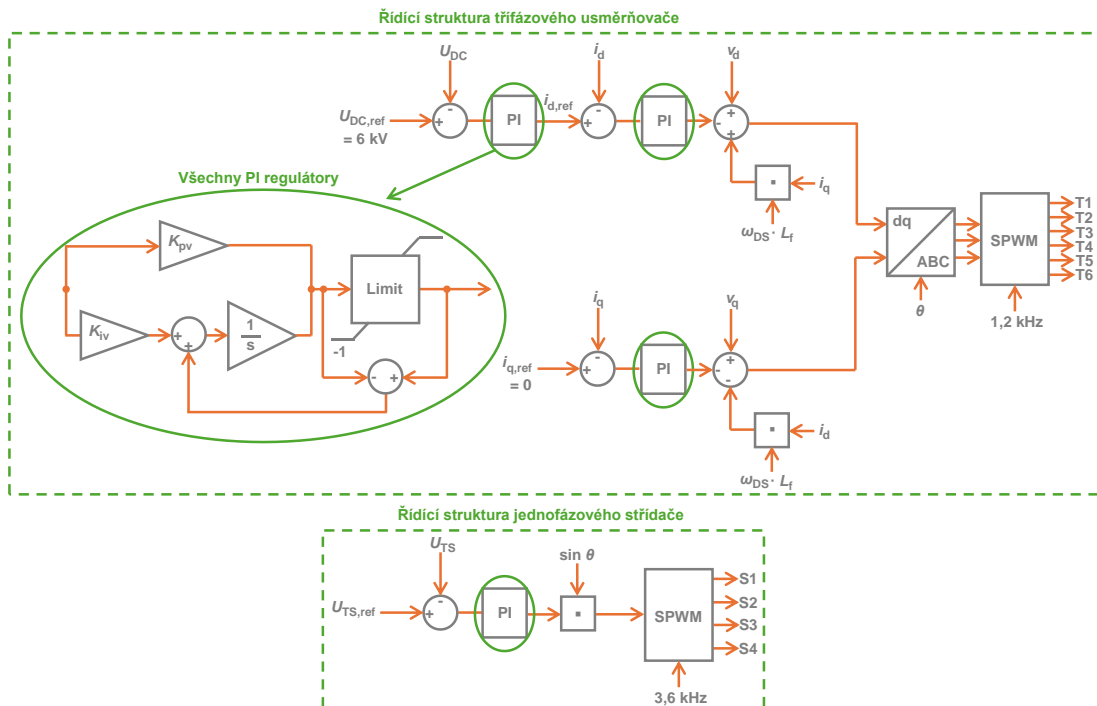


Obrázek 25 Fázový závěs a Parkova transformace pro proud sekundárního vinutí transformátoru.

Vnější napěťová regulační smyčka je tvořena PI regulátorem, do nějž vstupuje žádaná hodnota napětí stejnosměrného meziobvodu, nastavená na 6 kV, a měřená hodnota napětí na kondenzátoru stejnosměrného meziobvodu. Všechny PI regulátory v řídicí struktuře jsou definovány proporcionálním zesílením, integračním zesílením a časovou konstantou samostatně implementovaného integrátoru PI regulátoru. Výstup regulátoru je opatřen zpětnou vazbou anti-windup pro rychlejší vyregulování odchylky při překmitu žádané hodnoty. Hodnota vystupující z PI regulátoru pro napětí stejnosměrného meziobvodu je žádanou hodnotou proudu v d-souřadnici, vstupující do PI regulátoru proudu sekundárního vinutí transformátoru společně s hodnotou proudu v d-souřadnici generovanou Parkovou transformací. Druhá vnitřní proudová smyčka přísluší q-souřadnici proudu sekundárního vinutí transformátoru, kde je žádaná hodnota proudu nastavena na nulovou hodnotu, čímž nedochází ke změně fázového posunu proudu v DS. Výstup z obou proudových regulačních smyček je zaveden do výpočtu napětí na vstupním sériovém RL filtru aktivního usměrňovače a transformací výstupních signálů

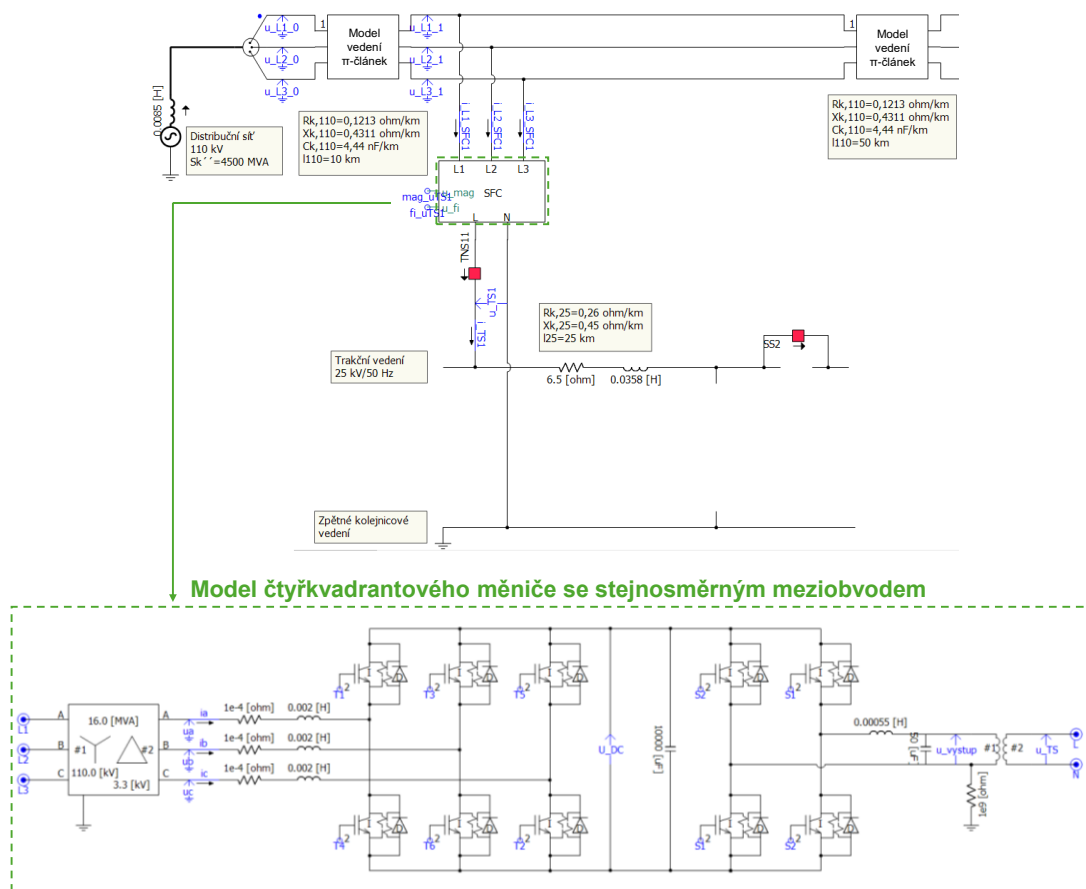
prostřednictvím Parkovy transformace jsou generovány modulační napěťové vlny, vstupující do SPWM se spínací frekvencí 1,2 kHz.

Jednofázový střídač je tvořen čtyřmi IGBT tranzistory se zpětnými diodami, na jehož výstupu je přes LC filtr připojen jednofázový transformátor s parametry napětí, odvíjející se od napětí stejnosměrného meziobvodu. Jednofázový transformátor s jmenovitým převodem 4,3/27 kV a jmenovitým výkonem 16 MVA je na straně primárního vinutí neúčinně uzemněn přes velkou impedanci, a tak celý model měniče je izolován od potenciálu země pro zamezení vzniku nežádoucích vazeb s DS a TS přes potenciál země do oblasti měniče. Řídící struktura jednofázového střídače je tvořena pouze regulátorem napětí prostřednictvím PI regulátoru s regulací na žádanou hodnotu napětí TS 25 kV 50 Hz. Řízení střídače je synchronizováno s řízením třífázového usměrňovače pomocí generované fáze z fázového závěsu a výstup z napěťového regulátoru střídače tvoří modulační napěťovou vlnu pro SPWM se spínací frekvencí 3,6 kHz. Celá řídicí struktura je na obrázku 26.



Obrázek 26 Řídící struktura SFC měniče.

Vytvořený model měniče je vložen do bloku s názvem SFC s možností připojení DS 110 kV na stranu vstupu bloku a TS 25 kV 50 Hz na výstupní stranu bloku (viz. obrázek 27). Do bloku SFC jsou kromě svorek pro DS a TS zavedeny také dva přívody, v důsledku kterých lze modelu SFC poskytnout informaci o žádané efektivní hodnotě napětí a úhlu napětí TS 25 kV 50 Hz, čímž je možné měnit parametry napájení TS s ohledem na okolnosti provozu TS 25 kV 50 Hz, např. synchronizaci napětí sousedících úseků trakčního vedení.



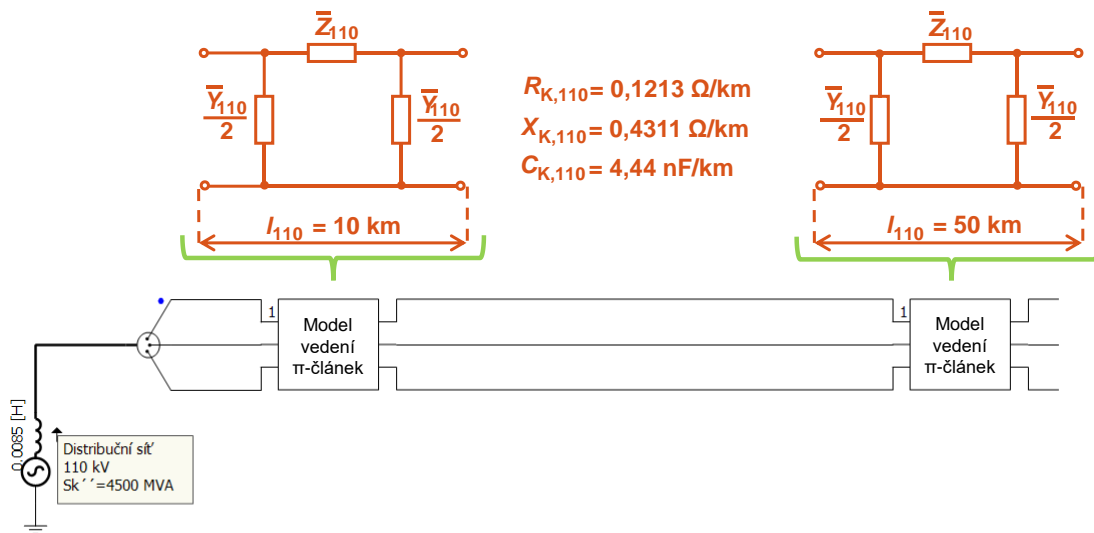
Obrázek 27 Model čtyřkvadrantového měniče se stejnosměrným meziobvodem.

4.3 Model realistické testovací DS 110 kV

DS je vytvořena prostřednictvím modelu realistické testovací DS 110 kV s implementovaným vedením, které je modelováno pomocí souměrného π -článek se soustředěnými parametry (viz. obrázek 28), vztaženými na 1 km délky vedení s možností volby délky vedení. Jsou zvoleny parametry reprezentující jednoduché vedení o napěťové hladině 110 kV s poměrem R_{110}/X_{110} cca 1/3 a provozní kapacitou vedení 4,44 nF/km. Celý model DS je napájen ideálním napěťovým zdrojem s vnitřní indukčností zapojenou do série, jejíž velikost je zvolena s ohledem na hodnoty zkratového výkonu DS 110 kV pohybující se v rozmezí cca 3000 až 4000 MVA. Pro simulované scénáře je uvažována tvrdší síť z důvodu dosažení nižších fluktuací napětí v síti vlivem dynamického profilu zatížení TS a redukci oscilací, a tak je zvolena velikost indukčnosti 8,5 mH, což odpovídá zkratovému výkonu 4500 MVA. Model testovací DS je univerzální pro všechny vytvořené modely trakčních napaječů. Pro možnost připojení více TNS do modelu DS je nutné model DS přizpůsobit počtu připojených TNS. Jednotlivé parametry modelu DS jsou shrnuty v tabulce 2.

Tabulka 2 Parametry modelu testovací DS.

Napěťový zdroj			Vedení				
$U_{n,110}$ (kV)	f_n (Hz)	S_k'' (MVA)	Model	$U_{n,110}$ (kV)	$R_{k,110}$ (Ω /km)	$X_{k,110}$ (Ω /km)	$C_{k,110}$ (nF/km)
110	50	4500	π -čl.	110	0,1213	0,4311	4,44



Obrázek 28 Model realistické testovací DS 110 kV.

4.4 Model realistické testovací TS 25 kV 50 Hz

TS 25 kV 50 Hz je tvořena prostřednictvím podélné impedance trakčního vedení s rezistancí na 1 km délky vedení $R_{k,25} = 0,26 \Omega/\text{km}$ a reaktancí na 1 km délky vedení $X_{k,25} = 0,45 \Omega/\text{km}$, přičemž dané hodnoty odpovídají běžně používanému trolejovému drátu o průřezu Cu 100 mm² s nosným lanem o průřezu Bz 50 mm² pro TS 25 kV 50 Hz. Délka trakčního vedení a rozdělení na jednotlivé úseky odpovídá konkrétnímu připojení trakčního transformátoru k TS. V případě zapojení trakčního transformátoru do „T“ je neutrální pole či spínací stanice uvažována v polovině vzdálenosti mezi sousedícími TNS. Pokud je použit model transformátoru v zapojení do „V“, je neutrální pole v oblasti TNS a spínací stanice v polovině vzdálenosti mezi TNS.

5. ANALÝZA ZPĚTNÉHO VLIVU NA NAPĚTÍ V DS 110 kV

V této kapitole je provedena analýza zpětných vlivů trakčních napaječů na napětí v místě připojení, kde hodnocení vychází z posuzování připojitelnosti dle PNE 33 3430-0 [2] s ohledem na realistický provoz TS 25 kV 50 Hz. Za tímto účelem jsou pro simulaci provozu použita realistická data zatížení, nasimulovaná na základě předpokládaného grafikonu vlakové dopravy, která jsou implementována do modelu Loko 3 pro simulaci zpětných vlivů jednotlivých modelů trakčních napaječů na DS 110 kV. Z důvodu velkého množství průběhů a grafů ze simulačního prostředí PSCAD jsou veškeré výsledky analýzy kvality napětí vloženy do příloh s označením jednotlivých parametrů kvality napětí, uvedených v kap 1. Každá příloha je označena pod názvem daného parametru kvality napětí a za účelem porovnání výsledných analýz mezi jednotlivými modely trakčních napaječů jsou přílohy rozděleny do podkapitol pro jednotlivé napaječe.

Zkoumanými parametry kvality napětí jsou tedy rychlé změny napětí, flickr, harmonické zkreslení napětí a nesymetrie napětí. Analýza těchto parametrů je provedena nejen za účelem porovnání zpětných vlivů na DS od jednotlivých trakčních napaječů, ale také pro posouzení připojitelnosti do DS 110 kV v souladu s aktuálně platnou normou PNE 33 3430-0 [2]. Na základě této normy jsou vyhodnocovány emisní limity proudů, které se odvíjí dle konkrétní topologie sítě a technologie trakčních napaječů. V důsledku neznalosti topologie DS je vytvořen obecný model DS 110 kV se soustředěnými parametry vedení o určité délce (viz. kap. 4). Vytvořené modely trakčních napaječů jsou tedy pouhým příkladem pro hodnocení připojitelnosti do DS, a proto jsou v této kapitole ukázány analýzy zpětného vlivu na napětí bez určení individuálních emisních limitů proudů. Prostřednictvím vytvořených modelů trakčních napaječů je však dosaženo nejdetailejšího stupně hodnocení připojitelnosti do DS dle normy PNE 33 3430-0 [2]. Z hlediska posuzování zpětných vlivů na napětí jsou z této normy přebírány doporučené plánovací úrovně jednotlivých parametrů kvality napětí, které jsou při analýze zpětných vlivů na napětí zohledněny a porovnány s výslednými parametry kvality napětí ze simulace provozu v programu PSCAD.

Pro simulaci provozu TS 25 kV 50 Hz jsou použita realistická data dle grafikonu provozu, která jsou do modelu Loko 3 implementována v podobě mechanického výkonu. Pro všechny tři modely trakčních napaječů jsou použita stejná data zatížení TS 25 kV 50 Hz a profil mechanického výkonu modelu Loko 3 je tak pro každý napaječ stejný. Napěťový zdroj modelu DS 110 kV je parametrizován zkratovým výkonem 4500 MVA, nominální sdruženou hodnotou napětí 110 kV a fixní hodnotou frekvence 50 Hz. Zkratový výkon 4500 MVA je zvolen s ohledem na požadavek větší tvrdosti DS 110 kV. Vedení je tvořeno modelem π -článku s parametry vedení na 1 km délky: $R_{k,110} = 0,1213 \Omega/\text{km}$, $X_{k,110} = 0,4311 \Omega/\text{km}$ a $C_{k,110} = 4,44 \text{ nF}/\text{km}$. V případě modelu

jednofázového transformátoru 110/27 kV v zapojení do „T“ je model napaječe připojen do DS 110 kV na konci vedení DS o délce 30 km na fázi L1 a L3. Model Loko 3 je umístěn v TS 25 kV 50 Hz ve vzdálenosti 10 km od trakčního napaječe. Model Loko 3 reprezentuje ekvivalentní model lokomotivy, zahrnující hnací vozidla s maximálním mechanickým výkonem 10 MW a hodnotou mechanického výkonu pro rekuperaci 5 MW. V případě modelu jednofázového transformátoru 110/27 kV v zapojení do „V“ je použit model DS 110 kV se stejnými parametry napěťového zdroje a vedení. Připojení modelu trakčního napaječe do DS je prostřednictvím dvou jednofázových transformátorů na všechny fáze v pořadí L3, L1 a L2. Pro zajištění odběru ze všech fází DS jsou použity do TS 25 kV 50 Hz dva modely Loko 3, jejichž profil mechanického výkonu je rozdílný, čímž je brán zřetel na nesoudobost odběrů ze sousedících úseků trakčního vedení. Model SFC měniče je rovněž připojen do stejného modelu DS 110 kV pro snadnou porovnatelnost s ostatními modely trakčních napaječů. Schémata zapojení jednotlivých modelů trakčních napaječů do DS s profilem mechanického výkonu jsou uvedeny v příloze (viz. Příloha A - Schémata připojení modelů trakčních napaječů).

V případě analýzy rychlých změn napětí (RVC) v DS je dle normy ČSN EN 61000-4-30 [7] hodnocena procentní změna napětí Δu (na základě 1/2 periodových efektivních hodnot) od tzv. klouzavého průměru U_{din} , který se odvíjí od měřené efektivní hodnoty napětí v každé fázi po dobu simulace. Zároveň dle této normy jsou měřeny doby trvání každé naměřené změny napětí Δu pro každou fázi a doby přestávky mezi jednotlivými událostmi. Událost RVC je detekována, jakmile je efektivní hodnota napětí dané fáze pod/nad limitem, který je určen dle normy hodnotou 1,5 % hodnoty U_{din} . Posouzení připojitelnosti z hlediska rychlých změn napětí se odvíjí od příslušné fáze, ve které je detekována nejvyšší hodnota poklesu napětí během doby simulace a pro tuto fázi se dále hodnotí povolená četnost změn napětí a doba přestávky pro danou změnu. Dle normy PNE 33 3430-0 [2] není stanovena konkrétní plánovací úroveň pro změnu napětí Δu , ale je zde určen limit pro hladinu vvn $\Delta u = 2 \%$ a pokud je změna napětí rovna této hodnotě, je dovolená četnost změn napětí 9krát za 2 hodiny. Pokud je v dané fázi změna napětí Δu menší, je dle normy [2] vypočtena hodnota četnosti pro danou změnu napětí a také doba přestávky mezi jednotlivými událostmi. Jelikož u žádného typu trakčního napaječe není detekována událost RVC není pro tento parametr kvality provedena podrobnější analýza. Pro ukázkou průběhů efektivní hodnoty napětí (modrá křivka) včetně hodnoty U_{din} (fialová křivka) a jejich limitů $\pm 1,5 \%$ U_{din} (oranžová a žlutá křivka) pro detekci události RVC v místě připojení jednotlivých napaječů je zvolena fáze 1. Efektivní hodnota napětí se dynamicky mění po celou dobu simulace v závislosti na aktuálním odběru (viz. obrázky 51, 53 a 55). Detekce RVC způsobena odběrem činného výkonu není ani předpokládána na napěťové hladině vvn z důvodu poměru rezistance ku reaktanci vedení R_{110}/X_{110} , který bývá v rozmezí 1/5 až 1/10. Dále je také hodnocen flikr prostřednictvím krátkodobé míry vjemu blikání Pst , který je stanoven pro časový interval 10 minut. Průběh okamžité míry vjemu blikání pro fázi 1 je uveden v příloze (viz. Příloha B - Rychlé

změny napětí a flikru) na obrázku 52, 54 a 56 pro jednotlivé napaječe. Hodnota Pst je pro trakční transformátor v zapojení do „T“ rovna $8,8359 \cdot 10^{-6}$, pro transformátor v zapojení do „V“ $9,1127 \cdot 10^{-6}$ a měnič SFC $8,5287 \cdot 10^{-6}$, což v porovnání s plánovací úrovní pro hladinu vvn 0,7 dle normy PNE 33 3430-0 [2] jsou zanedbatelné hodnoty. Z hlediska hodnoty flikru a pozvolnější dynamiky průběhu efektivní hodnoty napětí v místě připojení je měnič SFC v porovnání s trakčními transformátory nejlepší variantou.

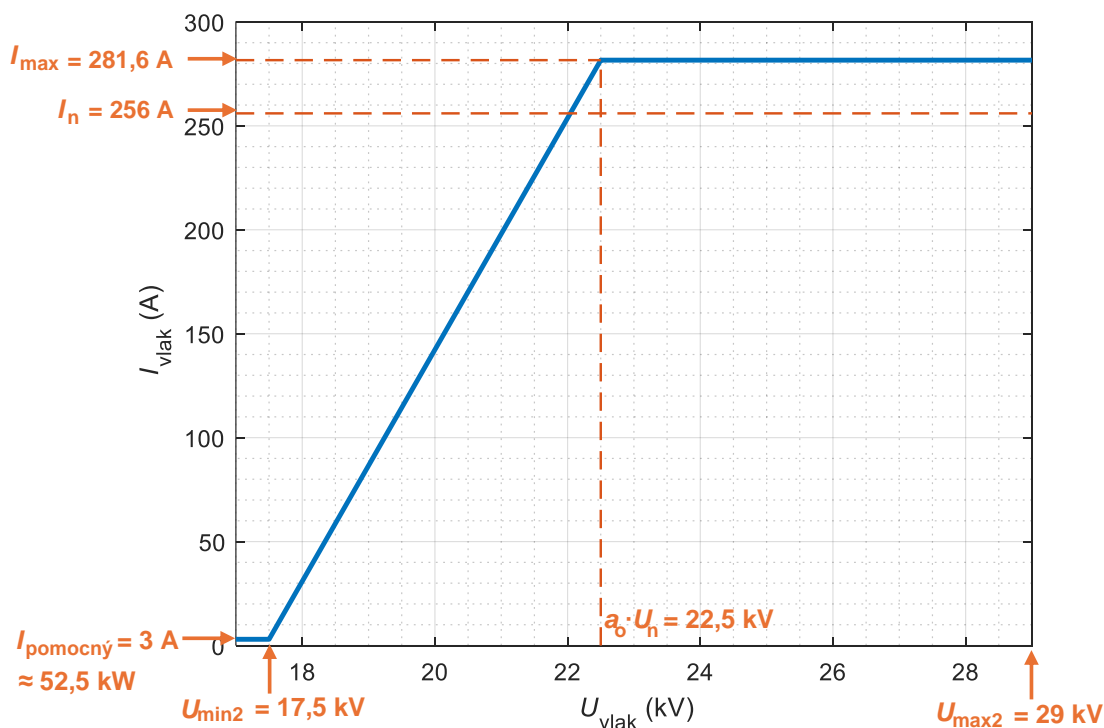
Dalším hodnoceným parametrem je harmonické zkreslení napětí pro jednotlivé napaječe (viz. Příloha C - Harmonické zkreslení napětí), kde jsou prostřednictvím harmonické analýzy hodnoceny jednotlivé procentní úrovně harmonických složek napětí, vztažené k nominální hodnotě fázového napětí sítě vvn u_h , a také činitel harmonického zkreslení THD_U . Harmonická analýza je hodnocena v časových intervalech 10 period po dobu simulace. Je tak pro každou fázi stanoveno 3000 hodnot procentních úrovní napětí pro jednotlivé složky u_h , které jsou zobrazeny modrou barvou v harmonickém spektru pro jednotlivé napaječe (viz. obrázek 58, 61 a 64). Pro ukázkou harmonické analýzy je opět zvolena fáze 1. Četnost hodnot jednotlivých úrovní u_h je vyjádřena změnou intenzity modré barvy ve spektru, přičemž úrovně s nejvyšší četností disponují nejvyšší intenzitou barvy. Dle normy PNE 33 3430-0 [2] jsou stanoveny plánovací úrovně pro hladinu vvn pro jednotlivé harmonické složky (limity zobrazené červenou barvou ve spektru). Dále je stanovena střední hodnota úrovně napětí v dané harmonické (zelená barva). V případě transformátoru v zapojení do „T“ (viz. obrázek 58) se střední hodnota úrovně napětí jednotlivých harmonických pohybuje většinou okolo hodnoty 0,01 %, což je ve většině případů výrazně pod danou plánovací úrovní. Dominantní harmonickou složkou je 16. harmonická se střední hodnotou cca 3 %, čímž je také překročena plánovací úroveň na dané harmonické 0,28 %. Tato vysoká úroveň u_h je předpokládána z důvodu spínací frekvence modelu Loko 3 s hodnotou 800 Hz, která je přes transformátor přenesena do DS. Pro činitel THD_U je stanovena dle [2] plánovací úroveň pro hladinu vvn na 3 %, která není dodržena, jak je patrné z histogramu pro THD_U (viz. obrázek 59). V případě transformátoru do „V“ je harmonické spektrum (viz. obrázek 61) obdobné ovšem s vyšší střední hodnotou u_h v rozmezí 0,01 až 0,02 %. Dominantní harmonickou složkou je opět 16. harmonická s hodnotou 6 % v důsledku zvýšeného odběru v místě připojení dvěma modely Loko 3. Hodnota činitele THD_U (viz. obrázek 62) dosahuje až 6,946 %, což je více jak dvojnásobek stanovené plánovací úrovně. V případě měniče SFC se střední hodnota u_h (viz. obrázek 64) pohybuje v rozmezí 0.001 % až 0.01 % na jednotlivých harmonických. Dominantní složkou je zde 22. harmonická s hodnotou cca 0,8 %, která jako jediná překračuje plánovací úroveň na dané harmonické 0,25 %. Tato hodnota může být způsobena spínací frekvencí aktivního usměrňovače SFC měniče s hodnotou 1200 Hz. Hodnota činitele THD_U (viz. obrázek 65) má dle rozložení četnosti nejvyšší četnost v rozmezí 0,725 % až 0,804 %, což je pod stanovenou plánovací úrovní 3 %. Z hlediska vlivu na harmonické zkreslení napětí se nejlepší variantou jeví měnič SFC jak z hlediska úrovní napětí na jednotlivých harmonických, tak z hlediska činitele THD_U .

Posledním hodnoceným parametrem kvality napětí je nesymetrie napětí v místě připojení trakčního napaječe (viz. Příloha D - Nesymetrie napětí). Ta je hodnocena činitelem nesymetrie napětí u_2 , který je měřen po dobu simulace. Dle normy PNE 33 3430-0 [2] je stanovena plánovací úroveň činitele u_2 pro hladinu vvn na 1,4 %. Ta není dodržena při maximálním zatížení v případě transformátoru v zapojení do „T“, což znázorňuje časový průběh činitele u_2 (viz. obrázek 66) s vyznačenou plánovací úrovní. V histogramu rozložení četnosti u_2 (viz. obrázek 67) je znázorněna nejvyšší četnost v rozmezí hodnot 0,848 % až 0,969 % a nejvyšší hodnota 1,454 %. Podle kumulativní funkce pravděpodobnosti (CDF – Cumulative Distribution Function) je 95 % hodnot činitele u_2 blíže hodnotě 1,333 %. V případě transformátoru v zapojení do „V“ není překročena plánovací úroveň ani při maximálním zatížení (viz. obrázek 68). Dle CDF je 95 % hodnot činitele u_2 pod hodnotou cca 1,3 %. Tím je potvrzen předpoklad větší symetričnosti odběru v porovnání s transformátorem v zapojení do „T“. V případě SFC měniče je dosaženo maximální hodnoty činitele u_2 0,117 % (viz. obrázek 71), z čehož vyplývá, že se jedná téměř o symetrický odběr v porovnání s předchozími napaječi a je tedy z hlediska vlivu na nesymetrii napětí nejlepší variantou.

6. FREKVENČNÍ PODPORA NAPÁJECÍ SÍTĚ POMOCÍ SFC

Tato implementovaná funkce modelu SFC měniče funguje na principu příčinně-následkového řetězce, v němž figurují tři veličiny: 1) změna frekvence v síti, 2) změna efektivní hodnoty napětí trakčního napaječe a 3) změna mechanického výkonu lokomotivy – důsledkem změny frekvence v síti je změna efektivní hodnoty napětí trakčního napaječe, která je příčinou změny mechanického výkonu lokomotivy.

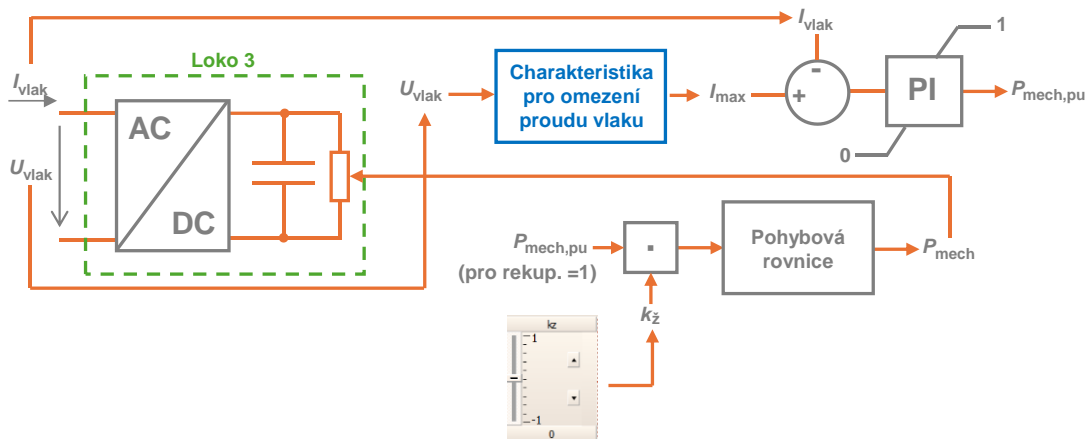
V celém procesu odezvy napětí SFC měniče na změnu frekvence v síti je nutné nejdříve vytvořit poslední článek řetězce, a tedy závislost změny mechanického výkonu lokomotivy na změně efektivní hodnoty napětí trakčního napaječe, čímž je způsobena změna odebíraného či dodávaného elektrického výkonu do TS 25 kV 50 Hz. Pro určení závislosti změny mechanického výkonu lokomotivy na změně efektivní hodnoty napětí trakčního napaječe je do modelu lokomotivy implementována charakteristika pro omezení proudu vlaku (viz. obrázek 29) dle normy ČSN EN 50388 [32]. Daná charakteristika popisuje závislost odebíraného proudu vlaku na efektivní hodnotě napětí v místě vlaku. Jedná se o lomenou funkci, určující omezení odebíraného proudu vlaku při poklesu napětí pod stanovenou hodnotu. Tímto omezením odebíraného proudu je dosaženo stagnace vzniklého poklesu napětí v místě vlaku. Jednotlivé parametry vyznačené v charakteristice pro omezení proudu vlaku jsou rovněž uvedeny v příslušné normě pro danou TS. Rozhodujícím parametrem v charakteristice pro omezení proudu vlaku je hodnota napětí v místě vlaku, při kterém dochází k omezování proudu vlaku. Tento parametr je v charakteristice označen součinem činitele udávající bod ohybu v charakteristice pro omezení proudu vlaku a_o (pro TS 25 kV 50 Hz je roven hodnotě 0,9) a nominální hodnoty napětí v místě vlaku U_n , tedy 25 kV. Od této hodnoty napětí 22,5 kV je charakteristika pro vyšší hodnoty napětí konstantní. Pro nižší hodnoty napětí je charakteristika lineární s klesajícím trendem až do hodnoty napětí 17,5 kV, při které již není vykonávána trakce. Pro testování odezvy napětí SFC měniče na změnu frekvence je použit model lokomotivy pod názvem Loko 3 z [33], který je zástupcem moderních hnacích vozidel, u nichž je právě automatické omezení proudu vlaku dle charakteristiky implementováno. Model lokomotivy disponuje nominálním mechanickým výkonem 6,4 MW, což odpovídá hodnotě nominálního proudu vlaku 256 A. Efektivní hodnota maximálního proudu vlaku je zvolena jako 1,1-násobek hodnoty nominálního proudu vlaku, tedy 281,6 A. Pro hodnotu napětí 17,5 kV je zvolena hodnota proudu, která odpovídá odebíranému výkonu při provozu pomocných pohonů lokomotivy, což při odebíraném výkonu 52,5 kW odpovídá proudu 3 A.



Obrázek 29 Charakteristika omezení proudu vlaku [32].

Právě hodnota odebíraného proudu lokomotivy je rozhodujícím faktorem pro aktuální odebíraný výkon lokomotivy. Model lokomotivy Loko 3 je vázán na pohybovou rovnici, do níž vstupuje kromě mechanických parametrů a konstant lokomotivy také žádané zrychlení vlaku. Tímto parametrem lze v průběhu simulace ovlivňovat pohyb vlaku, a tedy i mechanický výkon lokomotivy, který je výstupním parametrem z pohybové rovnice. Tento parametr je klíčový pro celkové ovlivnění jednak mechanického chování vlaku (např. snížení zrychlení v určitém okamžiku simulace má za následek větší dobu trvání k dosažení maximální rychlosti vlaku) ale také pro změnu odebíraného či dodávaného výkonu do TS 25 kV 50 Hz. Implementace charakteristiky pro omezení proudu vlaku do modelu lokomotivy Loko 3 (viz. obrázek 30) je provedena prostřednictvím externího textového souboru formou tabulky, která je v programu PSCAD načtena komponentou „X-Y Table“. Na vstupní straně modelu Loko 3 je měřena efektivní hodnota napětí a proudu. Měřená efektivní hodnota napětí je vstupem do charakteristiky pro omezení proudu a podle aktuální hodnoty napětí vystupuje z tabulky odpovídající hodnota maximálního proudu vlaku. Tato hodnota je zároveň žádanou hodnotou proudu, přivedenou do PI regulátoru proudu, do níž také vstupuje měřená efektivní hodnota proudu na vstupu modelu Loko 3. Tyto hodnoty jsou vztaženy na hodnotu maximálního proudu vlaku a vstupují do regulátoru v poměrných jednotkách, čímž je zjednodušen přístup k aktuální hodnotě mechanického výkonu, která je rovněž v poměrných jednotkách a tvoří výstup z PI regulátoru proudu. Pokud je tedy napětí na vstupu lokomotivy v rozmezí hodnot 22,5 až 29 kV, je odchylka pro regulátor kladná,

nedochází k omezování mechanického výkonu lokomotivy a hodnota mechanického výkonu lokomotivy je rovna 1. Pakliže dojde k poklesu hodnoty napětí v místě vlaku pod hodnotu 22,5 kV, je vytvořena záporná odchylka pro regulátor a mechanický výkon je omezen na určitou hodnotu. V případě rekuperace není nutné omezovat mechanický výkon při poklesu napětí v místě vlaku pod hodnotu 22,5 kV, a tak je výstup z regulátoru nastaven trvale na hodnotu 1. V součinu s žádanou hodnotou zrychlení vlaku v poměrných jednotkách tvoří výstup regulátoru výslednou hodnotu, vstupující do pohybové rovnice vlaku. Skutečný mechanický výkon vystupující z pohybové rovnice vlaku je přiveden do odporové zátěže modelu Loko 3, kde dle zákona zachování energie je použit zjednodušující předpoklad pro rovnost mechanického a elektrického výkonu.



Obrázek 30 Implementace charakteristiky omezení proudu vlaku do modelu Loko 3.

Pro testování charakteristiky pro omezení proudu vlaku je však problematické určit požadovanou hodnotu napětí trakčního napaječe pro dosažení žádaného napětí v místě vlaku. Skutečná hodnota napětí v místě vlaku je ve skutečnosti měřena pouze na hnacím vozidle, a není tak tato hodnota známá. Žádanou hodnotu napětí trakčního napaječe lze přibližně určit z hodnoty úbytku napětí na trakčním vedení mezi trakčním napaječem a hnacím vozidlem. Úbytek napětí na trakčním vedení ale není žádným způsobem měřen a v důsledku toho je k problematice přistoupeno prostřednictvím výpočtu úbytku napětí na trakčním vedení. Výpočet úbytku napětí je proveden ze znalosti přibližných parametrů trakčního vedení vztažených na 1 km délky vedení, vzdálenosti vlaku od trakčního napaječe a měřené hodnoty odebíraného proudu trakčního napaječe, přičemž vzdálenost vlaku od trakčního napaječe je možné přibližně určit z grafikonu vlakové dopravy. Fázor úbytku napětí trakčního vedení $\Delta \bar{U}_{TV}$ je tedy určen následující rovnicí

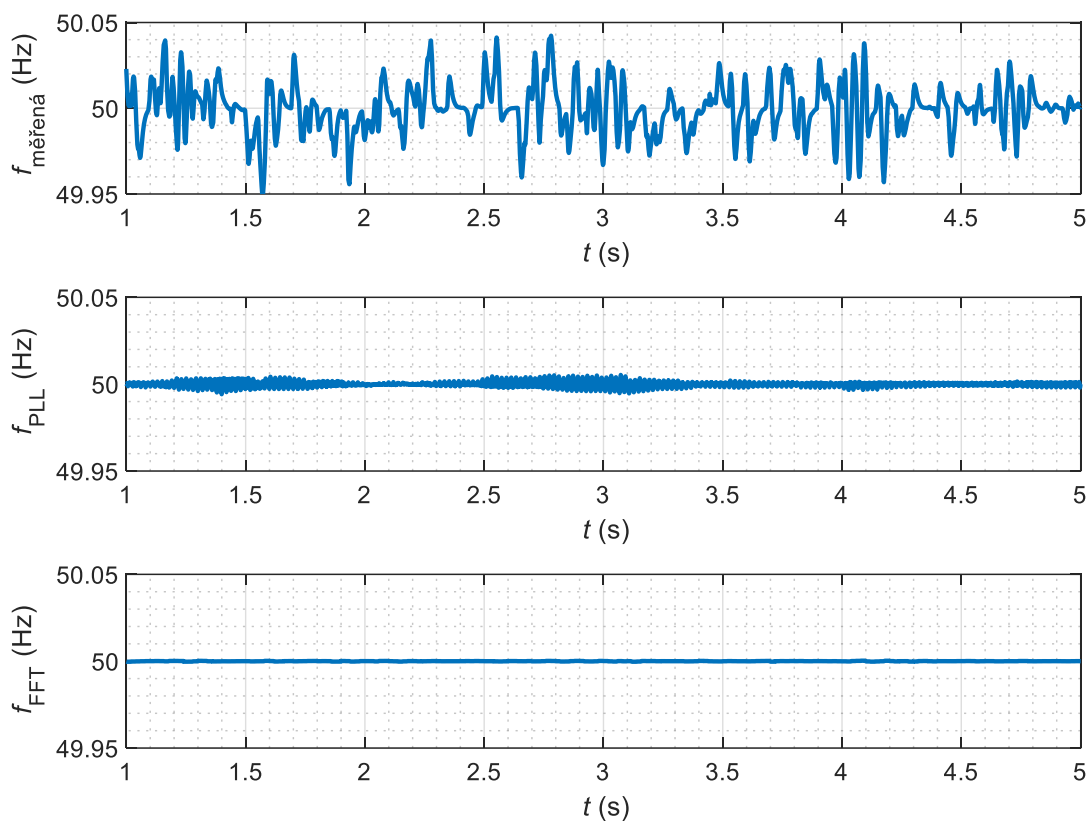
$$\Delta \bar{U}_{TV} = \bar{Z}_{k,25} \cdot I_{vlak} \cdot \bar{I}_{SFC} , \quad (10)$$

kde $\bar{Z}_{k,25}$ je fázor impedance trakčního vedení vztažené na 1 km délky vedení, I_{vlak} je vzdálenost vlaku od trakčního napaječe a \bar{I}_{SFC} je fázor efektivní hodnoty proudu trakčního

napaječe. Pro účely simulace jsou rezistance a reaktance trakčního vedení vztažené na 1 km délky volitelnými parametry společně se vzdáleností vlaku od trakčního napaječe. Fázor žádané efektivní hodnoty napětí trakčního napaječe $\bar{U}_{SFC,žád}$ je poté určen z druhého Kirchhoffova zákona součtem fázoru úbytku napětí trakčního vedení $\Delta\bar{U}_{TV}$ a fázoru žádané efektivní hodnoty napětí v místě vlaku $\bar{U}_{vlak,žád}$ podle rovnice

$$\bar{U}_{SFC,žád} = \bar{U}_{vlak,žád} + \Delta\bar{U}_{TV} . \quad (11)$$

Pro testování odezvy napětí SFC měniče na změnu frekvence v síti je důležité stanovit mezní hodnoty odchylek frekvence, nad kterými bude trakční napaječ měnit napětí v TS. Odchylka frekvence v síti je stanovena jako rozdíl měřené hodnoty frekvence sítě a systémové frekvence 50 Hz, přičemž změna frekvence je způsobena změnou nastavené hodnoty frekvence v napěťovém zdroji modelu DS. Tento způsob zadávání frekvence je možný právě v důsledku použitého napěťového zdroje, jehož výhodou je přesnost nastavení žádané hodnoty frekvence. Lze tak jednoduchým způsobem simulovat odezvu napětí SFC měniče na konkrétní zvolené hodnotě frekvence, a tedy zvolené odchylce frekvence. V rámci simulace je nastavována hodnota frekvence do napěťového zdroje s tolerancí $50 \text{ Hz} \pm 1 \%$ dle [34], tedy v rozmezí hodnot 49,5 Hz až 50,5 Hz, což odpovídá nastavované odchylce frekvence $\pm 500 \text{ mHz}$. Pro správnou funkci je do celého procesu odezvy napětí SFC měniče zavedena znaménková konvence odchylky frekvence sítě, rozlišující stav nadfrekvence a podfrekvence. V případě podfrekvence je odchylka frekvence sítě záporná, pokud se jedná o stav nadfrekvence, je odchylka frekvence kladná. Pro měření frekvence v DS je možné v programu PSCAD použít několik způsobů měření, např.: 1) měření prostřednictvím bloku „Frequency and Incremental Phase Measurement“ z knihovny programu PSCAD, 2) měření pomocí bloku „PLL“ z knihovny programu PSCAD a 3) měření pomocí bloku „FFT“ z knihovny programu PSCAD (viz. obrázek 31). První způsob měření je vhodný pro napětí třífázové soustavy bez výskytu vyšších harmonických složek, vstupující do daného bloku měření. V případě obsahu vyšších harmonických složek napětí v DS je při průchodu napětí všech fází nulou chybně počítán následující vzorek frekvence v algoritmu výpočtu a výsledný průběh frekvence $f_{měřená}$ je zkreslený, čímž je tento způsob měření pro potřeby testování odezvy napětí SFC měniče nevhodný. Druhý způsob měření frekvence pomocí bloku „PLL“ vykazuje v průběhu frekvence f_{PLL} výrazný šum, který lze potlačit filtrem 1. řádu typu dolní propust, čímž je však dosaženo pomalejší odezvy měřené frekvence na nastavenou hodnotu frekvence v napěťovém zdroji modelu DS. Pro účely simulace je zvolen třetí způsob měření frekvence prostřednictvím „FFT“ bloku, pracujícího na principu Fourierovy transformace. Pomocí tohoto bloku je možné měřit frekvenci průběhu obsahující harmonické zkreslení a dosáhnout stabilnější hodnoty frekvence v porovnání s předchozími způsoby.



Obrázek 31 Průběhy frekvence v DS dle tří způsobů měření.

Zbývajícím článkem celého procesu odezvy napětí SFC měniče na změnu frekvence v síti je vytvoření určité vazby mezi měřenou hodnotou frekvence sítě a žádanou efektivní hodnotou napětí trakčního napaječe. V součinnosti s použitým modelem lokomotivy Loko 3, který je schopen pracovat v odběrovém režimu vlaku a režimu rekuperace, je do celého procesu odezvy napětí použit odlišný přístup tvorby závislosti efektivní hodnoty napětí trakčního napaječe na měřené frekvenci sítě pro každý režim. Tyto přístupy jsou detailněji popsány v následujících kapitolách.

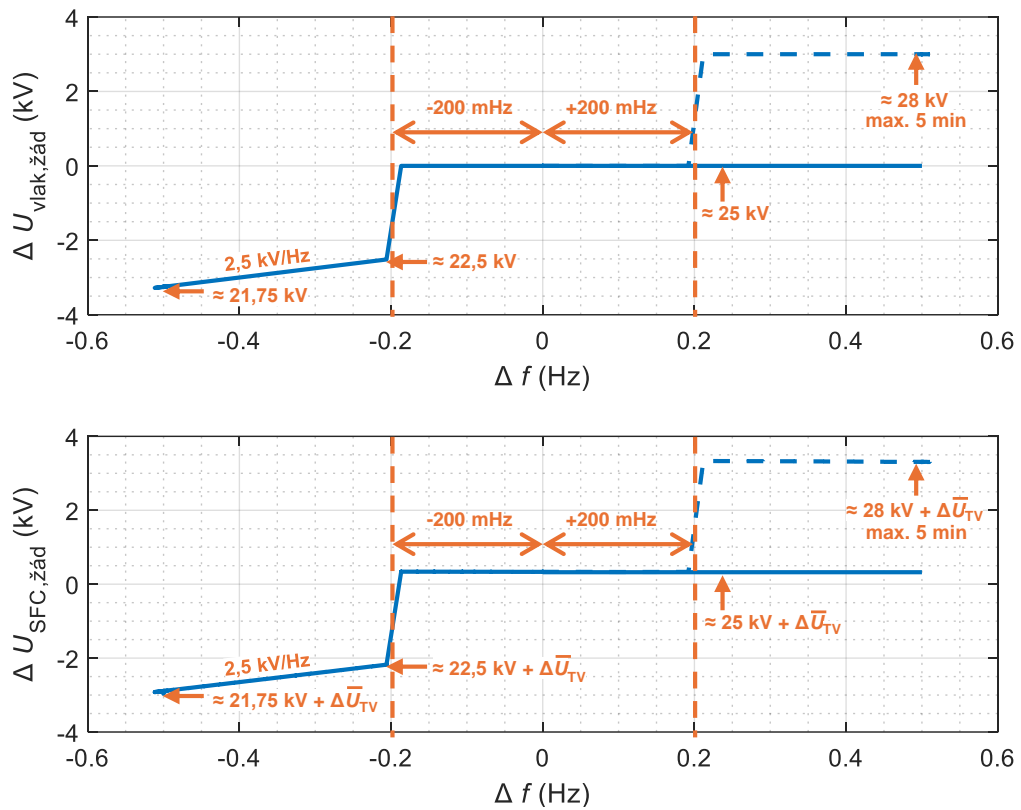
6.1 Odběrový režim vlaku

Z rovnice (11) je patrné, že žádaná efektivní hodnota napětí trakčního napaječe je závislá na žádané efektivní hodnotě napětí v místě vlaku. V důsledku toho je do procesu odezvy napětí zavedena závislost změny žádané efektivní hodnoty napětí v místě vlaku na změně měřené frekvence sítě, tedy charakteristika $\Delta U_{\text{vlak,žád}}/\Delta f$ (viz. obrázek 32), která je klíčovým parametrem pro fungování celého procesu odezvy napětí SFC měniče na změnu frekvence.

Tato charakteristika je vytvořena na základě normovaných parametrů z charakteristiky pro omezení proudu vlaku pro zajištění vazby na mechanický výkon lokomotivy. Z hlediska měřené změny frekvence v síti je do charakteristiky $\Delta U_{\text{vlak,žád}}/\Delta f$

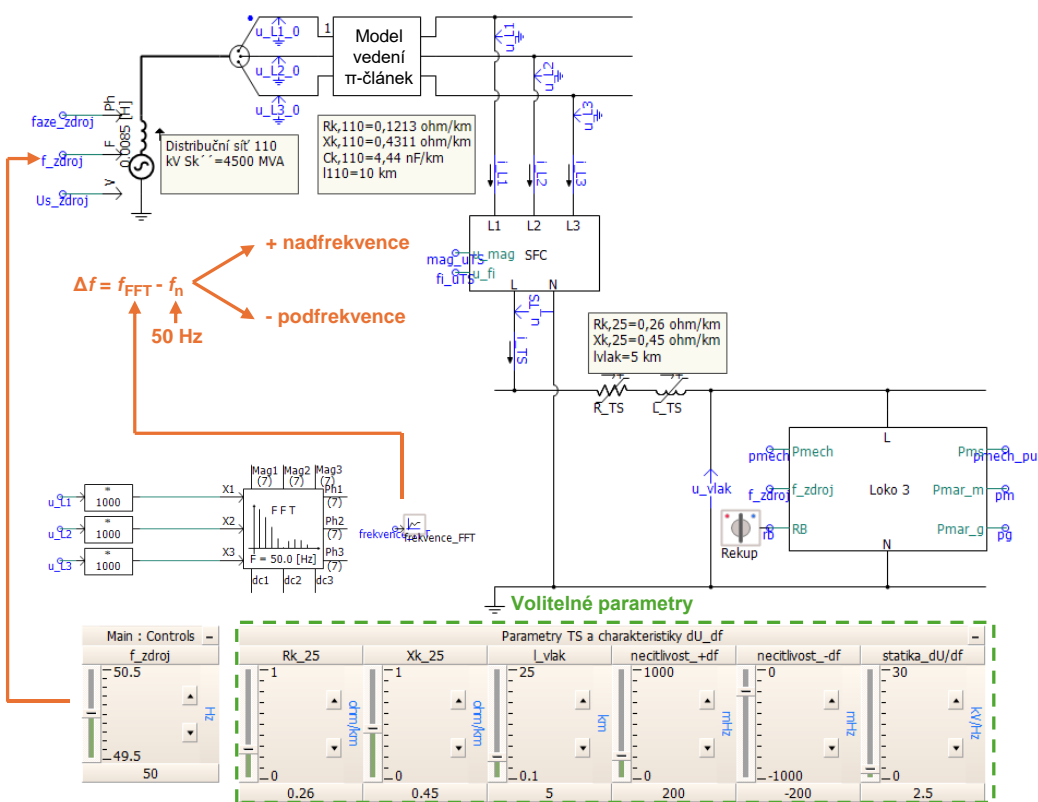
implementováno pásmo necitlivosti z důvodu neustále měnící se frekvence v síti a je tak zajištěn běžný provoz TS v rámci běžných odchylek frekvence sítě. Mezní hodnoty pásma necitlivosti jsou zvoleny v rozmezí hodnot odchylky frekvence ± 200 mHz pro zajištění podpory frekvence při havarijním stavu sítě v oblasti frekvence menší než 49,8 Hz a větší než 50,2 Hz, přičemž prahové hodnoty pásma necitlivosti jsou volitelnými parametry a lze tyto hodnoty měnit zvlášť pro stav nadfrekvence a podfrekvence. V tomto pásmu necitlivosti je nastavena žádaná efektivní hodnota napětí v místě vlaku na hodnotu 25 kV, čímž je v charakteristice $\Delta U_{\text{vlak,žád}}/\Delta f$ zajištěna nulová změna hodnoty napětí. Dle charakteristiky pro omezení proudu vlaku (viz. obrázek 29) je v takovém případě odebrán nominální proud vlaku a mechanický výkon není žádným způsobem omezován. Pokud je stanovena kladná odchylka frekvence s hodnotou větší než +200 mHz, je nastavena žádaná efektivní hodnota v místě vlaku téměř skokově z hodnoty 25 kV na hodnotu 28 kV, přičemž hodnota napětí je konstantní až do hodnoty odchylky frekvence +500 mHz. V charakteristice $\Delta U_{\text{vlak,žád}}/\Delta f$ tato změna napětí odpovídá změně +3 kV. V důsledku toho dle charakteristiky pro omezení proudu vlaku (viz. obrázek 29) není omezován odebíraný proud vlaku, a tedy ani mechanický výkon vlaku. Jestliže je nastavena záporná odchylka frekvence s hodnotou menší než -200 mHz, je nejprve provedena téměř skoková změna žádané efektivní hodnoty napětí v místě vlaku z hodnoty 25 kV na hodnotu 22,5 kV a právě skokovou změnou napětí je aktivováno omezení mechanického výkonu a rovněž odebíraného výkonu z TS 25 kV 50 Hz. V charakteristice $\Delta U_{\text{vlak,žád}}/\Delta f$ tato změna napětí odpovídá změně -2,5 kV. V rozmezí hodnot odchylky frekvence -200 mHz až -500 mHz je stanovena kladná statika s hodnotou 2,5 kV/Hz pro zajištění lineární závislosti v charakteristice $\Delta U_{\text{vlak,žád}}/\Delta f$. Žádaná změna efektivní hodnoty napětí v místě vlaku dosahuje hodnot až -3,25 kV při odchylce frekvence -500 mHz. Hodnota statiky byla původně stanovena výpočtem z odchylky frekvence v rozmezí hodnot -200 mHz až -500 mHz a rozmezí efektivní hodnoty napětí v místě vlaku 25 kV až 17,5 kV. V takovém případě by byla hodnota statiky stanovena na 7,5 kV/0,3 Hz, čímž by dle charakteristiky pro omezení proudu došlo k úplnému omezení odebíraného výkonu z TS 25 kV 50 Hz, což je nežádoucí s ohledem na plynulost železniční dopravy. Nový způsob výpočtu je stanoven z tolerančního pásma dovolené frekvence v rozmezí hodnot 47 až 52 Hz dle [34]. Pro výpočet statiky je z tohoto tolerančního pásma použita maximální odchylka při podfrekvenci -3 Hz, čímž je dosaženo statiky 7,5 kV/3 Hz a tedy 2,5 kV/Hz.

Pro funkci celého procesu odezvy napětí SFC měniče na změnu frekvence sítě je klíčová žádaná efektivní hodnota napětí trakčního napaječe. Ta je získána sumou žádané efektivní hodnoty napětí v místě vlaku a fázoru úbytku napětí trakčního vedení, a je tedy vytvořena klíčová charakteristika $\Delta U_{\text{SFC,žád}}/\Delta f$, která popisuje závislost žádané změny efektivní hodnoty napětí trakčního napaječe na změně frekvence sítě (viz. obrázek 32).



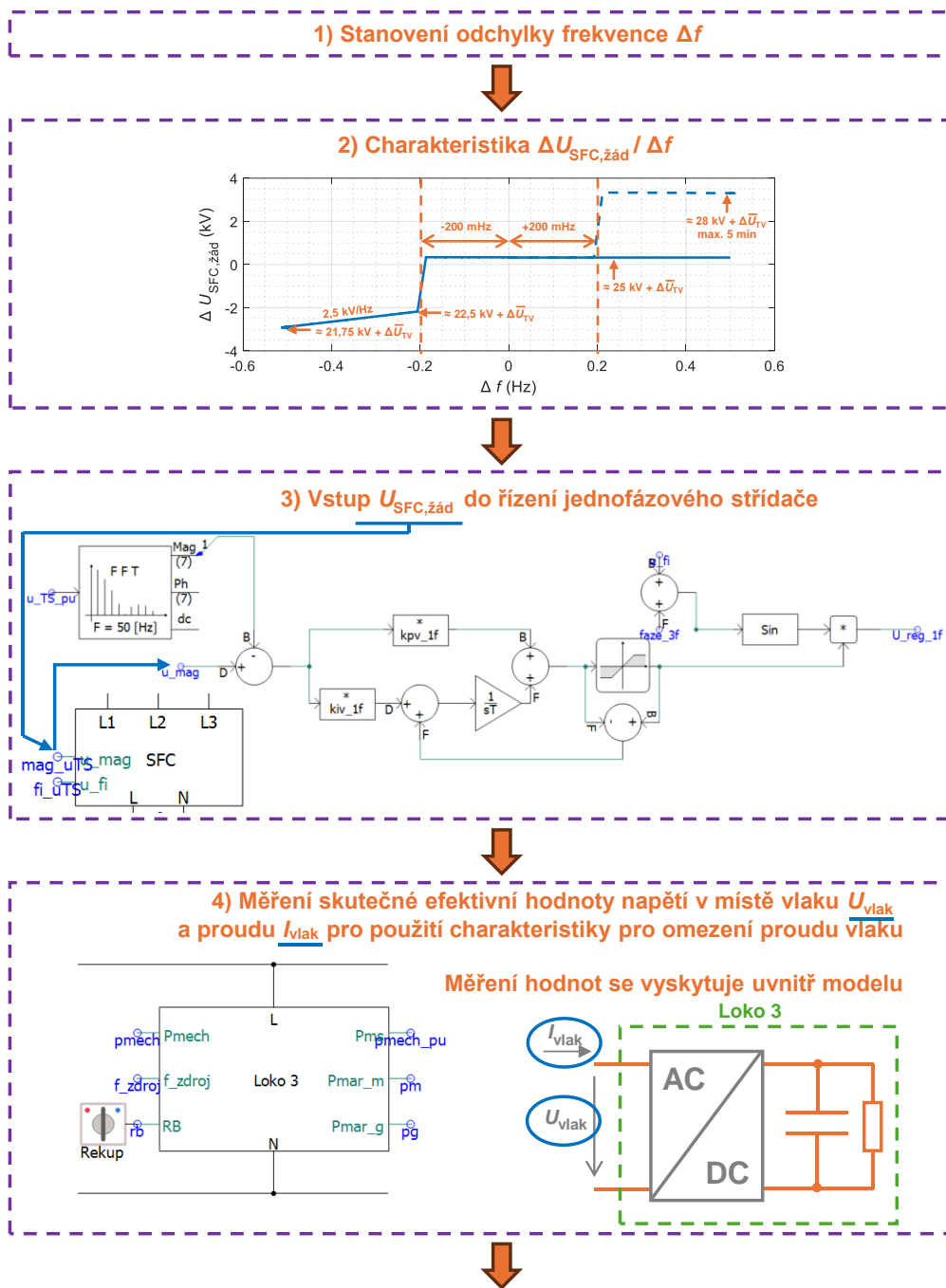
Obrázek 32 Charakteristika $\Delta U_{\text{vlak,žad}}/\Delta f$ a $\Delta U_{\text{SFC,žad}}/\Delta f$.

Pro simulaci funkce odezvy napětí SFC měniče na změnu frekvence sítě je vytvořen simulační scénář v programu PSCAD, obsahující model DS 110 kV o délce vedení 10 km, na jehož konci je připojen model SFC měniče. Výstup měniče je připojen do TS 25 kV 50 Hz s parametry impedance trakčního vedení jednokolejné tratě $R_{k,25} = 0,25 \Omega/\text{km}$ a $X_{k,25} = 0,25 \Omega/\text{km}$ s umístěným modelem Loko 3 ve zvolené vzdálenosti 5 km od trakčního napaječe (viz obrázek 33).

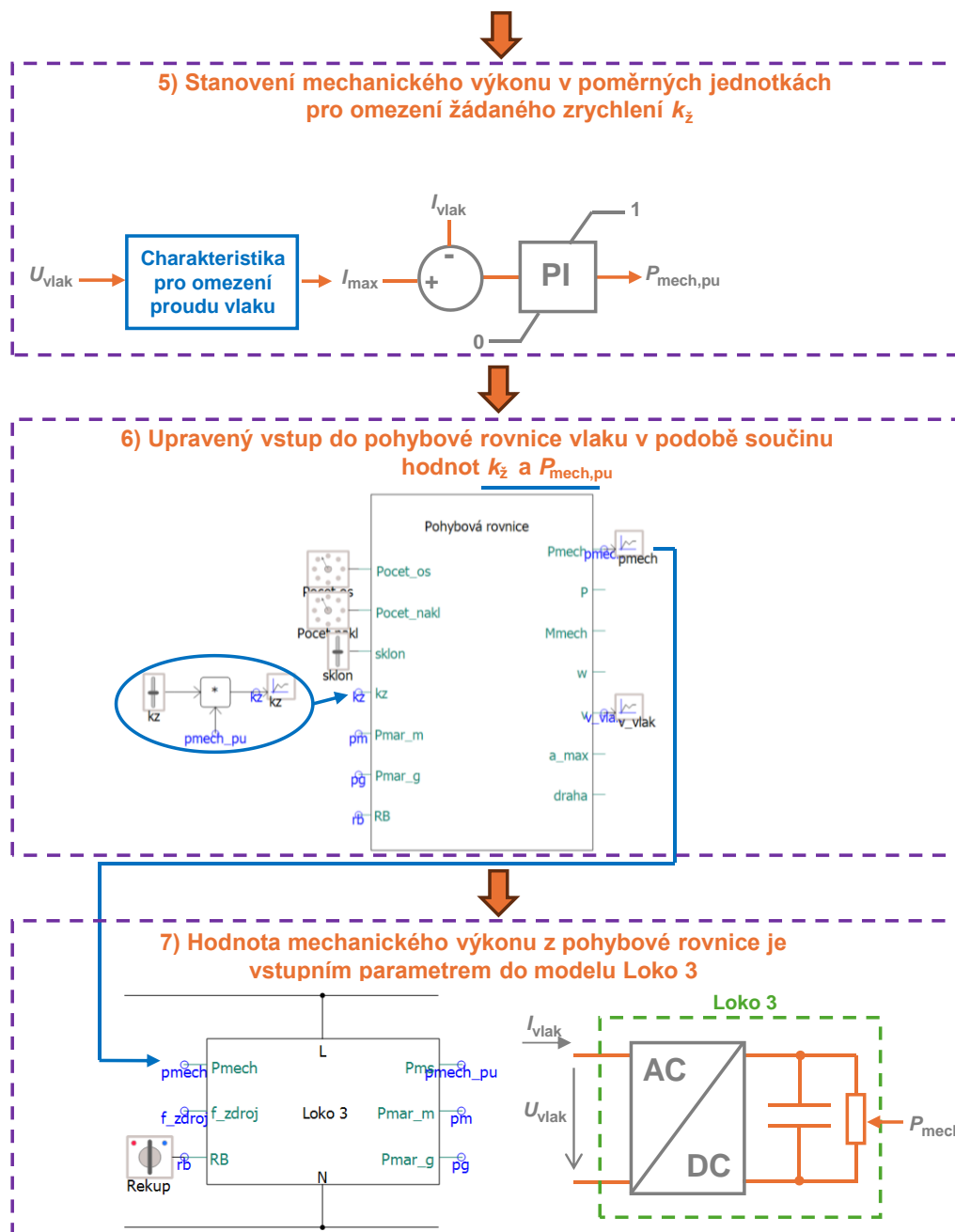


Obrázek 33 Schéma pro simulaci odezvy napětí SFC měniče na změnu frekvence.

Prostřednictvím posuvníku pro změnu frekvence v napěťovém zdroji modelu DS 110 kV je nastavována požadovaná hodnota frekvence sítě v rozmezí hodnot 49,5 Hz až 50,5 Hz. U tohoto jediného parametru je během simulace prováděna změna hodnoty pro sledování odezvy efektivní hodnoty napětí trakčního napaječe a sledování odezvy mechanického výkonu lokomotivy na změnu efektivní hodnoty napětí v místě vlaku. Volitelnými parametry jsou impedance trakčního vedení, tedy rezistance a reaktance vedení vztažené na 1 km délky vedení, vzdálenost vlaku od trakčního napaječe, pásmo necitlivosti pro charakteristiku $\Delta U_{vlak,žád}/\Delta f$ a hodnota statiky pro charakteristiku $\Delta U_{vlak,žád}/\Delta f$. Tyto parametry jsou voleny před spuštěním simulace a parametr vzdálenost vlaku od trakčního napaječe je v tomto případě volen jako fixní, přestože je model Loko 3 vázán na pohybovou rovnici vlaku. Tato volba je provedena záměrně z hlediska komplexnosti celkového modelu v programu PSCAD obsahující dva aktivně řízené měniče: model trakčního napaječe SFC a model Loko 3. Model Loko 3 je z hlediska elektrických parametrů chápán jako nepohyblivá zátěž, přičemž veličiny vyjadřující mechanický pohyb vlaku jsou zachovány. Celkové schéma procesu odezvy napětí SFC měniče na změnu frekvence sítě je na obrázku 34 a 35.



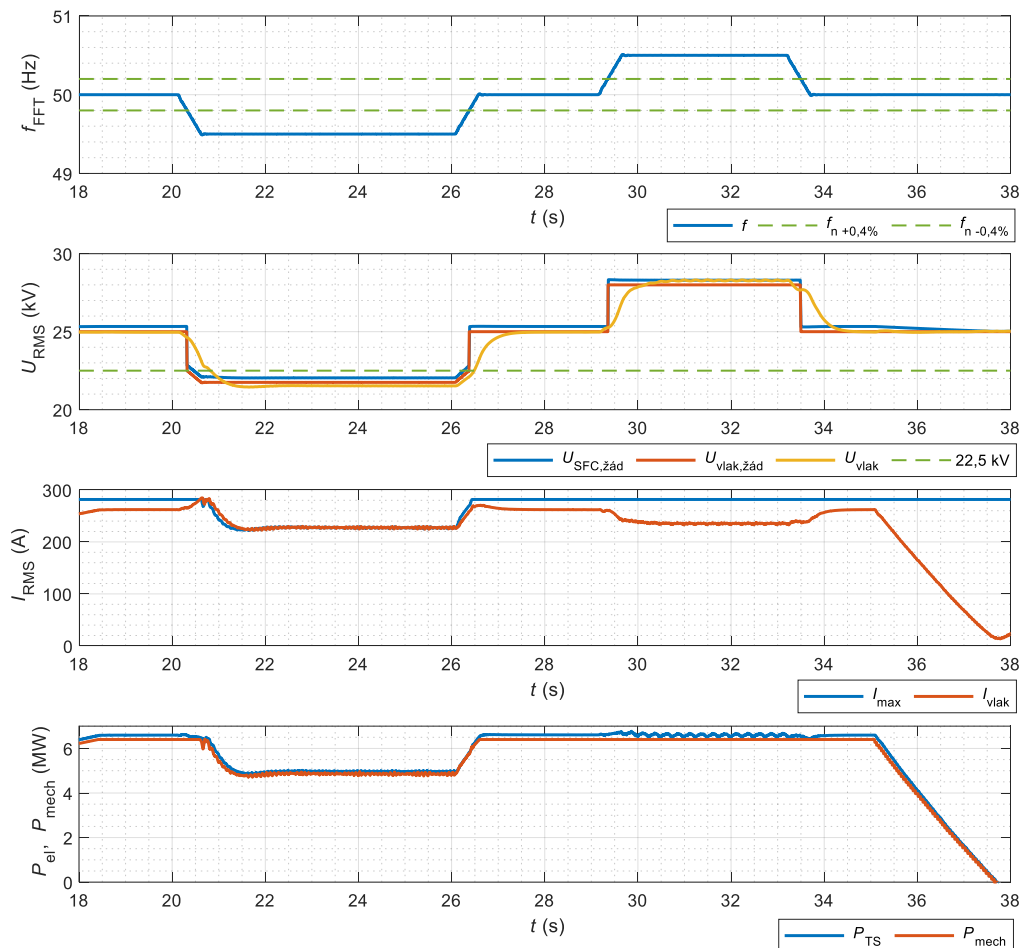
Obrázek 34 Schéma procesu odezvy napětí SFC měniče na změnu frekvence.



Obrázek 35 Schéma procesu odezvy napětí SFC měniče na změnu frekvence.

Během simulace provozu modelu Loko 3 je testována odezva napětí SFC měniče na změnu frekvence sítě společně pro odběrový režim vlaku a režim rekuperace při nastavené délce simulace 100 sekund. V této kapitole jsou ukázány průběhy měřených veličin pro odběrový režim vlaku, který je simulován v čase od 0 do 38 sekund. Na počátku simulace je nastaveno žádané zrychlení k_z modelu Loko 3 na hodnotu 1, čímž je zahájen rozjezd vlaku a hodnota mechanického výkonu lineárně narůstá na požadovanou hodnotu 6,4 MW. Podle zadaných mechanických parametrů do pohybové rovnice vlaku

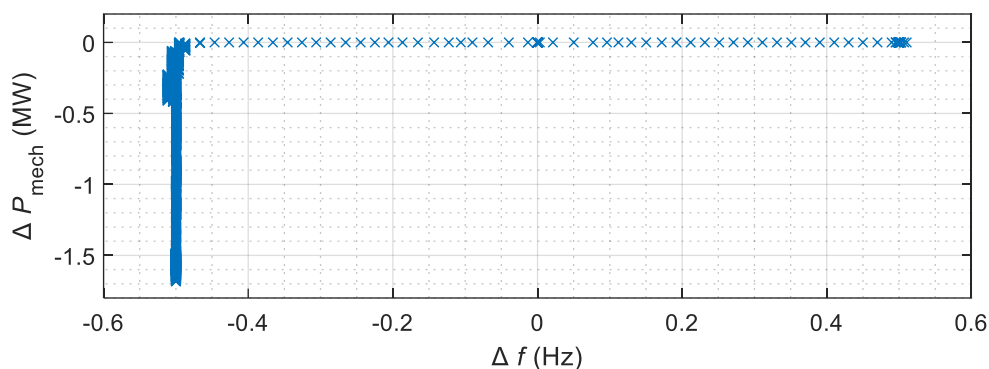
je doba trvání nárůstu mechanického výkonu cca 18 sekund. Po tuto dobu je nastavena hodnota frekvence v napěťovém zdroji modelu DS na hodnotu 50 Hz (viz. obrázek 36). V čase cca 20 sekund je zadán požadavek pro snížení frekvence na hodnotu 49,5 Hz s lineárně klesajícím trendem v důsledku implementovaného integrátoru pro přehlednost zaznamenaných změn měřených průběhů veškerých simulovaných veličin. Hodnota frekvence setrvává na hodnotě 49,5 Hz až do času simulace cca 26 sekund z důvodu testování stability celého systému při snížené frekvenci. Dále je zadán požadavek pro zvýšení frekvence zpět na hodnotu 50 Hz a od cca 29 sekund je frekvence zvýšena na hodnotu 50,5 Hz pro testování systému na stav nadfrekvence až do času simulace cca 33,5 sekund. Poté je hodnota frekvence opět snížena na hodnotu 50 Hz. V době simulace cca 35 sekund je zahájeno snižování akcelerace vlaku a mechanický výkon je snižován, přičemž nulové hodnoty mechanického výkonu je dosaženo v čase cca 38 sekund.



Obrázek 36 Průběhy napětí, proudů a výkonů v čase při změně hodnoty frekvence sítě.

Znázorněné průběhy měřených veličin na obrázku 36 jsou vázány na změnu frekvence sítě. Zelené čárkované limity v průběhu frekvence zobrazují pásmo necitlivosti s hodnotou frekvence 49,8 Hz jakožto spodní hranici pásma necitlivosti a 50,2 Hz pro

horní hranici pásma necitlivosti, zavedeného do charakteristiky $\Delta U_{\text{vlak,žád}}/\Delta f$. V případě poklesu měřené hodnoty frekvence sítě f_{FFT} pod limit 49,8 Hz, je nastavena žádaná efektivní hodnota trakčního napaječe $U_{\text{SFC,žád}}$ (modrá křivka) na hodnotu napětí, odpovídající žádané efektivní hodnotě napětí v místě vlaku $U_{\text{vlak,žád}}$ (oranžová křivka) 22,5 kV. To je patrné z grafu pro průběhy efektivních hodnot napětí, kde je oranžovou křivkou dosaženo hodnoty 22,5 kV při dosažení frekvence na hodnotu 49,8 Hz. Při pokračujícím poklesu frekvence na hodnotu 49,5 Hz působí statika hodnotou 2,5 kV/Hz v průběhu efektivního hodnot napětí na napětí $U_{\text{vlak,žád}}$ (oranžová křivka), což je projevem lineárního poklesu napětí z hodnoty 22,5 kV na hodnotu 21,75 kV podle charakteristiky $\Delta U_{\text{vlak,žád}}/\Delta f$. Efektivní hodnota napětí v místě vlaku U_{vlak} (žlutá křivka) je opožděna odezvou napěťového regulátoru v řízení jednofázového střídače SFC měniče, čímž vzniká doba cca 1,5 sekundy pro vyregulování napěťové odchylky. V důsledku toho je v grafu pro efektivní hodnoty proudu zahájeno omezování proudu vlaku v době, kdy nastává pokles hodnoty napětí U_{vlak} (žlutá křivka) pod limit 22,5 kV. V tomto čase je charakteristikou pro omezení proudu vlaku nastavena hodnota proudu I_{max} (modrá křivka) dle napětí U_{vlak} a dochází tak k fyzickému omezení odebíraného proudu vlaku I_{vlak} (oranžová křivka). V době poklesu hodnoty proudu I_{max} je hodnota odebíraného proudu nepatrně vyšší z důvodu časové prodlevy regulátory pro vytváření mechanického výkonu v poměrných jednotkách, umístěného v modelu Loko 3. Příčinou omezení odebíraného proudu vlaku je omezení mechanického výkonu v době poklesu napětí U_{vlak} (žlutá křivka) pod limit 22,5 kV. Mechanický výkon v důsledku implementované statiky 2,5 kV/Hz určující hodnotu napětí 21,75 kV v místě vlaku je snížen na hodnotu 4,88 MW z nominální hodnoty 6,4 MW. V důsledku poklesu frekvence na hodnotu 49,5 Hz tvoří procentuální mechanický výkon lokomotivy 76 % původní hodnoty, což vlak žádným způsobem výrazně neovlivňuje v jízdě, protože hodnota 76 % rovněž odpovídá žádanému zrychlení vlaku, tudíž v případě zvyšování rychlosti vlaku je tímto omezením docíleno pouze prodloužení doby k dosažení požadované rychlosti vlaku. V případě zvýšení hodnoty frekvence nad horní mez pásma necitlivosti, tedy 50,2 Hz je nastavena hodnota napětí $U_{\text{SFC,žád}}$ (modrá křivka) na hodnotu odpovídající hodnotě napětí $U_{\text{vlak,žád}}$ (oranžová křivka) 28 kV v čase simulace cca 29,5 sekund. V důsledku zvýšení hodnoty napětí U_{vlak} (žlutá křivka) není při takové hodnotě napětí z důvodu implementované charakteristiky pro omezení proudu vlaku nutné omezovat mechanický výkon vlaku, což vede na pokles odebíraného proudu I_{vlak} (oranžová křivka), který trvá až do doby poklesu napětí v místě vlaku na nominální hodnotu 25 kV v čase cca 34 sekund vlivem snížení frekvence na hodnotu 50 Hz. Cílem simulace odezvy napětí SFC měniče na změnu frekvence v síti je také zjištění závislosti změny mechanického výkonu lokomotivy na změně frekvence v síti pro možné posouzení statiky v jednotkách MW/Hz, používané běžně u zařízení v elektrizační soustavě. Za tímto účelem je vytvořena charakteristika $\Delta P_{\text{mech}}/\Delta f$ v jednotlivých krocích simulace, představující frekvenční charakteristiku zátěže (viz. obrázek 37).



Obrázek 37 Závislost $\Delta P_{\text{mech}}/\Delta f$ v jednotlivých krocích simulace.

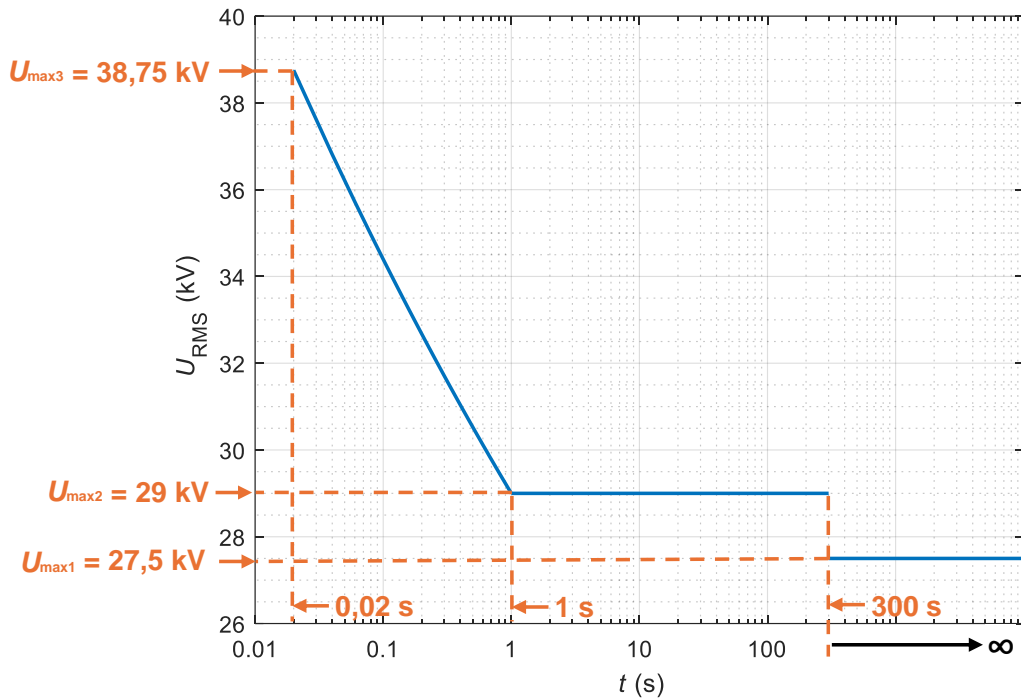
Z charakteristiky je zřejmé, že pro stav nadfrekvence je změna odebíraného výkonu nulová, a mechanický výkon lokomotivy není tedy omežován. V případě podfrekvence je v charakteristice znázorněna změna mechanického výkonu až při frekvenci 49,5 Hz. Tato změna je způsobena časovou prodlevou regulátoru napětí řízení jednofázové střídače v měniči SFC pro vyregulování odchylky napětí.

6.2 Režim rekuperace

V případě režimu rekuperace elektrické energie charakteristika pro pozvolné omezení proudu vlaku neplatí. Implementovaná charakteristika $\Delta U_{\text{SFC,žád}}/\Delta f$ je však používána pro oba režimy dodávky či odběru výkonu vlaku, což umožňuje nezávislost řízení na směru toku energie přes napaječ. V této kapitole je dále popsána problematika parametrizace křivky z obrázku 32 v oblasti kladné odchylky frekvence. Pro řešení této problematiky se vychází z následujících předpokladů: 1) v případě snížení efektivní hodnoty napětí trakčního napaječe není nutné žádným způsobem omezovat rekuperaci elektrické energie směrem do TS 25 kV 50 Hz a 2) je nutné zamezit stavu rekuperace v případě, že efektivní hodnota napětí v místě vlaku překročí stanovenou mez.

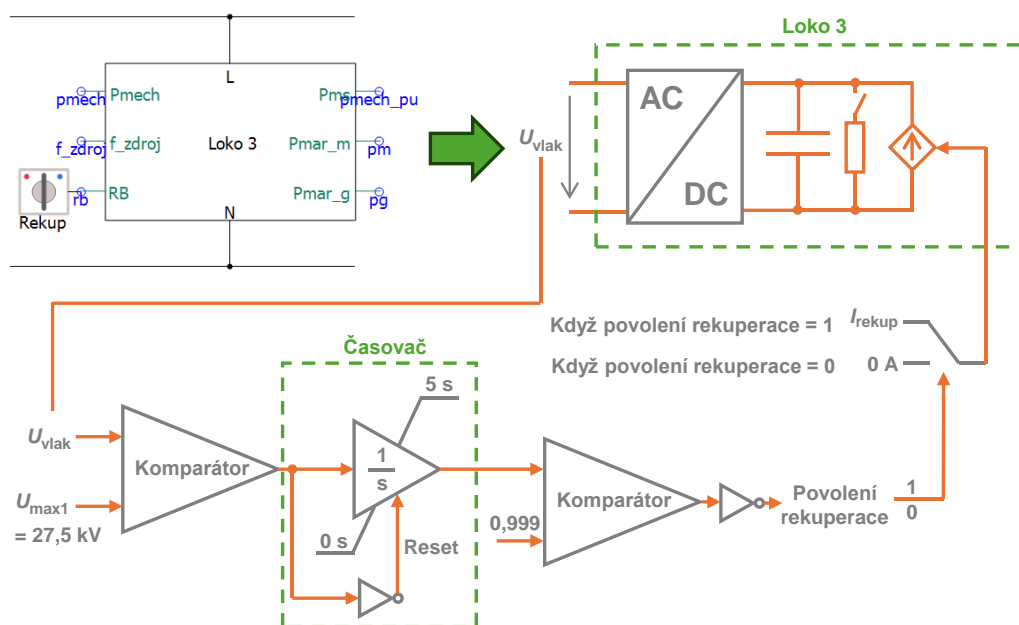
Podle prvního výchozího předpokladu je možné simulovat provoz vlaku bez nutných úprav modelu Loko 3. V případě druhého výchozí předpokladu je nutné měřit dobu trvání maximální hodnoty napětí v místě vlaku dle normy ČSN EN 50163 [35]. Tato norma uvádí závislost maximální hodnoty napětí TS na době trvání (viz. obrázek 38) [35]. Uvedená charakteristika je rozdělena do tří časových pásem v logaritmických souřadnicích, pro něž existuje odpovídající maximální hodnota napětí v dané TS. V prvním časovém pásmu od 20 ms do 1 s tvoří charakteristiku s klesajícím trendem $U_{\text{max}2} \cdot t^{-k}$ (hodnota koeficientu $k = 0,0741$ pro TS 25 kV 50 Hz) v logaritmických souřadnicích z hodnoty nejvyššího dlouhodobého přepětí pro čas 20 ms $U_{\text{max}3}$ (hodnota $U_{\text{max}3} = 38,75$ kV pro TS 25 kV 50 Hz) na hodnotu nejvyššího krátkodobého přepětí $U_{\text{max}2}$ (hodnota $U_{\text{max}2} = 29$ kV pro TS 25 kV 50 Hz). V dalším časovém pásmu od hodnoty 1 sekundy do 5 minut je závislost konstantní s hodnotou $U_{\text{max}2}$. V čase od

5 minut do nekonečna pokračuje charakteristika na konstantní hodnotě nejvyššího trvalého napětí $U_{\max1}$ (hodnota $U_{\max1} = 17,5$ kV pro TS 25 kV 50 Hz).



Obrázek 38 Závislost maximální hodnoty napětí TS na době trvání [35].

Z časové závislosti napětí (viz. obrázek 38) [35] plyne nastavení charakteristiky $\Delta U_{\text{vlak,žád}}/\Delta f$ (viz. obrázek 32) pro kladnou odchylku frekvence, kde konstantní hodnota odpovídá napětí v místě vlaku 28 kV a to maximálně po dobu 5 minut dle druhého časového pásma pro hodnoty napětí v rozmezí 27,5 kV až 29 kV. V návaznosti na tuto charakteristiku je také do modelu Loko 3 implementováno povolení rekuperace formou binárních hodnot 1-rekuperace povolena a 0-rekuperace zakázána (viz. obrázek 39). V případě rekuperace elektrické energie při nadfrekvenci 50,5 Hz je zvýšena hodnota napětí $U_{\text{SFC,žád}}$, odpovídající hodnotě $U_{\text{vlak,žád}} = 28$ kV maximálně po dobu 5 minut. V době překročení napětí $U_{\text{vlak}} = 27,5$ kV je odpočítáván čas 5 minut a to i při překročení hodnot napětí v rozmezí 27,5 kV až 29 kV. Pokud do této doby nedojde k poklesu napětí U_{vlak} pod hodnotu 27,5 kV, je na výstup pro povolení rekuperace přiřazena binární hodnota 0, čímž je rekuperace zakázána. V důsledku toho je zamezeno dalšímu zvyšování napětí v místě vlaku, způsobeného rekuperací, za přítomnosti nadfrekvence. V případě výskytu napětí U_{vlak} nad hodnotou 29 kV je odpočítáván čas, odvozený dle časově závislé charakteristiky z obrázku 38.

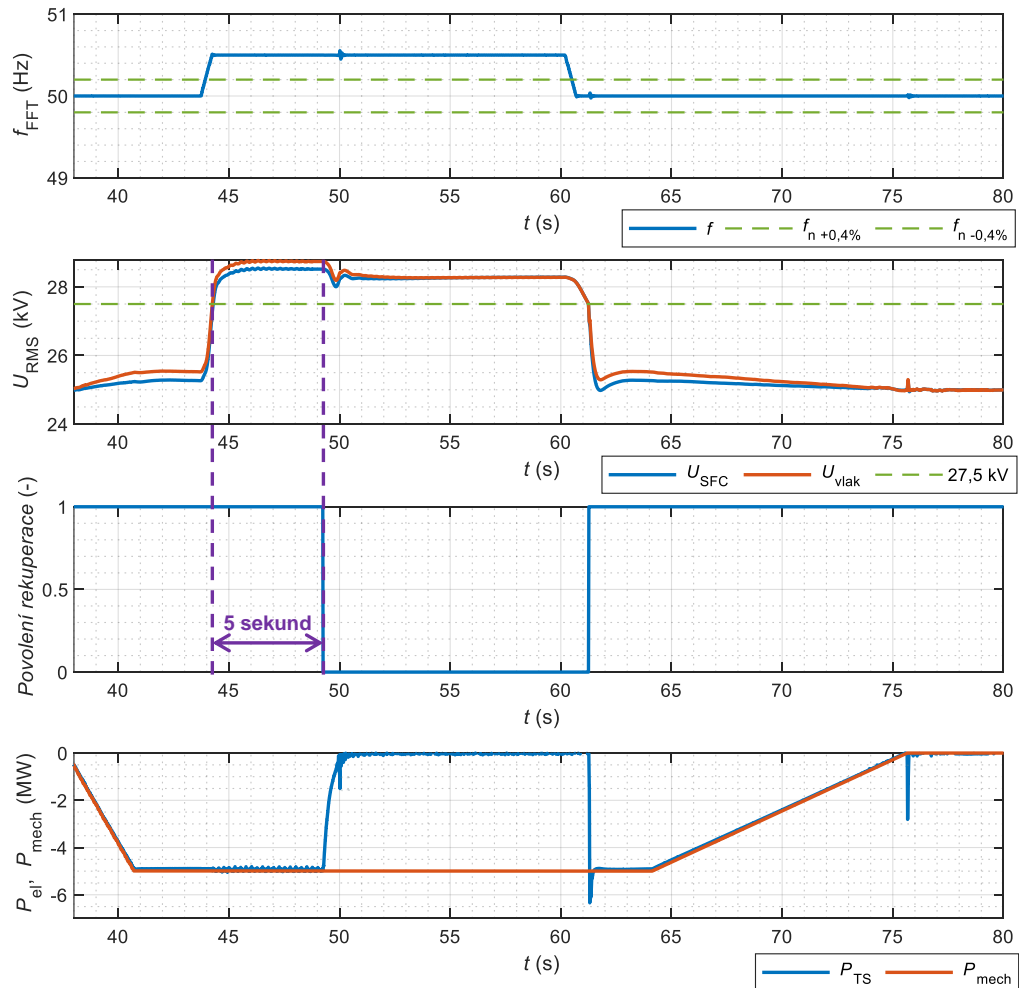


Obrázek 39 Implementace povolení rekuperace s výstupem binárních hodnot do modelu Loko 3.

Hodnota napětí U_{vlak} vstupuje do komparátoru, kde je porovnávána s hodnotou nejvyššího trvalého napětí $U_{max1} = 27,5$ kV. Pokud je tedy hodnota napětí U_{vlak} větší než 27,5 kV, je komparátorem generován signál s hodnotou 1, který uvede do chodu časovač, jehož horní limit je nastaven na 5 sekund z důvodu doby trvání simulace. Ve skutečnosti by této hodnotě odpovídal čas 5 minut dle časové závislosti maximální hodnoty napětí (viz. obrázek 38) [35]. V integrátoru časovače během času simulace 5 sekund narůstá hodnota lineárně do horního limitu 1, poté je z výstupního komparátoru generován negovaný signál s hodnotou 0 a rekuperace je zakázána. V případě poklesu napětí U_{vlak} pod limit 27,5 kV v libovolném čase je rekuperace opět povolena. Binární hodnoty pro povolení rekuperace jsou zároveň hodnotami určující podmínku pro výběr hodnot proudu, vstupujícího do proudového zdroje v oblasti zátěže modelu Loko 3. Pokud je rekuperace zakázána, je do proudového zdroje nastavena nulová hodnota proudu, a tím je simulován stav brzdění vlaku s mařenou elektrickou energií v brzdovém odporu. Pakliže dojde k povolení rekuperace, je do proudového zdroje nastavena hodnota proudu, vypočtená z mechanického výkonu v případě rekuperace z pohybové rovnice a napětí stejnosměrného meziobvodu.

Simulace provozu navazuje na scénář z kap. 6.1, kde je ukázána simulace v odběrovém režimu vlaku v čase od 18 sekund do 38 sekund. V čase cca 38 sekund je nastavena záporná hodnota žádaného zrychlení vlaku, a je tedy simulován stav brzdění včetně rekuperace elektrické energie do TS 25 kV 50 Hz (viz. obrázek 40). Frekvence sítě je nastavena na hodnotu 50 Hz po čas snižování mechanického výkonu na hodnotu - 5 MW pro účinek rekuperace. V čase cca 44 sekund je zadán požadavek pro zvýšení

frekvence na hodnotu 50,5 Hz za účelem testování povolení rekuperace formou binárních hodnot. Po uplynutí 60 sekund času simulace je frekvence sítě opět snížena na hodnotu 50 Hz a celý proces simulace končí zastavením vlaku v čase cca 76 sekund.



Obrázek 40 Průběhy napětí, povolení rekuperace a výkonů v čase při změně frekvence sítě.

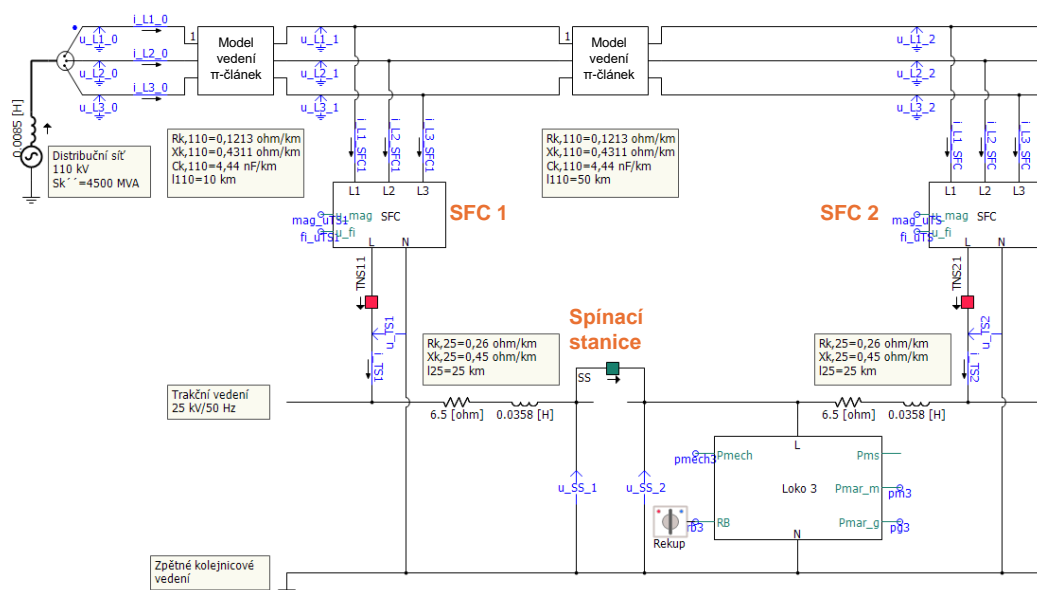
V důsledku zvýšení frekvence sítě na hodnotu 50,5 Hz v čase simulace cca 44 sekund je nastavena hodnota napětí $U_{vlak,žád}$ na 28 kV dle charakteristiky $\Delta U_{vlak,žád}/\Delta f$. Vzhledem k součinnosti s dodávkou činného výkonu přibližně 4,9 MW do TS 25 kV 50 Hz je v grafu pro efektivní hodnoty napětí U_{RMS} efektivní hodnota napětí v místě vlaku U_{vlak} (oranžová křivka) rovna 28,75 kV a vlivem úbytku napětí trakčního vedení 250 V je docíleno efektivní hodnoty napětí trakčního napaječe U_{SFC} (modrá křivka) 28,5 kV. V čase cca 44 sekund, kdy dochází v místě vlaku k překročení limitu napětí 27,5 kV, je spuštěn časovač, nastavený na dobu 5 sekund. Ve skutečnosti dle závislosti maximálního napětí na době trvání (viz. obrázek 38) [35] by byla zvolena hodnota doby trvání 5 minut, což je v případě simulace dlouhá doba pro pouhou ukázkou změny výstupu povolení

rekuperace z hodnoty 1 na hodnotu 0. V případě, že během této doby 5 sekund nenastane pokles napětí U_{vlak} pod hodnotu 27,5 kV, je po uplynutí času 5 sekund zakázána rekuperace, což je znázorněno v grafu pro povolení rekuperace změnou hodnoty 1 na hodnotu 0 v čase cca 49 sekund. V důsledku toho je v grafu, obsahující průběhy mechanického výkonu vlaku P_{mech} (oranžová křivka) a elektrického výkonu dodávaného do TS P_{TS} (modrá křivka), zamezena dodávka výkonu do TS, který je zvýšen z hodnoty -4,9 MW na nulovou hodnotu. Mechanický výkon vlaku je však stále udržován na hodnotě -5 MW, což je dáno charakteristikou mechanického výkonu na úhlové rychlosti nápravy, vyjádřenou pohybovou rovnicí, čímž je stále simulováno brzdění vlaku (brzdění do odporu). V době zákazu rekuperace je v grafu pro U_{RMS} patrný zákmit napětí v místě vlaku a efektivní hodnoty napětí trakčního napaječe. Tento jev je způsoben rychlou změnou dodávaného výkonu do TS z hodnoty necelých -5 MW na nulovou hodnotu za dobu 1 sekundy. Dále je napětí U_{vlak} a U_{SFC} snížena vlivem eliminace dodávky výkonu do TS, čímž jsou také oba průběhy vzájemně překryty z důvodu nulové hodnoty úbytku napětí. V čase simulace 60 sekund je nastaven požadavek na snížení frekvence zpět na hodnotu 50 Hz s povelom na snížení hodnoty napětí $U_{\text{vlak,žád}}$ na 25 kV. V momentě poklesu napětí U_{vlak} pod hodnotu 27,5 kV je opět povolena rekuperace a výkon je znovu dodáván do TS. Mechanický výkon vlaku je v čase 65 sekund lineárně zvyšován z hodnoty -5 MW na nulovou hodnotu, což je způsobeno mechanickým pohybem vlaku dle pohybové rovnice. Po zastavení vlaku je hodnota napětí U_{vlak} rovna 25 kV (oranžová křivka v grafu efektivních hodnot napětí).

7. SYNCHRONIZACE VÍCE SFC JEDNOTEK V TS 25 kV 50 Hz

Synchronizace napětí TS představuje provozní vlastnost SFC měniče přispívající ke zlepšení podmínek napájení TS 25 kV 50 Hz. Jedná se o synchronizaci úhlů napětí dvou sousedících úseků trakčního vedení, které jsou oddělené neutrálním polem nebo spínací stanicí a každý z nich je napájen jinou TNS. Pokud je úhel napětí jednoho úseku trakčního vedení synchronizován s úhlem napětí sousedícího úseku v místě dělení, je možné spínací stanicí tyto úseky trakčního vedení propojit a realizovat tak oboustranné napájení trakčního vedení prostřednictvím dvou sousedících TNS, což má za následek snížení hodnoty úbytku napětí trakčního vedení a rozložení zatížení na více TNS.

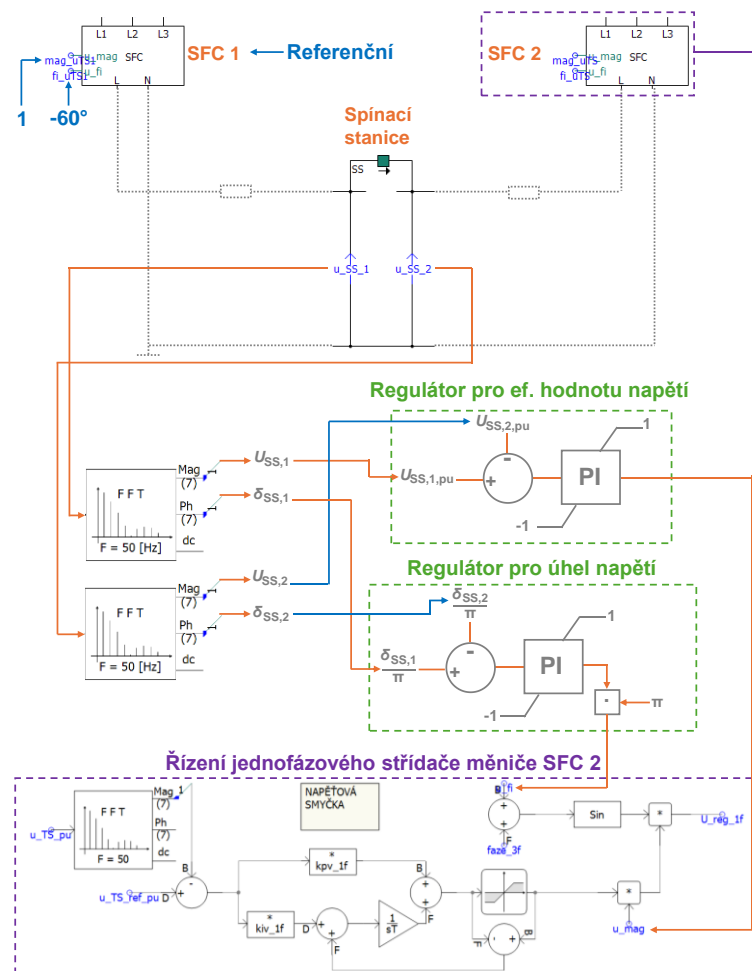
Pro realizaci synchronizace napětí dvou sousedících úseků trakčního vedení je vytvořen v programu PSCAD scénář (viz. obrázek 41) obsahující model DS 110 kV se dvěma připojenými modely SFC měničů, vzdálené od sebe 50 km, což je řádově v souladu se vzdáleností reálných TNS. Každý model SFC měniče napájí jeden úsek trakčního vedení o délce 25 km, které jsou oddělené vypínačem reprezentující spínací stanicí. Na konci druhého úseku trakčního vedení je umístěn model Loko 3, který se z hlediska impedančního rozdělení obou úseků trakčního vedení nachází v místě dělení u spínací stanice.



Obrázek 41 Schéma pro synchronizaci napětí TS 25 kV 50 Hz.

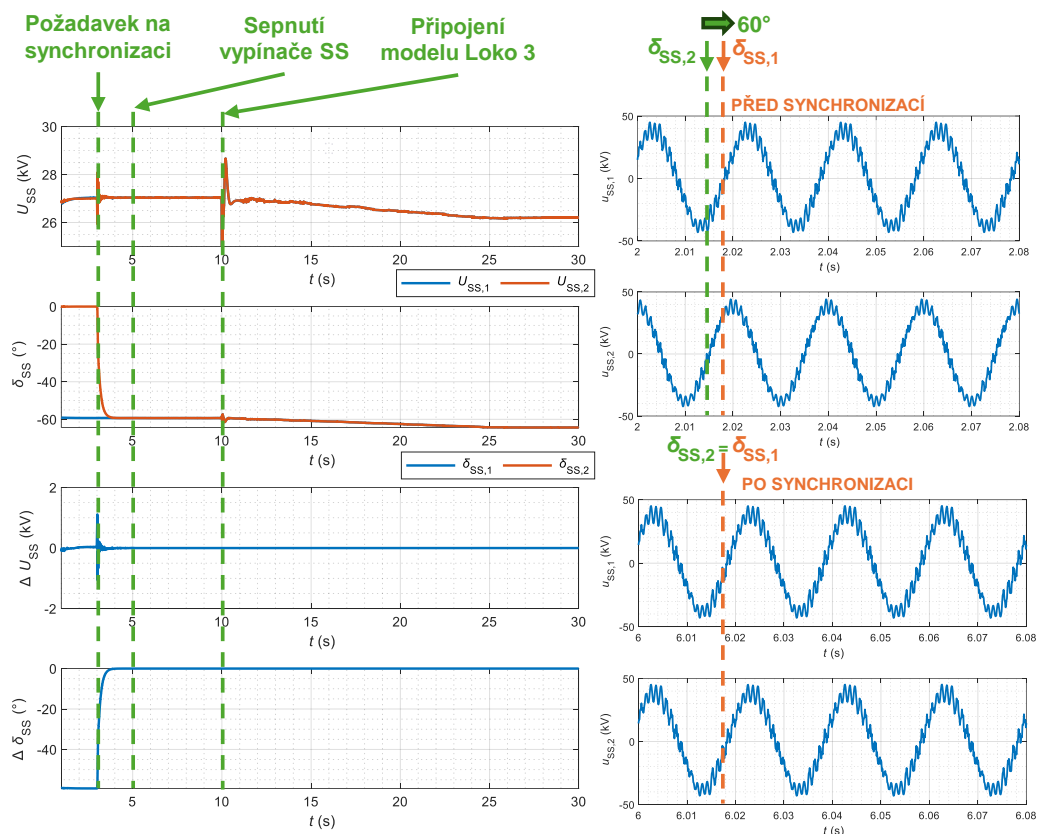
Pro implementaci procesu synchronizace napětí TS 25 kV 50 Hz pro model SFC měniče (viz. obrázek 42) je nezbytná znalost měřených okamžitých hodnot napětí na každé straně spínací stanice $u_{SS,1}$ a $u_{SS,2}$. Model měniče SFC 1 je definován jako referenční zdroj napětí pro napájení levého úseku trakčního vedení (master) a model měniče SFC 2 je

synchronizován na napětí SFC 1 pro napájení levého úseku trakčního vedení (slave). V důsledku toho jsou pro model měniče SFC 2 vytvořeny dva PI regulátory: 1) pro regulaci velikosti úhlu napětí průběhu $u_{SS,2}$ a 2) pro regulaci efektivní hodnoty napětí průběhu $u_{SS,2}$. Prostřednictvím bloku „FFT“ jsou z okamžitých hodnot průběhu napětí na obou stranách spínací stanice $u_{SS,1}$ a $u_{SS,2}$ měřeny efektivní hodnoty napětí $U_{SS,1}$ a $U_{SS,2}$ na základní harmonické a také velikosti úhlů těchto napětí $\delta_{SS,1}$ a $\delta_{SS,2}$. Do PI regulátoru pro regulaci $U_{SS,2}$ vstupuje žádaná efektivní hodnota napětí, měřena na levé straně spínací stanice $U_{SS,1}$ v poměrných jednotkách. Do PI regulátoru pro regulaci velikosti úhlu $\delta_{SS,2}$ je žádanou hodnotou velikost úhlu napětí na levé straně spínací stanice $\delta_{SS,1}$. Pokud není synchronizace vyžadována a jsou úseky trakčního vedení trvale odděleny, jsou žádanými hodnotami do PI regulátorů efektivní hodnota napětí trakčního napaječe 27 kV a velikost úhlu 0° . Výstupy z jednotlivých regulátorů jsou zavedeny do řízení jednofázového střídače modelu měniče SFC 2. V případě regulátoru pro regulaci $\delta_{SS,2}$ je výstupní hodnota přičtena k synchronizované fázi θ z fázového závěsu SFC měniče. U regulátoru pro regulaci $U_{SS,2}$ je výstupní hodnota v poměrných jednotkách vynásobena hodnotou v poměrných jednotkách z PI regulátoru jednofázového střídače. V důsledku použití hodnot v poměrných jednotkách z výstupu PI regulátoru pro regulaci efektivní hodnoty napětí je v případě potřeby synchronizace přivedena do řízení střídače hodnota napětí $U_{SS,1}$ v poměrných jednotkách. Pakliže není nutné provádět synchronizaci, je do řízení střídače přivedena hodnota 1, čímž je zajištěno požadované napětí na výstupu trakčního napaječe 27 kV bez ohledu na odebíraný výkon vlaku a hodnotě napětí $U_{SS,2}$.



Obrázek 42 Implementace procesu synchronizace napětí pro model měniče SFC 2.

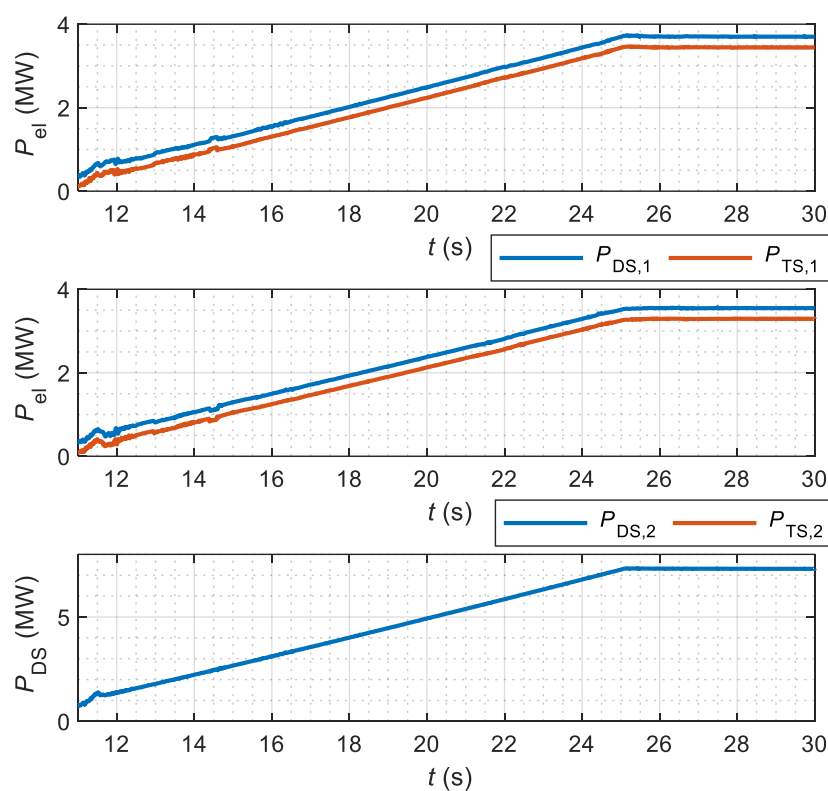
Ve výchozím stavu simulace synchronizace napětí TS 25 kV 50 Hz jsou připojeny oba modely SFC 1 a SFC 2 do TS (červená barva indikace vypínače TNS11 a TNS21) a vypínač spínací stanice je ve vypnuté poloze (zelená barva indikace vypínače SS). Do modelu Loko 3 je na vstup obvodu trakční výzbroje implementován vypínač s nastavenou dobou sepnutí v čase 10 sekund od počátku simulace. Tím je docíleno stavu, kdy se v simulovaném úseku tratě nevyskytuje vlak, odebírající výkon z TS a oba úseky trakčního vedení jsou ve stavu naprázdno. Efektivní hodnota napětí měniče SFC 1 a SFC 2 je nastavena na hodnotu 27 kV. Pro testování procesu synchronizace s patřným výsledkem změny velikosti úhlů napětí je nastaven rozdíl úhlů na 60° . Zobrazené průběhy efektivních hodnot napětí a úhlů spínací stanice jsou na obrázku 43.



Obrázek 43 Průběhy efektivních hodnot napětí a úhlů napětí spínací stanice.

Po spuštění simulace je model Loko 3 ve výchozím stavu odpojen od TS 25 kV 50 Hz do doby simulace 10 sekund. Celková doba simulace je nastavena na hodnotu 30 sekund, přičemž proces synchronizace napětí TS 25 kV 50 Hz je zahájen v čase 3 sekund, kdy je zadán požadavek na synchronizaci. V grafu pro efektivní hodnoty napětí spínací stanice U_{SS} jsou průběhy napětí efektivních hodnot na obou stranách spínací stanice $U_{SS,1}$ a $U_{SS,2}$ téměř totožné, což je vyjádřeno jejich rozdílem v příslušném grafu pro rozdíl efektivních hodnot ΔU_{SS} , kde je patrná téměř nulová odchylka. Měřená hodnota velikosti úhlu napětí na pravé straně spínací stanice $\delta_{SS,2}$ (oranžová křivka) v grafu pro měření velikosti úhlů napětí spínací stanice δ_{SS} je v důsledku aktivace regulátoru nastavena hodnota úhlu napětí $\delta_{SS,2}$ na hodnotu úhlu napětí levé strany spínací stanice $\delta_{SS,1}$ (modrá křivka). V důsledku toho je naměřena nulová odchylka těchto úhlů napětí v grafu pro měření rozdílu úhlů napětí spínací stanice $\Delta \delta_{SS}$. Po dosažení nulových odchylek jak v efektivní hodnotě napětí, tak v úhlech napětí je v čase 5 sekund sepnut vypínač spínací stanice, čímž je realizováno oboustranné napájení vzniklé dvojice úseků trakčního vedení. Po uplynutí doby 10 sekund je připojen model Loko 3 do místa spojení sousedících úseků trakčního vedení a je zadán požadavek na zvýšení mechanického výkonu lokomotivy na nominální hodnotu 6,4 MW prostřednictvím žádaného zrychlení, čehož je dosaženo v čase cca 25 sekund. Postupný nárůst odběru výkonu vlaku je projevem klesajícího napětí v místě

spínací stanice v čase od 10 do 30 sekund v grafu U_{SS} . V pravé části obrázku 43 jsou zobrazeny průběhy okamžitých hodnot napětí v místě spínací stanice $u_{SS,1}$ a $u_{SS,2}$ ve stavu před synchronizací a po synchronizaci. Z grafu ve stavu před synchronizací je patrný rozdíl úhlů napětí v místě spínací stanice 60° , který je nutné vyrovnat prostřednictvím regulátoru na úhel napětí modelu měniče SFC 2. Stav vyrovnání velikosti úhlu $\delta_{SS,2}$ na hodnotu velikosti úhlu $\delta_{SS,1}$ je zobrazen v grafu pro stav po synchronizaci, kde jsou oba průběhy napětí ve fázi a požadovaný stav synchronizace napětí je splněn. Prostřednictvím oboustranného napájení trakčního vedení je docíleno rozdělení zatížení na jednotlivé TNS podle impedančních poměrů TS 25 kV 50 Hz a DS 110 kV (viz. obrázek 44). Tento cíl může mít pozitivní vliv na zatížení jednotlivých TNS z hlediska eliminace možného přetížení určité TNS prostřednictvím řízení úhlů napětí protilehlých měničů SFC.



Obrázek 44 Průběhy zatížení jednotlivých měničů SFC ze strany DS a TS při oboustranném napájení.

V horním grafu jsou znázorněny průběhy zatížení modelu měniče SFC 1 ze strany DS 110 kV v místě připojení (modrá křivka) a TS 25 kV 50 Hz (oranžová křivka). V čase 10 sekund po připojení modelu Loko 3 do TS je mechanický výkon lokomotivy zvyšován na hodnotu výkonu 6,4 MW, což je projevem zatížení 3,45 MW měniče SFC 1 ze strany TS (oranžová křivka) a 3,7 MW ze strany DS 110 kV v místě připojení (modrá křivka) v době 25 až 30 sekund. V prostředním grafu jsou uvedeny tytéž průběhy pro model měniče SFC 2, kterým je provedena synchronizace úhlů napětí v místě spínací stanice. Ze strany TS je naměřeno zatížení měniče SFC 2 3,3 MW (oranžová křivka) a ze strany

DS 3,55 MW v místě připojení (modrá křivka) v čase simulace 25 až 30 sekund. Celková hodnota zatížení, měřena v DS 110 kV v místě za napěťovým zdrojem je rovna 7,3 MW, která je rovna součtu zatížení jednotlivých TNS a ztrát činného výkonu na vedení modelu DS 110 kV [36].

8. ZÁVĚR

Diplomová práce byla vytvořena za účelem porovnání jednotlivých technologií trakčních napaječů pro napájení TS 25 kV 50 Hz z hlediska zpětných vlivů na DS. Hlavní cíl diplomové práce spočíval ve vytvoření obecných modelů trakčních napaječů, reprezentující technologie reálných trakčních napaječů pro napájení TS 25 kV 50 Hz. Dle teoretických znalostí a informací o jednotlivých technologiích trakčních napaječů byly vybrány 3 technologie pro modelování v programu PSCAD, které svým chováním vytvoří dostatečný kontrast pro závěrečné porovnání daných technologií z hlediska zpětných vlivů na DS. První vybranou technologií byl jednofázový transformátor 110/27 kV v zapojení do „T“, jakožto zástupce konvenčního systému napájení. Druhou technologií byl jednofázový transformátor 110/27 kV v zapojení do „V“, kterým je tvořena většina TNS v ČR a který byl také vybrán pro ověření větší symetričnosti odběru v porovnání s transformátorem v zapojení do „T“. Třetí technologií byl statický frekvenční měnič SFC, jakožto zástupce aktivních trakčních napaječů. Pro jednotlivé technologie byly vytvořeny zjednodušené parametrizovatelné elektrické modely se zachováním principu funkce dle reálné technologie daného napaječe, přičemž pro posouzení zpětných vlivů na distribuční síť je zjednodušená topologie daných modelů dostatečná. Pro testování funkce vytvořených modelů trakčních napaječů byl vytvořen parametrizovatelný model realistické testovací DS 110 kV s vedením se soustředěnými parametry v podobě souměrného π -článku. Pro simulaci realistického provozu TS 25 kV 50 Hz byl použit zjednodušený model lokomotivy s názvem Loko 3, reprezentující zástupce moderních hnacích vozidel s polovodičovou technologií, do kterého byla implementována realistická data dle grafikonu provozu. Při provozu modelu jednofázového transformátoru v zapojení do „T“ byl potvrzen očekávaný výskyt největší nesymetrie napětí v místě připojení do DS prostřednictvím činitele napěťové nesymetrie u_2 , přičemž v době maximálního zatížení došlo také k překročení plánovací úrovně pro tento činitel. V případě transformátoru v zapojení do „V“ byla potvrzena větší symetričnost odběru, přičemž byla do simulace zahrnuta nesoudobost odběrů ze dvou sousedních úseků trakčního vedení. Z hlediska vyšších harmonických složek napětí byly hodnoceny jednotlivé úrovně napětí na vyšších harmonických u_h a celkový činitel harmonického zkreslení THD_U . Z hodnocení harmonické analýzy vyplynulo, že varianta s transformátorem zapojeným do „V“ je nejhorší variantou, kde bylo také dosaženo nejvyšší hodnoty THD_U s překročením plánovací úrovně. Z hlediska rychlých změn napětí nedošlo u žádného modelu napaječe k detekci poklesu či zvýšení napětí a z hlediska rychlých změn napětí jsou všechny varianty vyhovující pro posouzení připojitelnosti. U modelu SFC měniče bylo ukázáno jeho použití nad rámec napájení TS 25 kV 50 Hz pro frekvenční podpůrné sužby s ukázkou principu funkce při změně frekvence v síti. Touto změnou frekvence byla simulována změna odebíraného výkonu lokomotivy a simulačním scénářem bylo zjištěno, že při změně frekvence v síti není

výrazně omezena plynulost železniční dopravy, což může být rozhodujícím kritériem pro poskytování této podpůrné služby. Dále byl u modelu SFC měniče ukázán algoritmus pro synchronizaci napětí sousedních úseků trakčního vedení a ukázána realizace oboustranného napájení prostřednictvím dvou modelů SFC měniče, což může mít pozitivní vliv na zatížení jednotlivých TNS. V případě přetížení určité TNS by bylo možné toto přetížení eliminovat prostřednictvím řízení úhlů napětí protilehlých měničů SFC, což by mohlo být předmětem navazujících studií.

Přínosem diplomové práce je sada tří parametrizovatelných modelů trakčních napaječů pro analýzu zpětných vlivů na DS s respektováním dynamiky provozu TS 25 kV 50 Hz. Modely trakčních napaječů lze použít ke studiu posouzení připojitelnosti nejen do DS sítě 110 kV, ale také do jiných typů sítí (zvn, případně vn). Může být zkoumána interakce mezi trakčními napaječi a hnacím vozidlem nebo mezi jinými typy trakčních napaječů. Pomocí modelů lze také ověřit přínos agregovaných podpůrných služeb a jejich vliv na provoz trakční soustavy. Dále lze modely trakčních napaječů použít pro analýzu zpětných vlivů do přenosové soustavy při testování provozu vysokorychlostních tratí při vhodné parametrizaci modelů napaječů a modelu lokomotivy. Díky univerzálnosti modelu SFC měniče lze při simulaci chodu DS s požadavkem na dodávku/odběr jalového výkonu do/z DS vyhodnotit vliv jalového výkonu na velikost napětí v místě připojení DS, což by mohlo být také předmětem navazujících studií.

SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK

Zkratky:

AC	Alternating Current (Střídavý proud)
Bz	Bronz
Cu	Měď
CDF	Cumulative Distribution Function (Kumulativní funkce pravděpodobnosti)
ČR	Česká republika
DC	Direct Current (Stejnoseměrný proud)
DS	Distribuční soustava
FFT	Fast Fourier Transform (Rychlá Fourierova transformace)
FKZ	Filtračně-kompenzační zařízení
IGBT	Insulated Gate Bipolar Transistor (Bipolární tranzistor s izolovaným hradlem)
LC	Induktivně-kapacitní obvod
LS-PWM	Level-Shifted Pulse-Width Modulation (Pulzně šířková modulace s posuvem úrovně)
PS-PWM	Phase-Shifted Pulse-Width Modulation (Pulzně šířková modulace s posuvem fáze)
RVC	Rapid Voltage Change (Rychlá změna napětí)
SFC	Static Frequency Converter (Statický frekvenční měnič)
SM	Submodul
SPWM	Sinusoidal Pulse-Width Modulation (Sinusová pulzně šířková modulace)
SS	Spínací stanice
STATCOM	Static Synchronous Compensator (Statický synchronní kompenzátor)
SVC	Static Var Compensator (Statický var kompenzátor)
SVM	Space Vector Modulation (Modulace prostorového vektoru)
THD	Total Harmonic Distortion (Celkové harmonické zkreslení)
TNS	Trakční napájecí stanice
TS	Trakční soustava
vn	Vysoké napětí
vvn	Velmi vysoké napětí
zvn	Zvlášť vysoké napětí

Symbols:

\bar{a}	operátor natočení	(-)
a_o	činitel udávající bod ohybu v charakteristice pro omezení proudu vlaku	(-)
B_L	induktivní susceptance tlumivky	(S)
B_C	kapacitní susceptance kondenzátoru	(S)
$C_{k,110}$	kapacita vedení 110 kV na 1 km délky vedení	(F/km)
f	aktuální frekvence sítě	(Hz)
f_n	systémová frekvence	(Hz)
Δf	změna frekvence sítě	(Hz)
G_{L12}	odporová zátěž (vodivost) mezi fází L1 a L2	(S)
h	řád harmonické složky	(-)
i_2	součinitel nesymetrie proudu	(%)
i_a	okamžitá hodnota proud fáze A sekundárního vinutí transformátoru SFC měniče	(A)
i_b	okamžitá hodnota proud fáze B sekundárního vinutí transformátoru SFC měniče	(A)
i_c	okamžitá hodnota proud fáze C sekundárního vinutí transformátoru SFC měniče	(A)
i_d	proud sekundárního vinutí transformátoru v d-souřadnici	(-)
$i_{d,ref}$	referenční hodnota proudu sekundárního vinutí transformátoru v d-souřadnici	(-)
I_{ef}	efektivní hodnota proudu zkresleného průběhu	(A)
I_{max}	efektivní hodnota maximálního proudu vlaku	(A)
I_n	nominální proud vlaku	(A)
I_I	velikost sousl. složky proudu na první harmon.	(A)
I_{II}	velikost zpět. složky proudu na první harmon.	(A)
\bar{I}_{L1}	proud fáze L1	(A)
\bar{I}_{L2}	proud fáze L2	(A)
\bar{I}_{L3}	proud fáze L3	(A)
\bar{I}_{L12}	proud mezi fází L1 a L2	(A)
\bar{I}_{L23}	proud mezi fází L2 a L3	(A)
\bar{I}_{L31}	proud mezi fází L3 a L1	(A)
i_q	proud sekundárního vinutí transformátoru v q-souřadnici	(-)
$i_{q,ref}$	referenční hodnota proudu sekundárního vinutí transformátoru v q-souřadnici	(-)
$I_{pomocný}$	efektivní hodnota proudu vlaku, při kterém není vykonávána trakce	(A)

I_{rekup}	proud proudového zdroje při rekuperaci	(A)
I_{RMS}	efektivní hodnota proud	(A)
\bar{I}_{SFC}	fázor ef. hod. odebíraného proudu trakč. napaječe	(A)
I_{vlak}	efektivní hodnota odebíraného proudu vlaku	(A)
k	koeficient určující strmost charakteristiky časové závislosti maximálního napětí TS	(-)
K_i	integrační zesílení PI regulátoru fáz. závěsu	(-)
K_{iv}	integrační zesílení PI regulátoru řídicí struktury SFC měniče	(-)
K_p	proporcionální zesílení PI regulátoru fáz. závěsu	(-)
K_{pv}	proporcionální zesílení PI regulátoru řídicí struktury SFC měniče	(-)
k_z	žádané zrychlení vlaku	(-)
l_{110}	délka vedení 110 kV	(m)
l_{25}	délka trakčního vedení	(m)
L_f	indukčnost vstupního filtru SFC měniče	(H)
l_{vlak}	vzdálenost vlaku od trakčního napaječe	(m)
M	mechanický moment hnacího vozidla	(Nm)
m	řád meziharmonické	(-)
n	počet úrovní střídače	(-)
$+P$	dodávaný činný výkon (dodávková zn. konv.)	(W)
$+P$	odebíraný činný výkon (spotřebitel. zn. konv.)	(W)
$-P$	dodávaný činný výkon (spotřebitel. zn. konv.)	(W)
$-P$	odebíraný činný výkon (dodávková zn. konv.)	(W)
$P_{0,1}$	úroveň blikání překročená po 0,1 % doby během periody pozorování	(-)
$P_{0,7}$	úroveň blikání překročená po 0,7 % doby během periody pozorování	(-)
P_1	úroveň blikání překročená po 1 % doby během periody pozorování	(-)
$P_{1,5}$	úroveň blikání překročená po 1,5 % doby během periody pozorování	(-)
P_{10}	úroveň blikání překročená po 10 % doby během periody pozorování	(-)
P_{10S}	vyhlazená úrov. blikání překročená po 10 % doby během periody pozorování	(-)
P_{13}	úroveň blikání překročená po 13 % doby během periody pozorování	(-)
P_{17}	úroveň blikání překročená po 17 % doby během periody pozorování	(-)

P_{1S}	vyhlazená úrov. blikání překročená po 1 % doby během periody pozorování	(-)
$P_{2,2}$	úroveň blikání překročená po 2,2 % doby během periody pozorování	(-)
P_3	úroveň blikání překročená po 3 % doby během periody pozorování	(-)
P_{30}	úroveň blikání překročená po 30 % doby během periody pozorování	(-)
P_{3S}	vyhlazená úrov. blikání překročená po 3 % doby během periody pozorování	(-)
P_4	úroveň blikání překročená po 4 % doby během periody pozorování	(-)
P_{50}	úroveň blikání překročená po 50 % doby během periody pozorování	(-)
P_{50S}	vyhlazená úrov. blikání překročená po 50 % doby během periody pozorování	(-)
P_6	úroveň blikání překročená po 6 % doby během periody pozorování	(-)
P_8	úroveň blikání překročená po 8 % doby během periody pozorování	(-)
P_{80}	úroveň blikání překročená po 80 % doby během periody pozorování	(-)
P_{DS}	odebíraný/dodávaný výkon z/do distribuční sítě	(W)
$P_{DS,1}$	odebíraný/dodávaný výkon z/do distribuční soustavy v případě napájení měničem SFC 1	(W)
$P_{DS,2}$	odebíraný/dodávaný výkon z/do distribuční soustavy v případě napájení měničem SFC 2	(W)
P_{dDS}	dodávaný činný výkon do distribuční soustavy	(W)
P_{dTTS}	dodávaný činný výkon do trakční soustavy	(W)
P_{el}	elektrický výkon	(W)
P_{lt}	dlouhodobá míra vjemu blikání	(-)
P_{mech}	mechanický výkon lokomotivy	(W)
$P_{mech,pu}$	mechanický výkon lokomotivy v poměrných jednotkách	(-)
P_{oDS}	odebíraný činný výkon z distribuční soustavy	(W)
P_{oTTS}	odebíraný činný výkon z trakční soustavy	(W)
P_{st}	krátkodobá míra vjemu blikání	(-)
P_{st_i}	krátkodobá míra vjemu blikání každého desetiminutového intervalu	(-)
P_{TS}	odebíraný/dodávaný výkon z/do trakční soustavy	(W)

$P_{TS,1}$	odebíraný/dodávaný výkon z/do trakční soustavy v případě napájení měničem SFC 1	(W)
$P_{TS,2}$	odebíraný/dodávaný výkon z/do trakční soustavy v případě napájení měničem SFC 2	(W)
$+Q$	dodávaný jalový výkon (dodávková zn. konv.)	(VAr)
$+Q$	odebíraný jalový výkon (spotřebitel. zn. konv.)	(VAr)
$-Q$	dodávaný jalový výkon (spotřebitel. zn. konv.)	(VAr)
$-Q$	odebíraný jalový výkon (dodávková zn. konv.)	(VAr)
Q_{dDS}	dodávaný jalový výkon do distribuční soustavy	(VAr)
Q_{dTS}	dodávaný jalový výkon do trakční soustavy	(VAr)
Q_{oDS}	odebíraný jalový výkon z distribuční soustavy	(VAr)
Q_{oTS}	odebíraný jalový výkon z trakční soustavy	(VAr)
R_{110}	rezistance vedení 110 kV	(Ω)
$R_{k,110}$	rezistance vedení 110 kV na 1 km délky vedení	(Ω /km)
$R_{k,25}$	rezistance trakč. vedení na 1 km délky vedení	(Ω /km)
S_k''	zkratový výkon DS 110 kV	(VA)
t	čas	(s)
$THDU$	činitel harmonického zkreslení napětí	(%)
u_2	součinitel nesymetrie napětí	(%)
u_a	okamžitá hodnota fázového napětí fáze A sekundárního vinutí transformátoru SFC měniče	(V)
u_b	okamžitá hodnota fázového napětí fáze B sekundárního vinutí transformátoru SFC měniče	(V)
u_c	okamžitá hodnota fázového napětí fáze C sekundárního vinutí transformátoru SFC měniče	(V)
U_1	efektivní hodnota napětí na první harmonické	(V)
Δu	procentuální změna napětí	(%)
U_{DC}	napětí kondenzátoru DC meziobvodu	(V)
$U_{DC,ref}$	referenční hodnota napětí kondenzátoru DC meziobvodu	(V)
$+U_{DC}$	kladné napětí kondenzátoru DC meziobvodu	(V)
$U_{DC}/2$	poloviční napětí kondenzátoru DC meziobvodu	(V)
$+U_{DC}/2$	kladné poloviční napětí kondenzátoru DC meziobvodu	(V)
$+U_{DC}/4$	kladné čtvrtinové napětí kondenzátoru DC meziobvodu	(V)
$-U_{DC}$	záporné napětí kondenzátoru DC meziobvodu	(V)
$-U_{DC}/2$	záporné poloviční napětí kondenzátoru DC meziobvodu	(V)

$-U_{DC}/4$	záporné čtvrtinové napětí kondenzátoru DC meziobvodu	(V)
U_{din}	efektivní hodnota napětí klouzavého průměru	(V)
u_h	procentuální efektivní hodnota napětí na dané harmonické	(%)
U_h	efektivní hodnota napětí na dané harmonické	(V)
\bar{U}_0	fázor netočivé složky napětí první harmonické	(V)
\bar{U}_A	fázor napětí fáze A	(V)
\bar{U}_{A0}	fázor netočivé složky napětí fáze A	(V)
\bar{U}_{AI}	fázor sousledné složky napětí fáze A	(V)
\bar{U}_{AII}	fázor zpětné složky napětí fáze A	(V)
\bar{U}_B	fázor napětí fáze B	(V)
\bar{U}_{B0}	fázor netočivé složky napětí fáze B	(V)
\bar{U}_{BI}	fázor sousledné složky napětí fáze B	(V)
\bar{U}_{BII}	fázor zpětné složky napětí fáze B	(V)
\bar{U}_C	fázor napětí fáze C	(V)
\bar{U}_{C0}	fázor netočivé složky napětí fáze C	(V)
\bar{U}_{CI}	fázor sousledné složky napětí fáze C	(V)
\bar{U}_{CII}	fázor zpětné složky napětí fáze C	(V)
\bar{U}_I	fázor sousledné složky napětí první harmonické	(V)
\bar{U}_{II}	fázor zpětné složky napětí první harmonické	(V)
\bar{U}_{L12}	fázor sdruženého napětí mezi fází L1 a L2	(V)
\bar{U}_{L23}	fázor sdruženého napětí mezi fází L2 a L3	(V)
\bar{U}_{L31}	fázor sdruženého napětí mezi fází L3 a L1	(V)
U_I	velikost sousl. složky napětí na první harmon.	(V)
U_{II}	velikost zpět. složky napětí na první harmon.	(V)
u_m	procentuální efektivní hodnota napětí na dané mezharmónické	(%)
U_m	efektivní hodnota napětí na dané mezharmónické	(V)
U_{max1}	nejvyšší trvalé napětí v místě vlaku	(V)
U_{max2}	nejvyšší krátkodobé napětí v místě vlaku	(V)
U_{max3}	nejvyšší dlouhodobé přepětí v čase 20 ms v místě vlaku	(V)
U_{min2}	nejnižší krátkodobé napětí v místě vlaku	(V)
$U_{n,110}$	jmenovité napětí DS 110 kV	(V)
U_n	nominální napětí v místě vlaku	(V)
U_{RMS}	efektivní hodnota napětí	(V)
$\bar{U}_{SFC,žád}$	fázor žádané efektivní hodnoty napětí trakčního napaječe	(V)

$U_{SFC,žád}$	žádaná efektivní hodnoty napětí trakč. napaječe	(V)
u_{SS}	okamžitá hodnota napětí v místě spínací stanice	(V)
$u_{SS,1}$	okamžitá hodnota napětí na levé straně v místě spínací stanice	(V)
$u_{SS,2}$	okamžitá hodnota napětí na pravé straně v místě spínací stanice	(V)
U_{SS}	efektivní hodnota napětí v místě spínací stanice	(V)
$U_{SS,1}$	efektivní hodnota napětí na levé straně v místě spínací stanice	(V)
$U_{SS,2}$	efektivní hodnota napětí na pravé straně v místě spínací stanice	(V)
$U_{SS,1,pu}$	efektivní hodnota napětí na levé straně v místě spínací stanice v poměrných jednotkách	(-)
$U_{SS,2,pu}$	efektivní hodnota napětí na pravé straně v místě spínací stanice v poměrných jednotkách	(-)
$\Delta U_{SFC,žád}$	změna žád. ef. hodnoty napětí trakč. napaječe	(V)
ΔU_{SS}	rozdíl efektivních hodnot napětí v místě spínací stanice	(V)
$\Delta U_{vlak,žád}$	změna žád. ef. hodnoty napětí v místě vlaku	(V)
$\Delta \bar{U}_{TV}$	fázor úbytku napětí trakčního vedení	(V)
ΔU_{TV}	úbytek napětí na úseku trakčního vedení	(V)
U_{TS}	efektivní hodnota napětí TS 25 kV 50 Hz	(V)
$U_{TS,ref}$	ref. efektivní hodnota napětí TS 25 kV 50 Hz	(V)
U_{vlak}	efektivní hodnota napětí v místě vlaku	(V)
$\bar{U}_{vlak,žád}$	fázor žád. efektivní hodnoty napětí v místě vlaku	(V)
$U_{vlak,žád}$	žádaná efektivní hodnoty napětí v místě vlaku	(V)
u_{vmA}	okamžitá hodn. napětí modulačního signálu A	(V)
u_{vmB}	okamžitá hodn. napětí modulačního signálu B	(V)
$u_{výst}$	okamžitá hodn. výstupní modulované napětí	(V)
V_x	výsledný vektor napětí x-té spínací operace	(V)
V_1	výsledný vektor napětí první spínací operace	(V)
V_2	výsledný vektor napětí druhé spínací operace	(V)
V_3	výsledný vektor napětí třetí spínací operace	(V)
V_4	výsledný vektor napětí čtvrté spínací operace	(V)
V_5	výsledný vektor napětí páté spínací operace	(V)
V_6	výsledný vektor napětí šesté spínací operace	(V)
V_7	výsledný vektor napětí sedmé spínací operace	(V)
V_8	výsledný vektor napětí osmé spínací operace	(V)
v_d	napětí sekundárního vinutí transformátoru v d-souřadnici	(-)

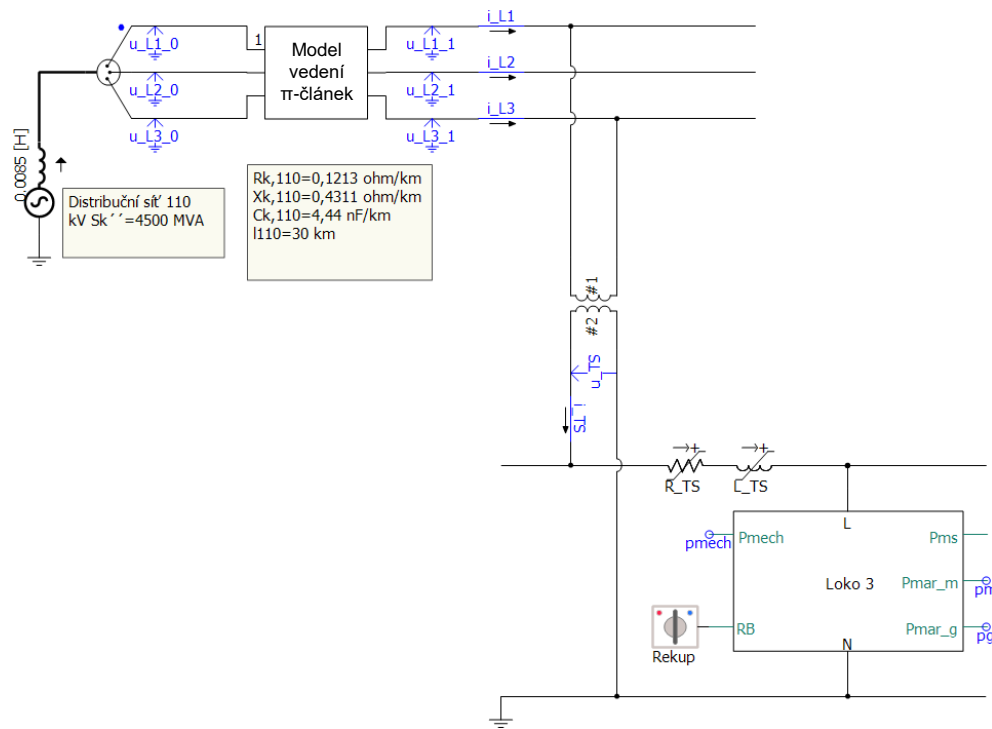
v_q	napětí sekundárního vinutí transformátoru v q-souřadnici	(-)
v_{\sin}	okamžitá hodnota napětí sinusového modulačního signálu	(V)
v_{t1}	okamžitá hodn. napětí trojúhelníkového nosného signálu 1	(V)
v_{t2}	okamžitá hodn. napětí trojúhelníkového nosného signálu 2	(V)
X_{110}	reaktance vedení 110 kV	(Ω)
$X_{k,110}$	reaktance vedení 110 kV na 1 km délky vedení	(Ω/km)
$X_{k,25}$	reaktance trakč. vedení na 1 km délky vedení	(Ω/km)
X_L	induktivní reaktance	(Ω)
\bar{Z}_{110}	podélná impedance vedení 110 kV	(Ω)
$\bar{Z}_{k,25}$	fázor impedance trakč vedení na 1 km vedení	(Ω/km)
\bar{Y}_{110}	příčná admitance vedení 110 kV	(S)
α	úhel otevření tyristoru	($^\circ$)
δ_{SS}	velikost úhlu napětí v místě spínací stanice	($^\circ$)
$\Delta\delta_{SS}$	rozdíl úhlů napětí v místě spínací stanice	($^\circ$)
$\delta_{SS,1}$	velikost úhlu napětí na levé straně v místě spínací stanice	($^\circ$)
$\delta_{SS,2}$	velikost úhlu napětí na pravé straně v místě spínací stanice	($^\circ$)
θ	synchronizovaná fáze DS 110 kV	(rad)
ω	úhlová rychlost nápravy	($\text{rad}\cdot\text{s}^{-1}$)
ω_{DS}	úhlový kmitočet sítě	($\text{rad}\cdot\text{s}^{-1}$)
ω_s	úhlová rychlost točení fázorů	($\text{rad}\cdot\text{s}^{-1}$)

SEZNAM PŘÍLOH

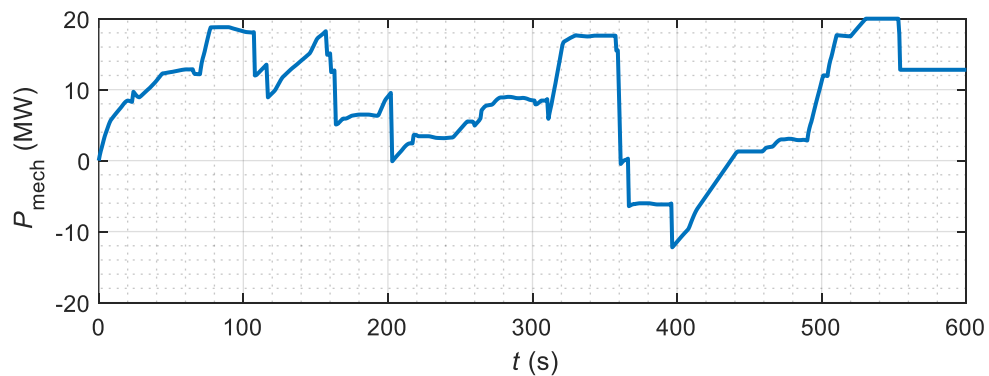
PŘÍLOHA A - SCHÉMA PŘIPOJENÍ MODELŮ TRAKČNÍCH NAPAJEČŮ.....	88
PŘÍLOHA B - RYCHLÉ ZMĚNY NAPĚTÍ A FLIKR.....	91
PŘÍLOHA C - HARMONICKÉ ZKRESLENÍ NAPĚTÍ.....	94
PŘÍLOHA D - NESYMETRIE NAPĚTÍ.....	100

Příloha A - Schéma připojení modelů trakčních napaječů

A.1 Jednofázový transformátor 110/27 kV v zapojení do „T“

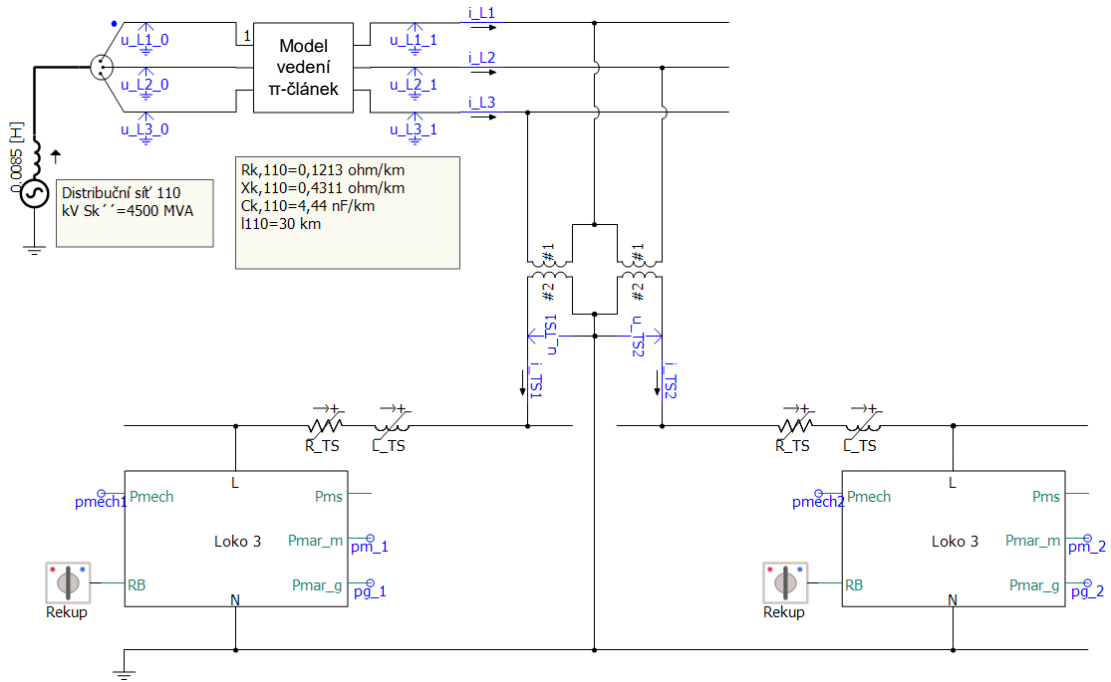


Obrázek 45 Schéma připojení modelu transformátoru 110/27 kV v zapojení do „T“ do DS.

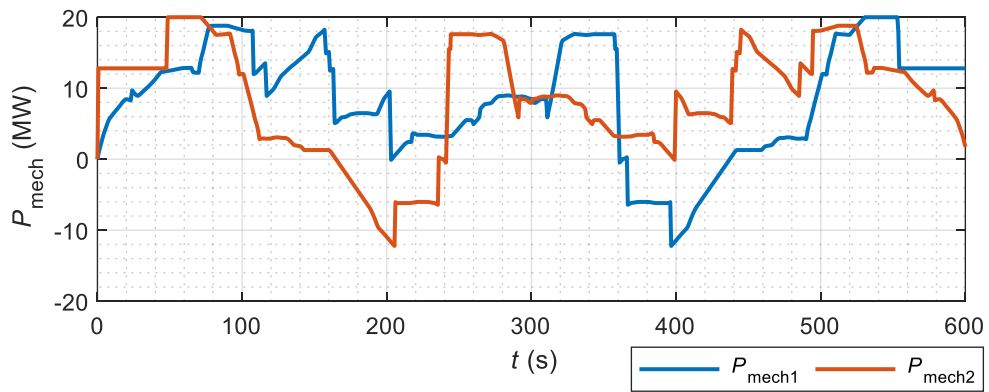


Obrázek 46 Profil mechanického výkonu pro simulaci realistického provozu.

A.2 Jednofázový transformátor 110/27 kV v zapojení do „V“

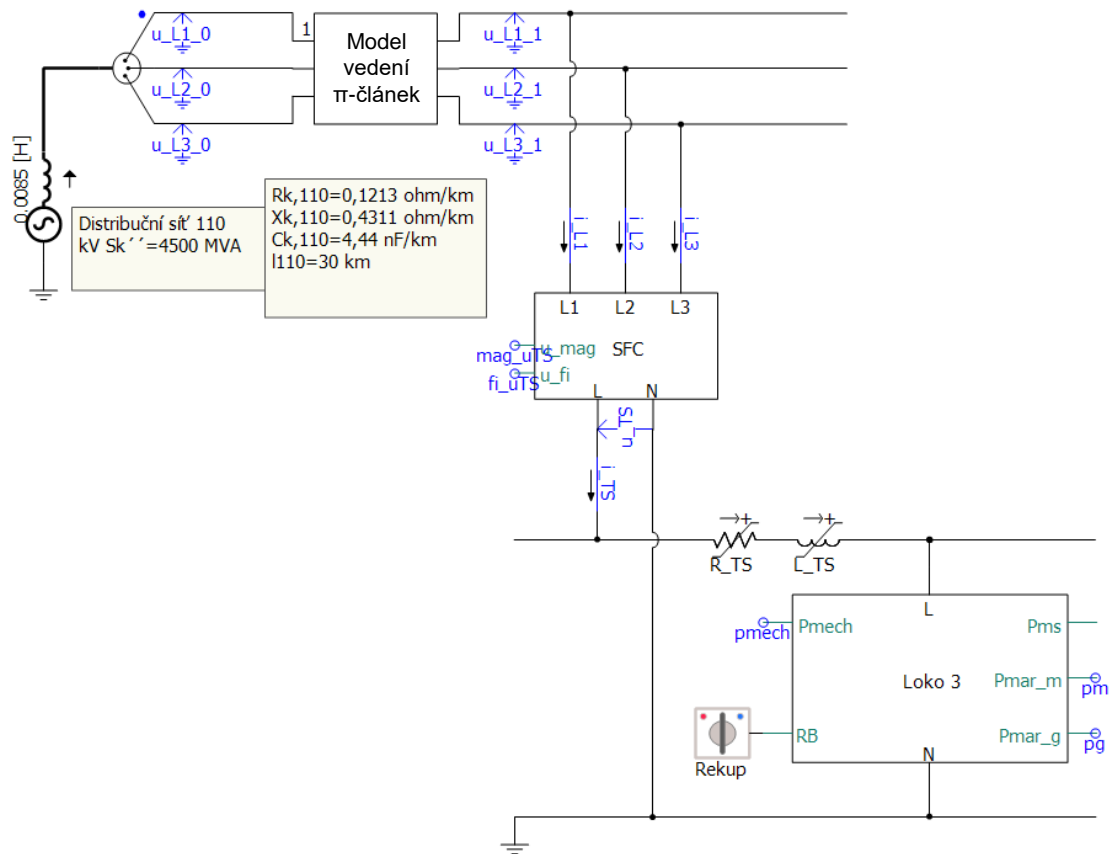


Obrázek 47 Schéma připojení modelu transformátoru 110/27 kV v zapojení do „V“ do DS.

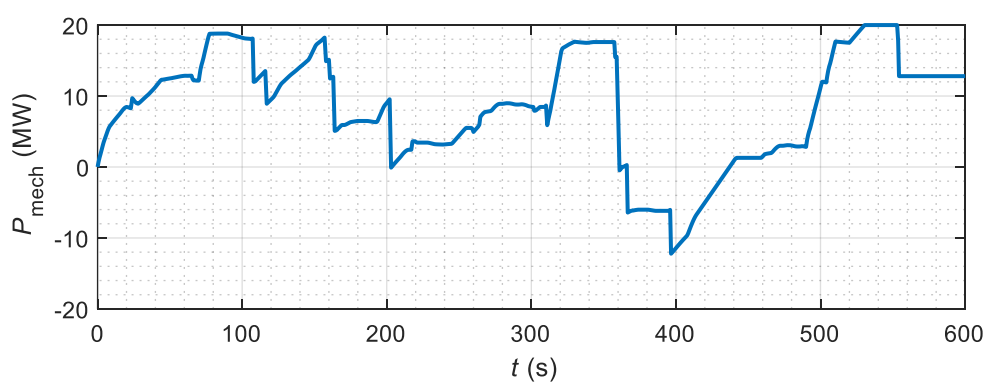


Obrázek 48 Profil mechanického výkonu pro simulaci realistického provozu.

A.3 Čtyřkvadrantový měnič se stejnosměrným meziobvodem (SFC)



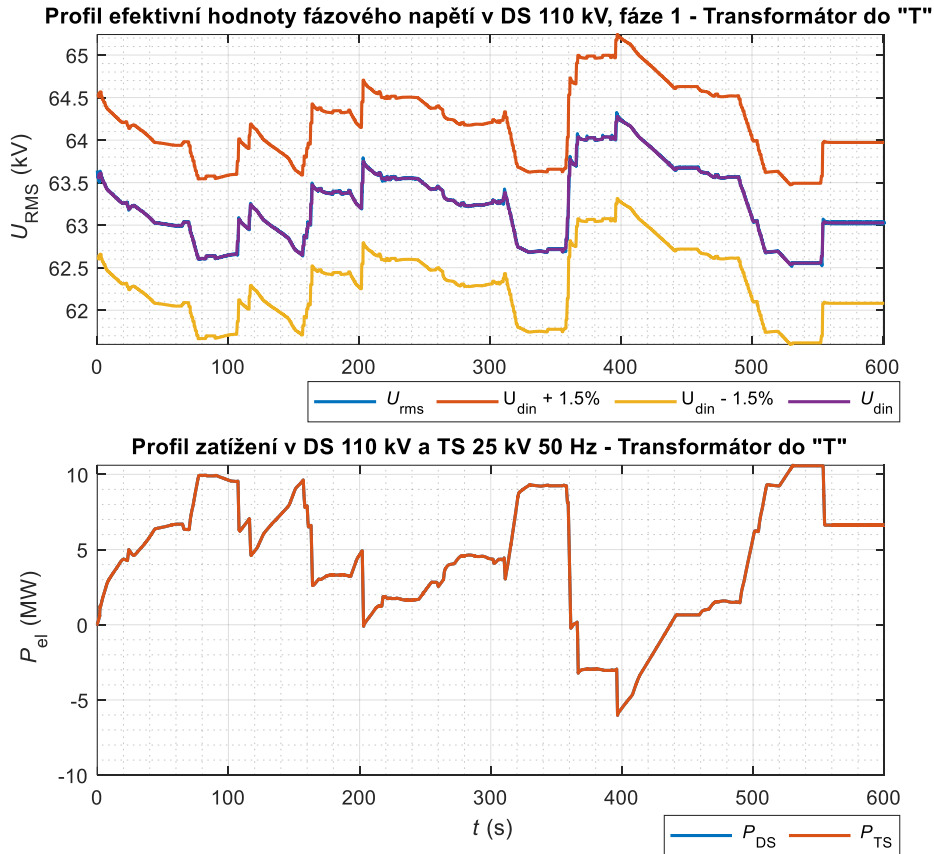
Obrázek 49 Schéma připojení modelu SFC měniče do DS.



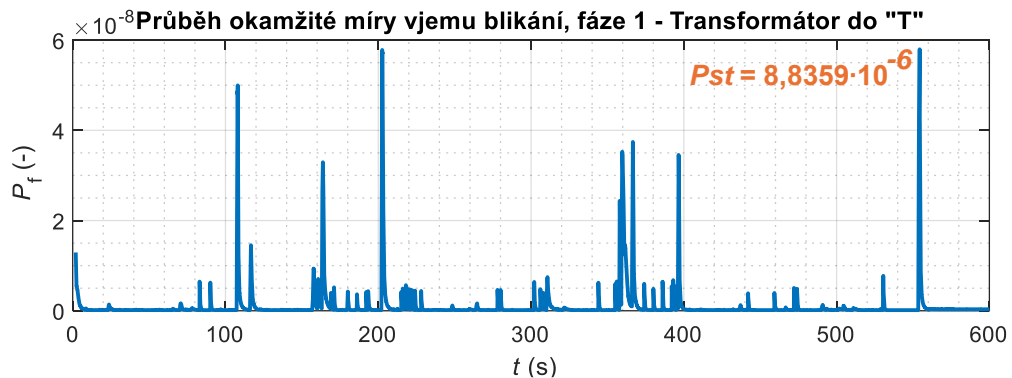
Obrázek 50 Profil mechanického výkonu pro simulaci realistického provozu.

Příloha B - Rychlé změny napětí a flickr

B.1 Jednofázový transformátor 110/27 kV v zapojení do „T“

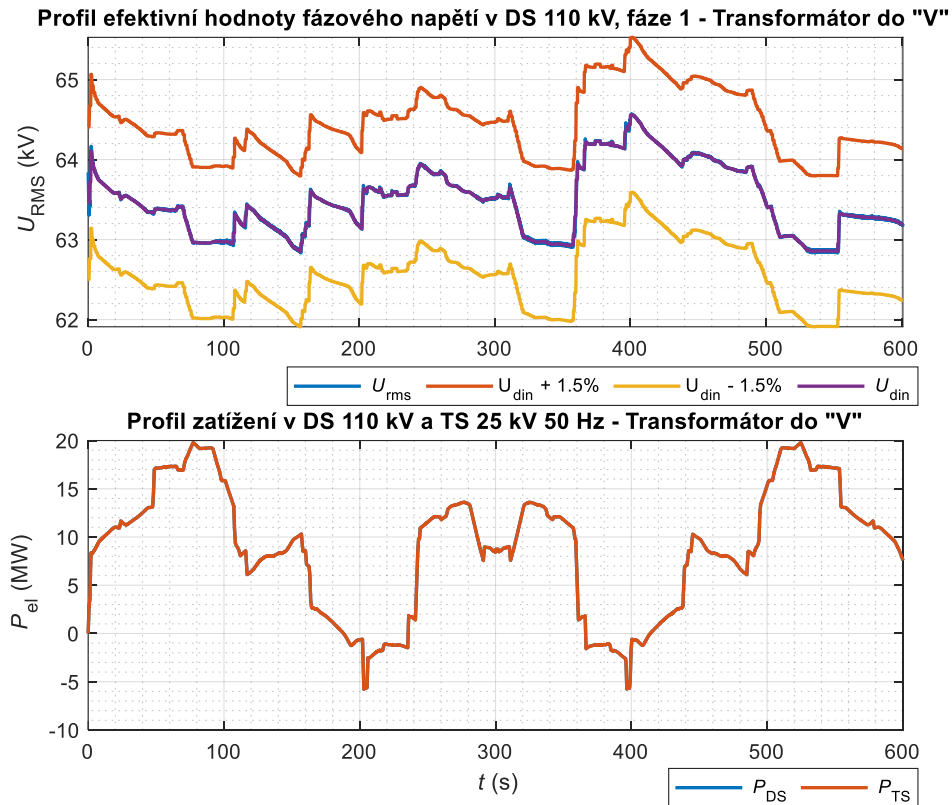


Obrázek 51 Profil ef. hod. napětí v DS 110 kV a profil zatížení v DS a TS – Transformátor do „T“.

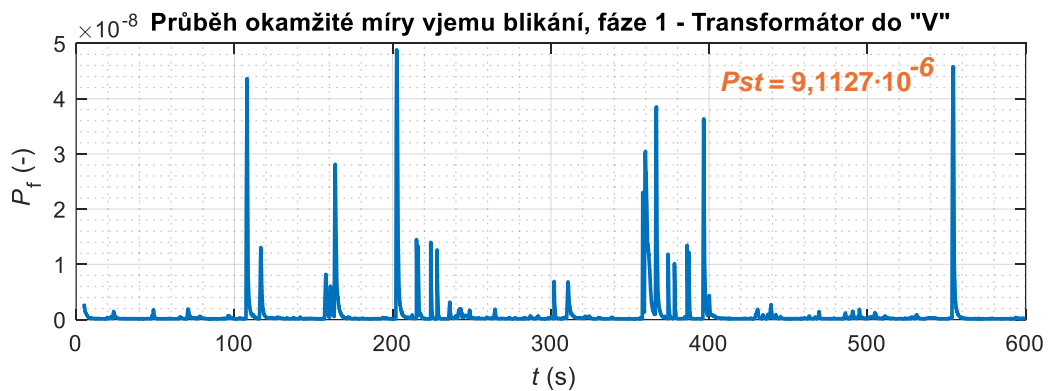


Obrázek 52 Průběh okamžité míry vjemu blikání – Transformátor do „T“.

B.2 Jednofázový transformátor 110/27 kV v zapojení do „V“

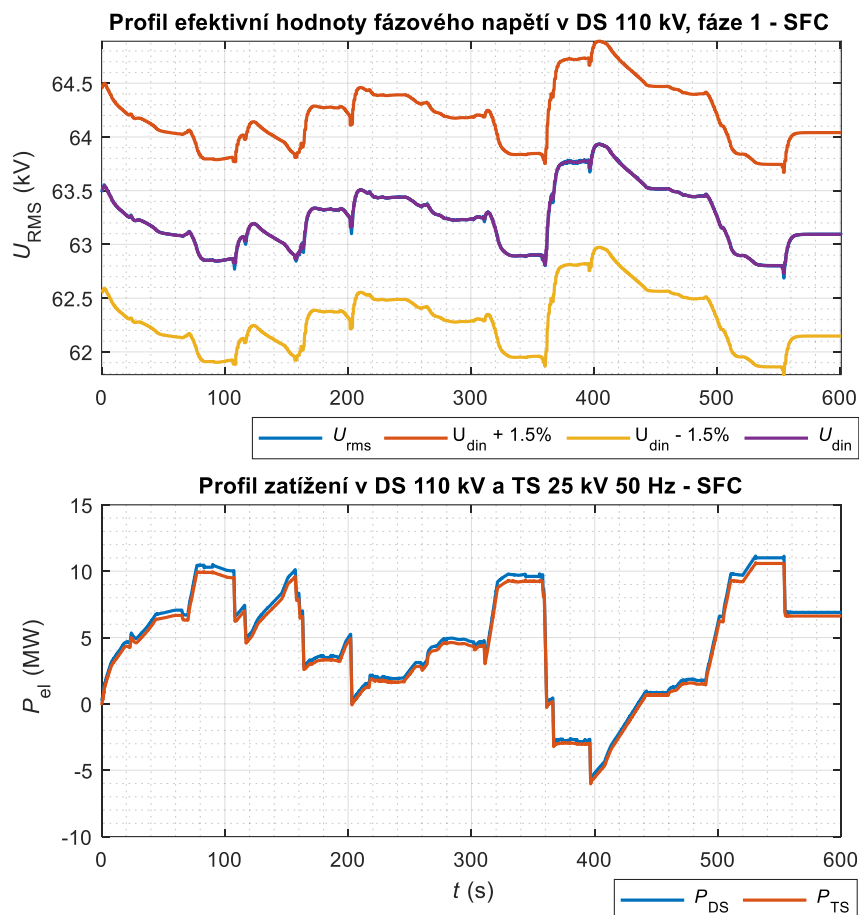


Obrázek 53 Profil ef. hod. napětí v DS 110 kV a profil zatížení v DS a TS – Transformátor do „V“.

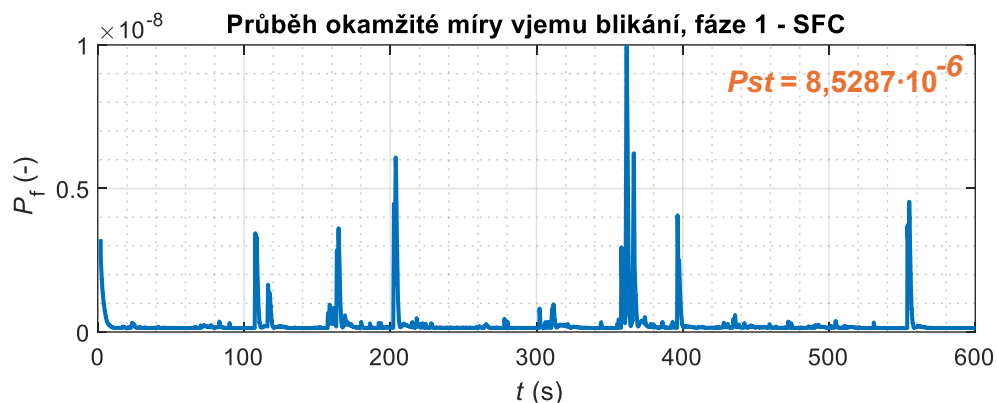


Obrázek 54 Průběh okamžité míry vjemu blikání – Transformátor do „V“.

B.3 Čtyřkvadrantový měnič se stejnosměrným meziobvodem (SFC)



Obrázek 55 Profil ef. hod. napětí v DS 110 kV a profil zatížení v DS a TS – SFC.

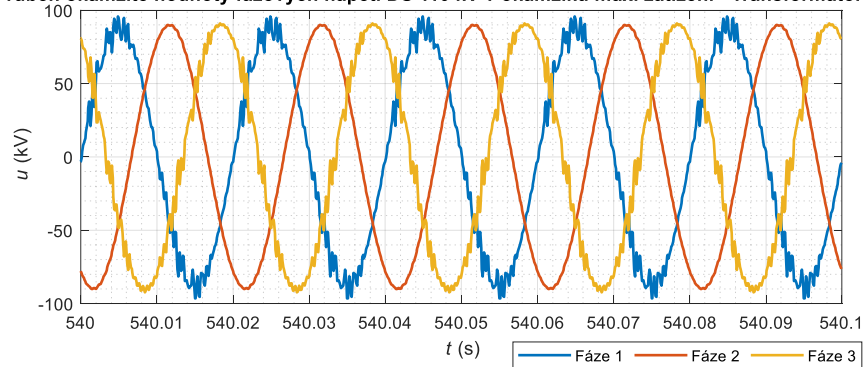


Obrázek 56 Průběh okamžité míry vjemu blikání – SFC.

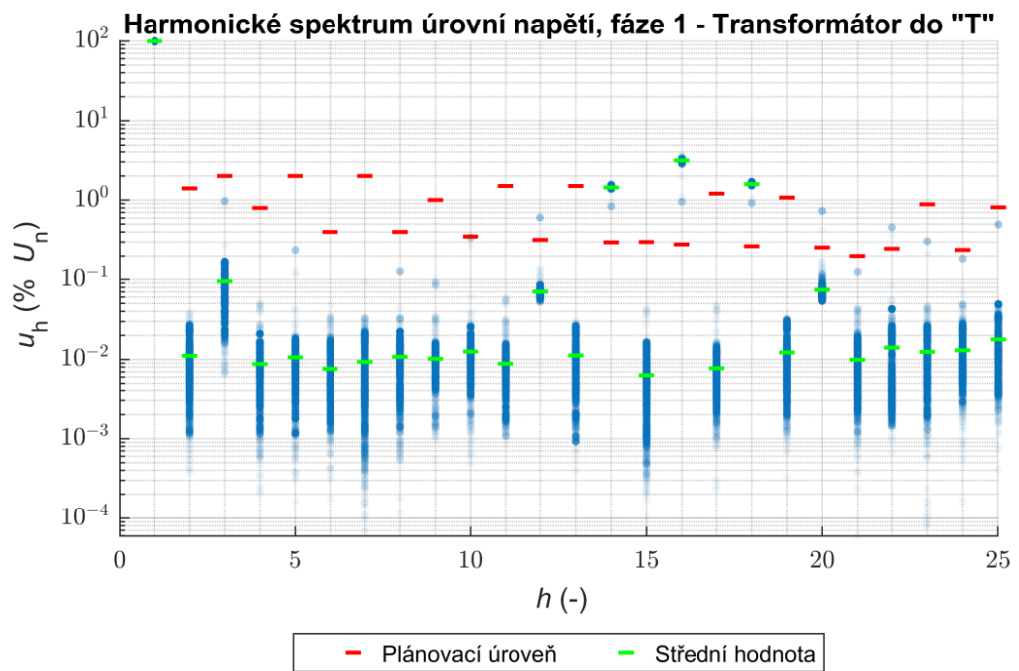
Příloha C - Harmonické zkreslení napětí

C.1 Jednofázový transformátor 110/27 kV v zapojení do „T“

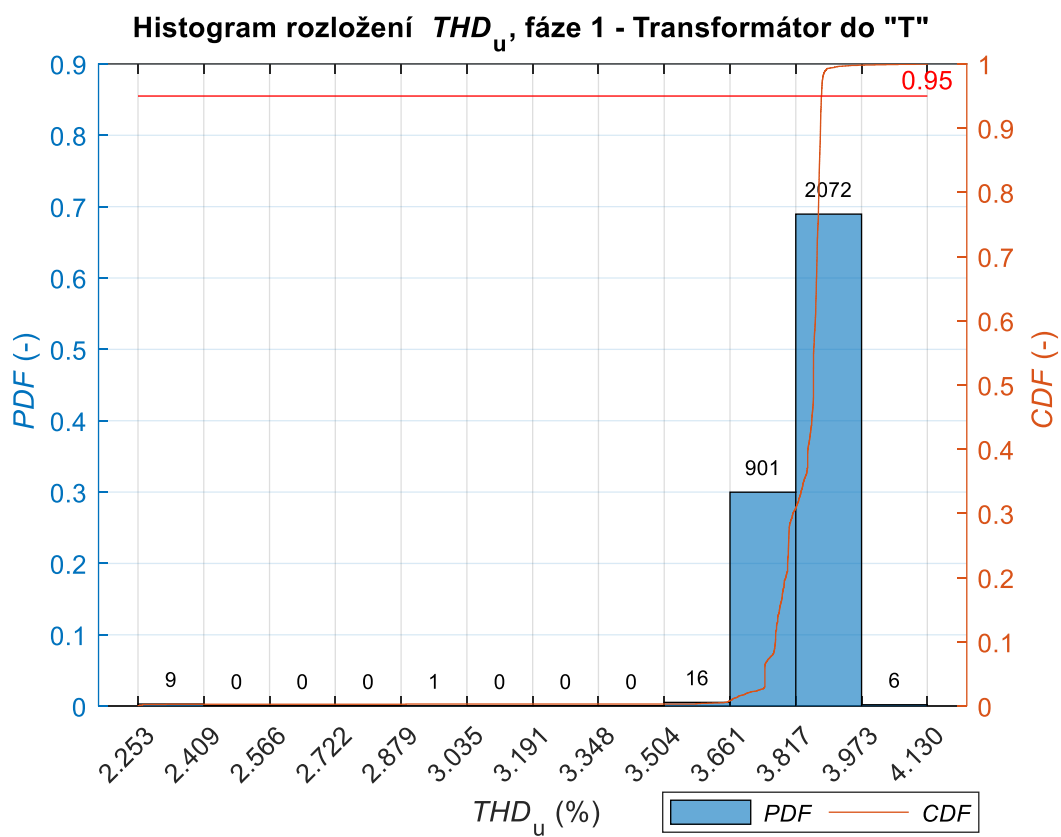
Průběh okamžité hodnoty fázových napětí DS 110 kV v okamžiku max. zatížení - Transformátor do "T"



Obrázek 57 Průběh okamžité hodnoty fázových napětí DS při max. zatížení – Transformátor do „T“.



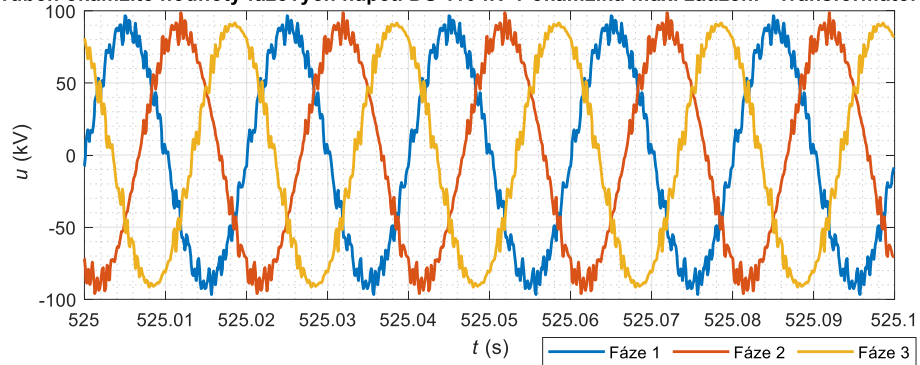
Obrázek 58 Harmonické spektrum úrovní napětí – Transformátor do „T“.



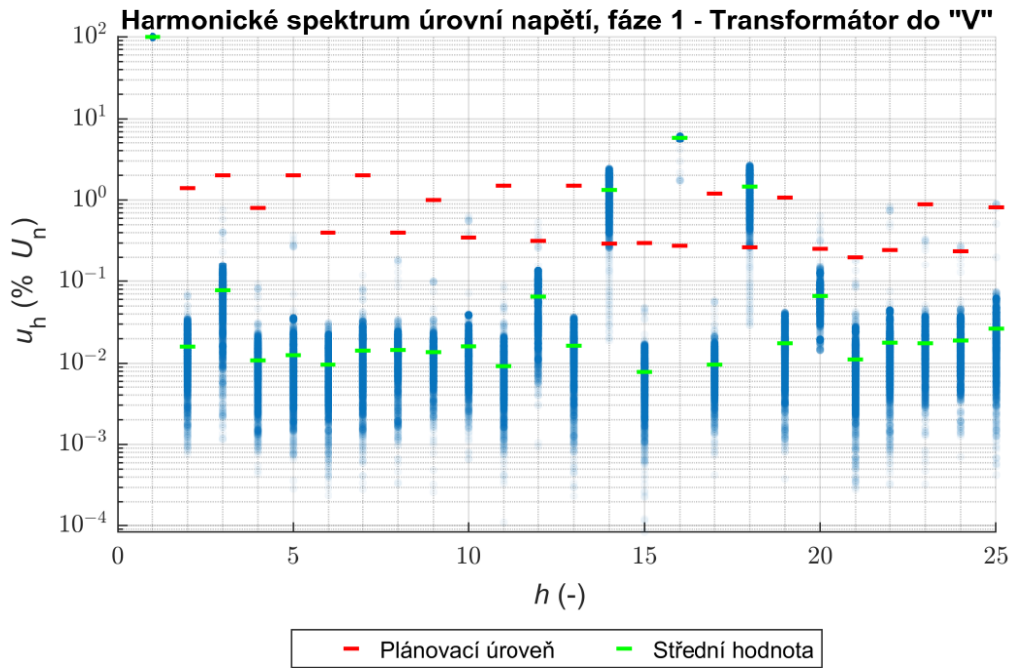
Obrázek 59 Histogram rozložení THD_u – Transformátor do „T“.

C.2 Jednofázový transformátor 110/27 kV v zapojení do „V“

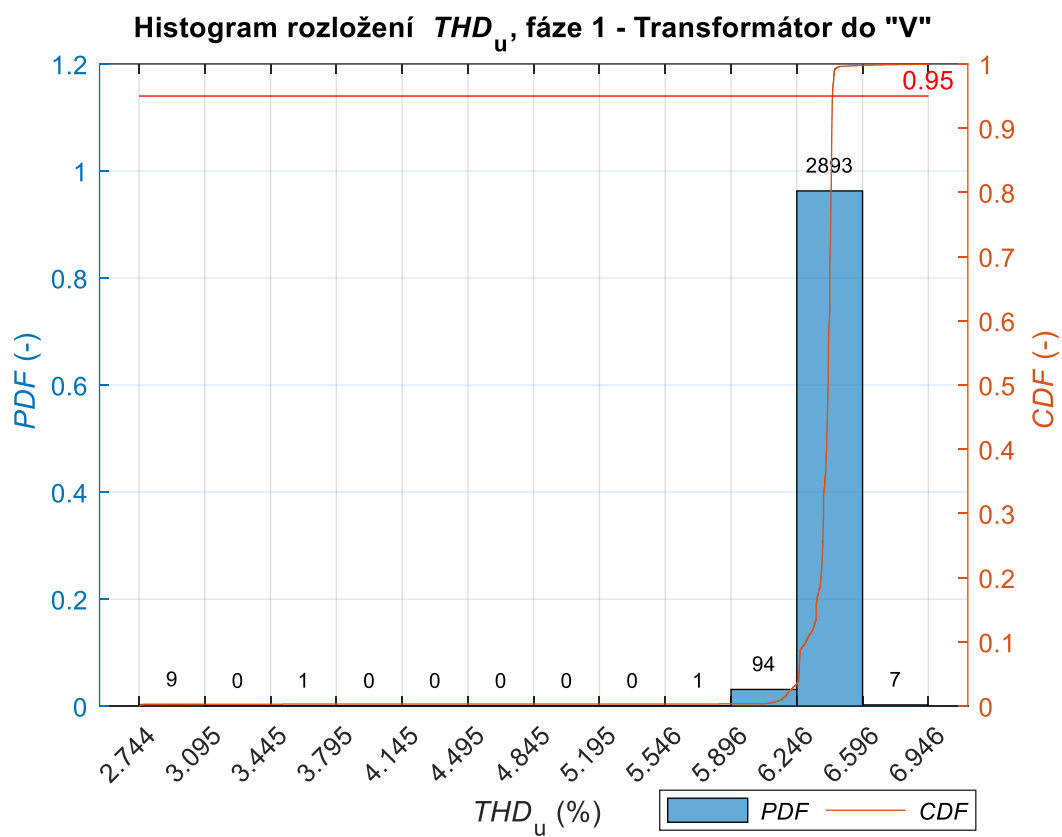
Průběh okamžité hodnoty fázových napětí DS 110 kV v okamžiku max. zatížení - Transformátor do "V"



Obrázek 60 Průběh okamžité hodnoty fázových napětí DS při max. zatížení – Transformátor do „V“.

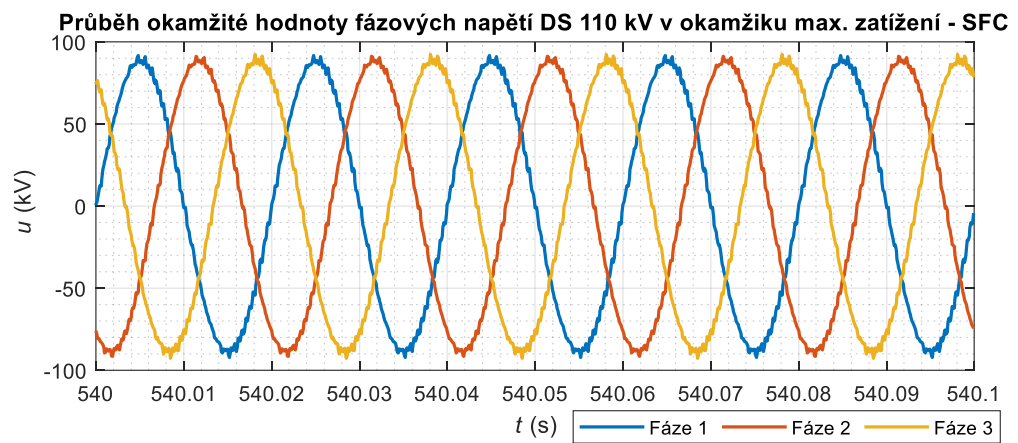


Obrázek 61 Harmonické spektrum úrovní napětí – Transformátor do „V“.

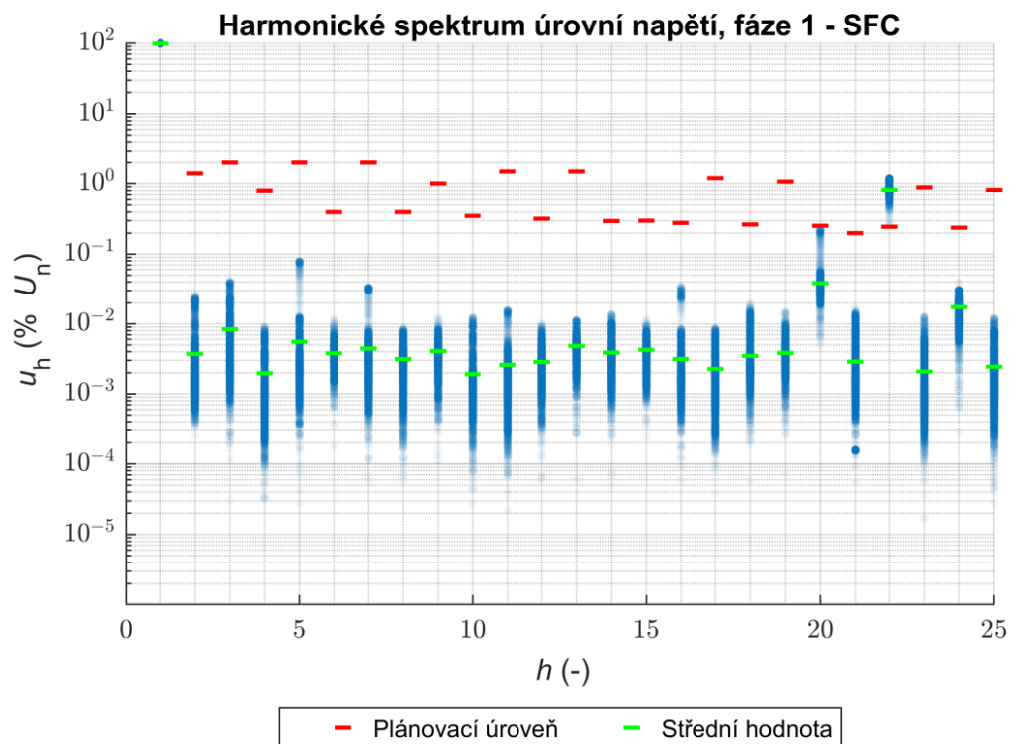


Obrázek 62 Histogram rozložení THD_u – Transformátor do „V“.

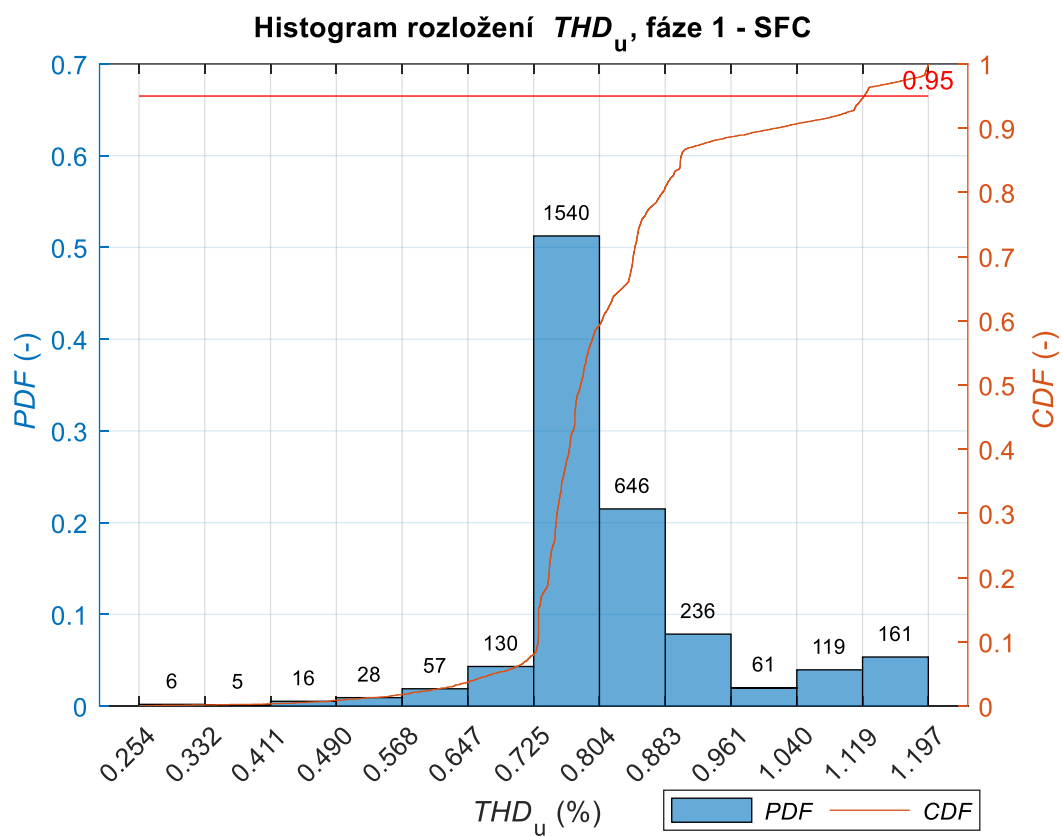
C.3 Čtyřkvadrantový měnič se stejnosměrným meziobvodem (SFC)



Obrázek 63 Průběh okamžité hodnoty fázových napětí DS při max. zatížení – SFC.



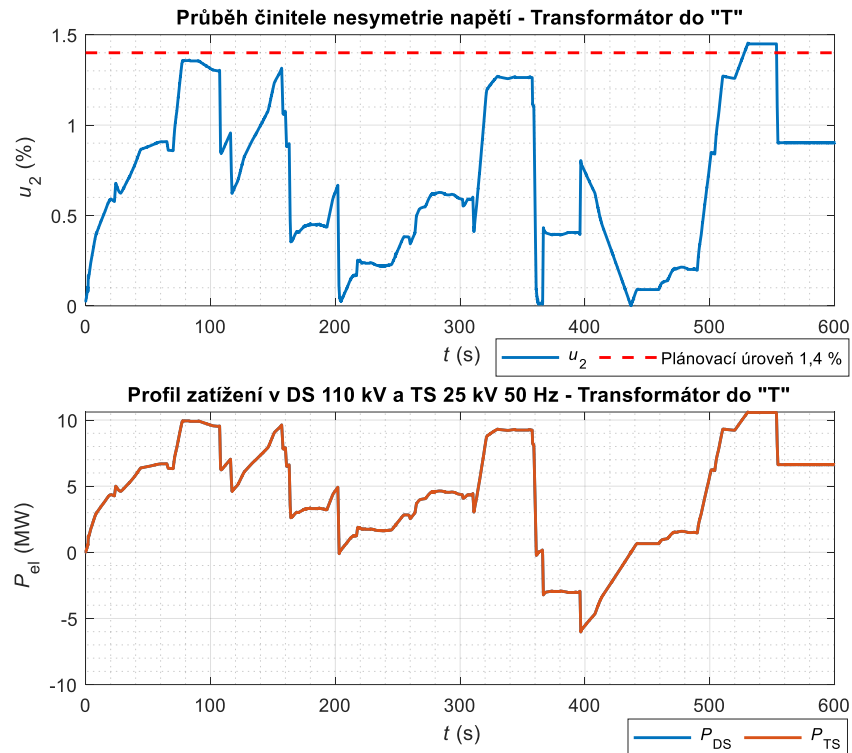
Obrázek 64 Harmonické spektrum úrovní napětí – SFC.



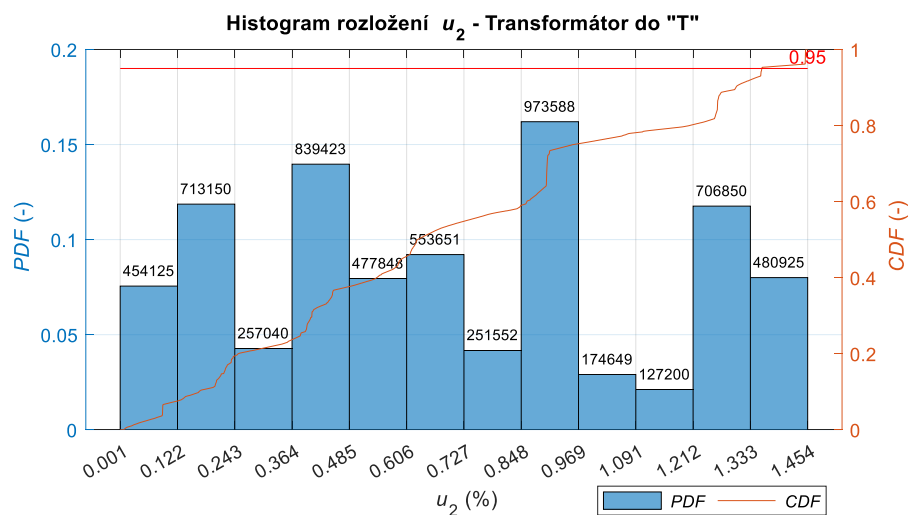
Obrázek 65 Histogram rozložení THD_u – SFC.

Příloha D - Nesymetrie napětí

D.1 Jednofázový transformátor 110/27 kV v zapojení do „T“

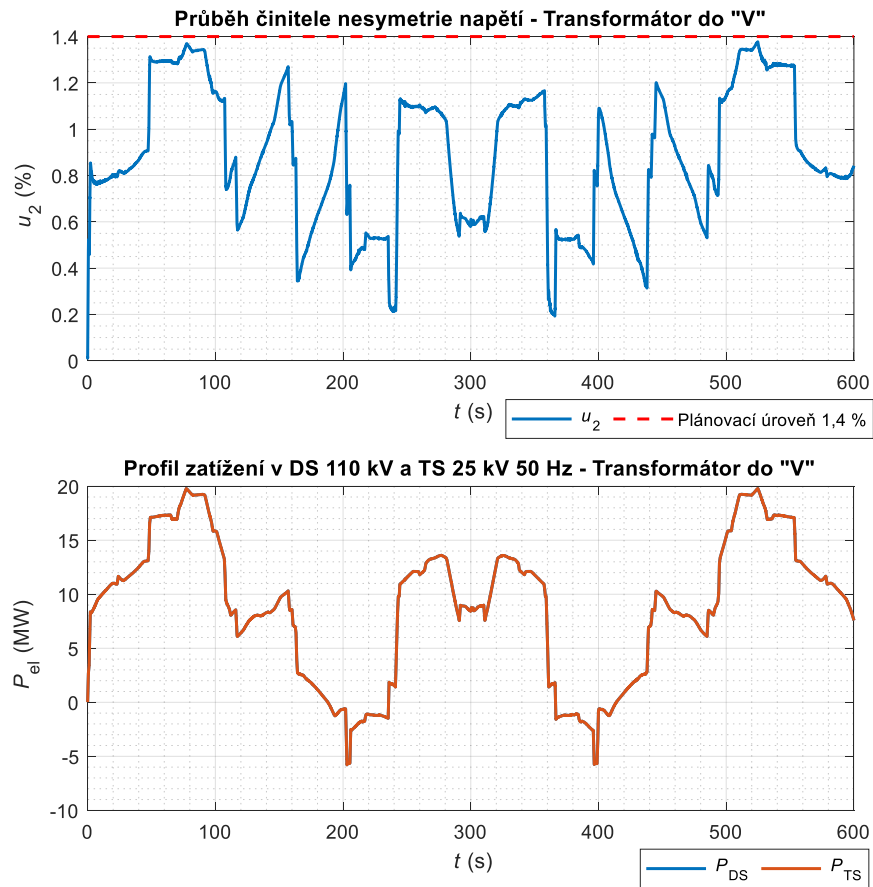


Obrázek 66 Průběh činitele nesymetrie napětí a profil zatížení v DS a TS – Transformátor do „T“.

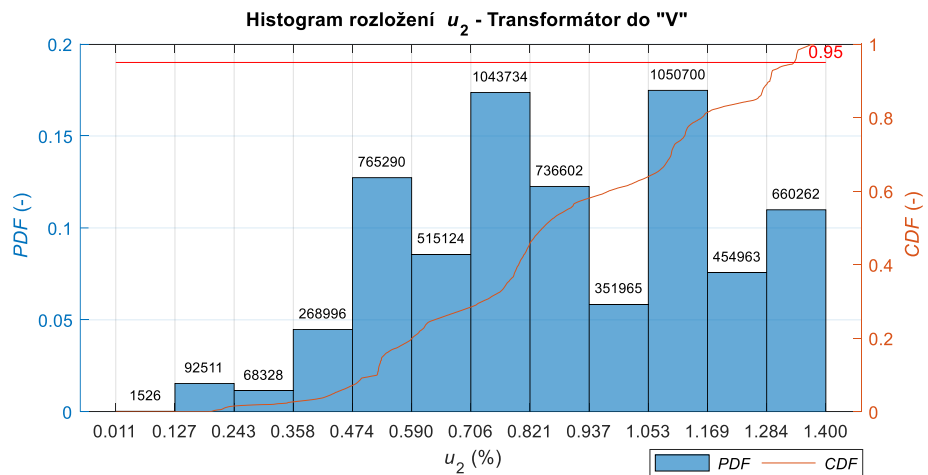


Obrázek 67 Histogram rozložení u_2 – Transformátor do „T“.

D.2 Jednofázový transformátor 110/27 kV v zapojení do „V“

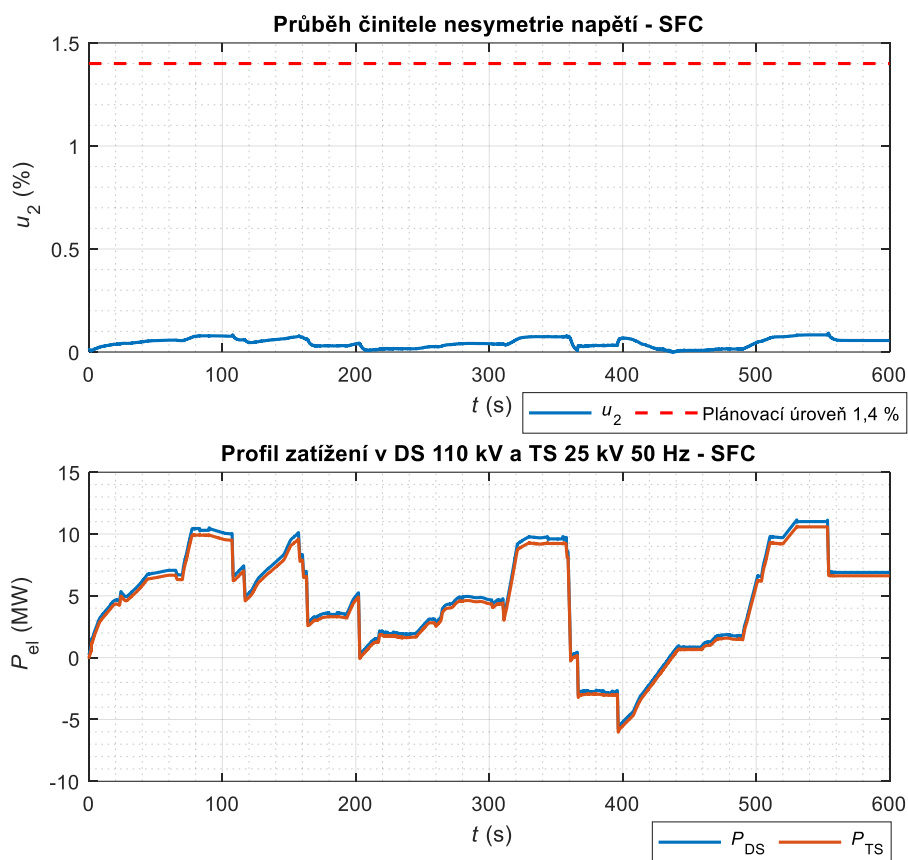


Obrázek 68 Průběh činitele nesymetrie napětí a profil zatížení v DS a TS – Transformátor do „V“.

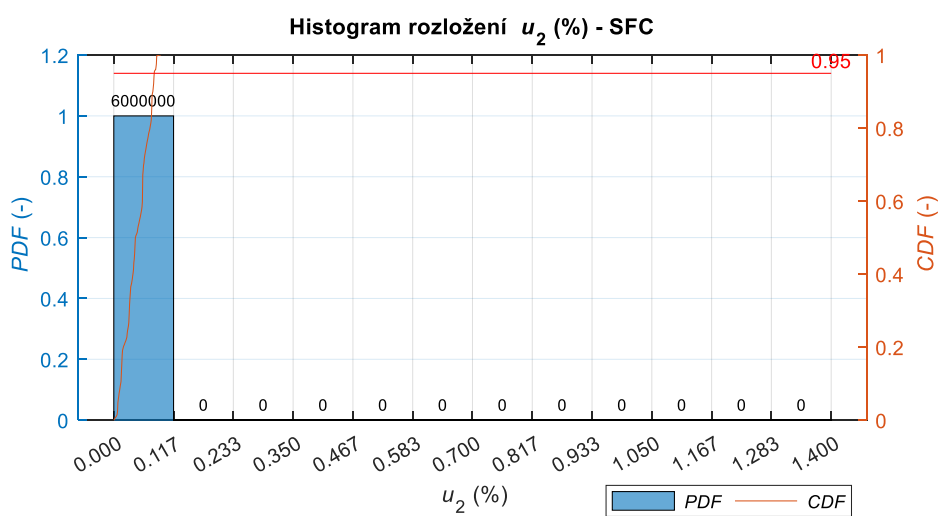


Obrázek 69 Histogram rozložení u_2 – Transformátor do „V“.

D.3 Čtyřkvadrantový měnič se stejnosměrným meziobvodem (SFC)



Obrázek 70 Průběh činitele nesymetrie napětí a profil zatížení v DS a TS – SFC.



Obrázek 71 Histogram rozložení u_2 – SFC.

LITERATURA

- [1] BAYLISS, Colin a HARDY, Brian. *Transmission and Distribution Electrical Engineering: Fourth Edition*. 4th ed. Oxford: Newnes, 2012. ISBN 978-0-08-096912-1.
- [2] ČEPS, ČEZ DISTRIBUCE, EG.D, PRE DISTRIBUCE. PNE 33 3430-0, *Výpočetní hodnocení zpětných vlivů odběratelů a zdrojů distribučních a přenosové soustavy*. 6. 2024.
- [3] ANDERSON, Paul M. *Analysis of Faulted Power Systems*. New York: IEEE, 1995. ISBN 0-7803-1145-0.
- [4] STRAKA, Miloš; BLAHNÍK, Vojtěch a PITTERMANN, Martin. *Comparison of Traction Substation Topologies for AC 25kV Electrical Railway*. Západočeská univerzita Plzeň, 2021.
- [5] DE LA ROSA, Francisco. *Harmonics and Power Systems*. New York: CRC Press Taylor & Francis Group, 2006. ISBN 0-8493-3016-5.
- [6] BOLLEN, Math H. J. *Understanding power quality problems: Voltage sags and interruptions*. 1. IEEE, 2000. ISBN 0-7803-4713-7.
- [7] ČSN EN 61000-4-30, *Elektromagnetická kompatibilita (EMC) - Část 4-30: Zkušební a měřicí technika - Metody měření kvality energie*. 3. 2017.
- [8] ČSN EN 61000-4-15, *Elektromagnetická kompatibilita (EMC) - Část 4-15: Zkušební a měřicí technika - Flikrmetr - Specifikace funkce a dimenzování*. 2. 2011.
- [9] TRÁVNÍČEK, Jaroslav; FOGLEAR, Miroslav a HUDEC, František. *Energetika v dopravě*. Praha: Nakladatelství dopravy a spojů, 1988.
- [10] NOVÁK, Jaroslav a MLYNÁŘÍK, Ladislav. *Nové technologie trakčního napájení 25 kV/50 Hz (1. část)*. Online. UNIVERZITA PARDUBICE. Časopis ELEKTRO. FCC PUBLIC, 2020. Dostupné z: <http://www.odbornecasopisy.cz/elektro/casopis/tema/nove-technologie-trakcniho-napajeni-25-kv-50-hz-1-cast--17232>. [cit. 2023-11-25].
- [11] DOLEČEK, Radovan a ČERNÝ, Ondřej. *Trakční napájecí soustavy: studijní opora*. Pardubice: Univerzita Pardubice, 2015. ISBN 978-80-7395-881-7.
- [12] HILLBERG, Claes. *Workshop Prague*. ABB, 2017.
- [13] BIGHARAZ, Mohammad Hossein; DEHCHESHMEH, Mehdi Amiri; GIVI, Hadi a HUBÁLOVSKÝ, Štěpán. *Multi-Objective Real-Time Tuning of SVC Used in Electrified Traction Systems*. Online. *Sensors*. 2022, roč. 22, č. 1584, s. 18. Licence: MDPI. Dostupné z: <https://www.mdpi.com/1424-8220/22/4/1584>. [cit. 2023-12-16].
- [14] GUIPING, Zhu; JIANYE, Chen a XIAOYU, Liu. *Compensation for the Negative-sequence Currents of Electric Railway Based on SVC*. *IEEE*. 2008, s. 6.
- [15] PANĀ, Adrian. *Active Load Balancing in a Three-Phase Network by Reactive Power Compensation*. *ResearchGate*. 2011, s. 37.

- [16] RAIMONDO, Giuliano. *Power quality improvements in 25 kV 50 Hz railways substation based on chopper controlled impedances*. Institut National Polytechnique de Toulouse, 2012.
- [17] NOVÁK, Jaroslav a MLYNÁŘÍK, Ladislav. *Nové technologie trakčního napájení 25 kV/50 Hz (2. část)*. Online. UNIVERZITA PARDUBICE. Časopis ELEKTRO. FCC PUBLIC, 2020. Dostupné z: <http://www.odbornecasopisy.cz/elektro/casopis/tema/nove-technologie-trakcniho-napajeni-25-kv-50-hz-2-cast--17263>. [cit. 2023-11-25].
- [18] UFERT, Martin. *Static frequency converters for use in 50 Hz railway traction power supply substations*. WIT CONFERENCES. 2016, roč. 15, s. 10. ISSN 1743-3509.
- [19] PATOČKA, Miroslav. *Vybrané statě z výkonové elektroniky: Svazek II: Pulsní měniče bez transformátoru*. VUT v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2005.
- [20] DOS SANTOS JR., Euzeli Cipriano a CABRAL DA SILVA, Edison Roberto. *Advanced Power Electronics Converters: PWM Converters Processing AC Voltages*. 1. IEEE Press, 2015. ISBN 9781118880944.
- [21] BLAABJERG, Frede. *Control of Power Electronic Converters and Systems: Volume 1*. Cambridge: Academic Press, 2018. ISBN 978-0-12-805245-7.
- [22] *Distributed Energy Management (DER): Advanced Power System Management Functions and Information Exchanges for Inverter-based DER Devices, Modelled in IEC 61850-90-7*. 27. 2012. Dostupné také z: https://www.xanthus-consulting.com/Publications/documents/Advanced_Functions_for_DER_Inverters_Modeled_in_IEC_61850-90-7.pdf.
- [23] SARRAZIN, Mathieu; ANTHONIS, Jan; GILLIJNS, Steven a JANSSENS, Karl. *NVH analysis of a 3 phase 12/8 SR motor drive for HEV applications*. Online. 2013, s. 11. Dostupné z: <https://doi.org/10.1109/EVS.2013.6914767>. [cit. 2023-12-17].
- [24] ABRAHAMSSON, Lars; SCHÜTTE, Thorsten a ÖSTLUND, Stefan. *Use of converters for feeding of AC railways for all frequencies*. ELSEVIER. 2012, s. 11.
- [25] *Kodex přenosové soustavy: Část VIII. Standardy PS: Základní podmínky pro užívání přenosové soustavy*. 2015.
- [26] BAERLOCHER, Eugen. *Moderní řešení TNS na bázi SFC pro 50Hz střídavou trakci*. ABB, 2018.
- [27] *Current source and voltage source inverter*. Online. MB Drive Services. 2020. Dostupné z: <https://mb-drive-services.com/current-source-and-voltage-source-inverter/>. [cit. 2023-12-20].
- [28] WINKELNKEMPER, Manfred; KORN, Arthur a STEIMER, Peter. *A Modular Direct Converter for Transformerless Rail Interties*. IEEE. 2010, s. 6.
- [29] *Sitras SFC plus: Static frequency converter for AC traction power supply*. Siemens. Germany, 2018. Dostupné také

- z: <https://assets.new.siemens.com/siemens/assets/api/uuid:34846022-3f14-41de-ad46-d4c66a3e004c/siemens-sitras-sfcplus-pi-en.pdf>.
- [30] TANTA, Mohamed; BARROS, Luis A.M.; PINTO, J.G.; MARTINS, António P. a AFONSO, João L. *Modular Multilevel Converter in Electrified Railway Systems: Applications of Rail Static Frequency Converters and Rail Power Conditioners. International Young Engineers Forum*. 2020, s. 6.
- [31] RADIL, Lukaš; KLUSÁČEK, Jan; DVOŘÁČEK, Jiří a DRÁPELA, Jiří. *Integrace statických frekvenčních měničů pro napájení AC trakční soustavy do distribuční soustavy z pohledu kvality elektrické energie*. In: *Konference ČK CIREN 2021*. Brno: VUT, 2021, s. 14.
- [32] ČSN EN 50388, *Drážní zařízení - Napájení a drážní vozidla - Technická kritéria pro koordinaci mezi napájením (napájecí stanice) a drážními vozidly pro dosažení interoperability*. 2. 2013.
- [33] BUREŠ, Jan. *Elektrické modely rekuperačních zátěží pro napáječ střídavého trakčního vedení 25 kV, 50 Hz*. Brno, 2022. Dostupné také z: <https://www.vut.cz/studenti/zav-prace/detail/142364>. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Ústav elektroenergetiky. Vedoucí práce Jan Klusáček.
- [34] *Charakteristiky napětí elektrické energie dodávané z veřejných elektrických sítí: ČSN EN 50160*. 4. 2023.
- [35] ČSN EN 50163, *Drážní zařízení - Napájecí napětí trakčních soustav*. 2. 2005.
- [36] KLUSÁČEK, Jan a DRÁPELA, Jiří. *Power Flow in Traction System and SFC Based Feeder Load Control: Sensitivity Analyses*. Online. 2022, s. 5. Dostupné z: <https://dspace.vut.cz/server/api/core/bitstreams/e3385ee1-83cb-484f-9d71-583d318eb980/content>. [cit. 2024-05-14].