



# 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

## VYUŽITÍ PRVKŮ ŽELEZNIČNÍ TRAKČNÍ SOUSTAVY PRO PODPORU DISTRIBUČNÍ SÍTĚ

USE OF THE RAILWAY TRACTION ELEMENTS FOR DISTRIBUTION SYSTEM SUPPORT

### BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

### AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Michal Dékány

### VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Michal Ptáček, Ph.D.

BRNO 2021

# Bakalářská práce

bakalářský studijní program **Silnoproudá elektrotechnika a elektroenergetika**

Ústav elektroenergetiky

**Student:** Michal Dékány

**ID:** 211104

**Ročník:** 3

**Akademický rok:** 2020/21

**NÁZEV TÉMATU:**

## Využití prvků železniční trakční soustavy pro podporu distribuční sítě

**POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:**

1. Podmínky připojení železničních trakčních soustav na distribuční síť v ČR, popis požadavků na trakční soustavy, základní předpisy
2. Technický popis stávajících systémů trakčních proudových soustav v ČR (trakční transformovny, trakční měničárny), jejich připojení ke konkrétním distribučním oblastem (vč. technické specifikace těchto distribučních oblastí), soulad požadavků na rozvoj trakční a distribuční soustavy
3. Analýza vlivů různých provozních stavů trakční soustavy na distribuční síť vč. přehledu technických prostředků eliminace nežádoucích vlivů
4. Analýza možností využití trakční soustavy pro regulaci vybraných parametrů (toky výkonů, kvalitativní síťové ukazatele) napájecí distribuční soustavy vč. kritického zhodnocení těchto možností

**DOPORUČENÁ LITERATURA:**

podle pokynů vedoucího bakalářské práce

**Termín zadání:** 8.2.2021

**Termín odevzdání:** 1.6.2021

**Vedoucí práce:** Ing. Michal Ptáček, Ph.D.

**doc. Ing. Petr Toman, Ph.D.**  
předseda rady studijního programu

**UPOZORNĚNÍ:**

Autor bakalářské práce nesmí při vytváření bakalářské 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**

Bakalárska práca sa zaoberá prechodom na jednotnú napájaciu sústavu trakčného systému Českej republiky. Popisuje možnosti použitia meničov v rôznych zapojeniach na zlepšenie kvality elektrickej energie na strane distribútora. Práca predstavuje aktuálne inovatívne riešenia, ktoré využívajú meniče na podporu distribučnej siete zamedzením prenosu nežiaducich parametrov z trakčnej siete do siete distribučnej ako sú vyššie harmonické a takisto popisuje možnosti dvojstranného napájania za ich pomoci.

## **Kľúčové slova**

Jednotná napájacía sústava, menič, kvalita elektrickej energie, podpora distribučnej siete, vyššie harmonické, dvojstranné napájanie

## **Abstract**

The bachelor thesis deals with the transition to a unified power supply system of the traction system of the Czech Republic. Describes the possibilities of using converters in various connections to improve the quality of electricity on the distributor side. The work presents current innovative solutions that use converters to support the distribution network by preventing the transmission of unwanted parameters from the traction network to the distribution network, such as higher harmonics, and also describes the possibilities of two-way power supply with their help.

## **Keywords**

Unified power supply, converter, quality of electricity, support the distribution network, higher harmonics, two-way power supply

## **Bibliografická citácia**

DÉKÁNY, Michal. Využití prvků železniční trakční soustavy pro podporu distribuční sítě [online]. Brno, 2021 [cit. 2021-05-22]. Dostupné z: <https://www.vutbr.cz/studenti/zav-prace/detail/134929>. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Ústav elektroenergetiky. Vedoucí práce Michal Ptáček.



# Prehlásenie autora o pôvodnosti diela

**Meno a priezvisko študenta:** *Michal Dékány*

**VUT ID študenta:** *211104*

**Typ práce:** *Bakalárska práca*

**Akademický rok:** *2020/21*

**Téma záverečnej práce:** *Využití prvků železniční trakční soustavy pro podporu distribuční sítě.*

Prehlasujem, že svoju záverečnú prácu som vypracoval samostatne pod vedením vedúceho záverečnej práce a s použitím odbornej literatúry a ďalších informačných zdrojov, ktoré sú všetky citované v práci a uvedené v zozname literatúry na konci práce.

Ako autor uvedenej záverečnej práce ďalej prehlasujem, že v súvislosti s vytvorením tejto záverečnej práce som neporušil autorské práva tretích osôb, hlavne som nezasiahol nedovoleným spôsobom do cudzích autorských práv osobnostných a som si plne vedomý následkov porušenia ustanovenia § 11 a nasledujúcich autorského zákona č 121/2000 Sb., vrátane možných trestnoprávných dôsledkov vyplývajúcich z ustanovenia časti druhej, hlavy VI. diel 4 Trestného zákonníku č. 40/2009 Sb.

V Brne dňa: 1. júna 2021

-----  
podpis autora

## **Pod'akovanie**

*Ďakujem vedúcemu bakalárskej práce Ing. Michalovi Ptáčkovi, PhD. Za účinnú metodickú, pedagogickú a odbornú pomoc pri spracovaní mojej bakalárskej práce.*

V Brne dňa: 1. júna 2021

-----  
podpis autora

# Obsah

<b>ZOZNAM OBRÁZKOV .....</b>	<b>9</b>
<b>ZOZNAM TABULIEK .....</b>	<b>10</b>
<b>ÚVOD .....</b>	<b>11</b>
<b>1. ŽELEZNIČNÝ SYSTÉM V ČESKEJ REPUBLIKE .....</b>	<b>12</b>
1.1 SCHÉMA ŽELEZNIČNEJ SIETE V ČR .....	12
1.2 JEDNOSMERNÁ TRAKČNÁ PRÚDOVÁ SÚSTAVA 3 kV .....	13
1.3 JEDNOFÁZOVÁ STRIEDAVÁ TRAKČNÁ PRÚDOVÁ SÚSTAVA 25 kV 50 Hz.....	15
<b>2. ZMENA INFRAŠTRUKTÚRY TRATÍ.....</b>	<b>16</b>
2.1 EFEKTY PRECHODU NA 25 kV AC Z 3 kV DC .....	17
2.1.1 Úspora elektrickej energie .....	17
2.1.2 Úspora financií na dokončovanie elektrifikácie sietí .....	18
2.1.3 Úspora pri budovaní vysokorýchlostného železničného systému.....	18
2.2 RIEŠENIE PRI PRECHODE NA JEDNOTNÚ NAPÁJACIU HLADINU .....	18
2.2.1 Napájacie stanice.....	19
2.2.2 Technické riešenie trakčného vedenia.....	19
2.2.3 Technické riešenie zabezpečovacieho zariadenia.....	20
2.2.4 Technické riešenie oznamovacieho zariadenia .....	20
2.2.5 Odstránenie stykových miest.....	20
<b>3. PODMIENKY PRIPOJENIA TRAKČNEJ SÚSTAVY K DISTRIBUČNEJ SÚSTAVE ČR 21</b>	
3.1 NAPÄTIE A FREKVENCIA TRAKČNÝCH SÚSTAV .....	21
3.1.1 Napätie.....	21
3.1.2 Frekvencia .....	21
3.2 TRAKČNÉ TRANSFORMOVNE A MENIARNE.....	22
3.2.1 Trakčné meniarne .....	22
3.2.2 Trakčné transformovne .....	23
<b>4. SPÔSOBY NAPÁJANIA TRAKČNÝCH SIETÍ .....</b>	<b>25</b>
4.1 JEDNOSTRANNE SÚSTREDENÉ NAPÁJANIE TRAKČNÝCH ÚSEKOV .....	25
4.2 DVOJSTRANNE ROZLOŽENÉ NAPÁJANIE TRAKČNEJ SIETE .....	25
4.3 ŠTVORSTRANNÉ NAPÁJANIE DVOJKOLAJOVEJ TRATE .....	26
4.4 SÚSTAVA AC 25 kV 50 Hz .....	27
4.4.1 Trakčné transformovne .....	28
4.4.2 Spínacie stanice .....	28
4.4.3 Filtračno-kompenzačné zariadenia.....	28
4.4.4 Odpínače a vypínače.....	28
4.4.5 Rozvádzače transformovni .....	29
4.4.6 Ochrany .....	29
4.5 TOPOLOGIA PRIPOJENIA NA DISTRIBUČNÚ SÚSTAVU.....	30
4.5.1 Metóda striedania fáz s použitím výkonových transformátorov.....	30
4.5.2 Použitie symetrických trojfázových výkonových transformátorov.....	31
4.5.3 Statický kompenzátor Var – SVC .....	33
4.5.4 Statický synchronný kompenzátor – STATCOM .....	34

4.5.5	<i>Statický menič frekvencie SFC</i> .....	35
4.5.6	<i>Trakčný kondicionér napájania RPC</i> .....	36
4.5.7	<i>Porovnanie</i> .....	37
4.6	VYUŽITIE MENIČOVÝCH NAPÁJACÍCH STANÍC PRI DVOJSTRANNOM NAPÁJANÍ.....	37
4.7	POUŽÍVANÁ TECHNOLÓGIA OD FIRMY ABB .....	39
4.7.1	<i>Technické výhody</i> .....	40
4.7.2	<i>Simulácia</i> .....	41
4.7.3	<i>Referenčný projekt WULKURAKA</i> .....	42
	<b>ZÁVER</b> .....	<b>46</b>
	<b>LITERATÚRA</b> .....	<b>48</b>
	<b>ZOZNAM SYMBOLOV A SKRATIEK</b> .....	<b>51</b>

## ZOZNAM OBRÁZKOV

1.1	Mapa trakčných prúdových sústav v ČR [7] .....	13
1.2	Graf počtu trakčných transformátorov v sústave DC 3 kV [25].....	14
1.3	Graf počtu trakčných transformátorov v sústave AC 25 kV 50 Hz [25] .....	15
4.1	Schéma jednostranného napájania [14] .....	25
4.2	Schéma dvojstranného napájania [14].....	26
4.3	Schéma štvorstranného napájania dvojkoľajovej trate so spínacou stanicou [14].....	27
4.4	Metóda striedania fáz [17].....	30
4.5	Zapojenie pomocou: a) Scotovho transformátora, b) LeBlancovho transformátora, c) Transformátora prispôsobenia impedancie [17] .....	32
4.6	Zapojenie pomocou SVC [17].....	33
4.7	Zapojenie pomocou STATCOM [17] .....	34
4.8	Zapojenie pomocou SFC [17] .....	36
4.9	Zapojenie pomocou RPC [17].....	37
4.10	Časová závislosť výkonu napájacej stanice pri jazde dvoch vlakov rovnakým smerom pri jednostrannom napájaní [22] .....	39
4.11	Časová závislosť výkonu napájacích staníc pri jazde dvoch vlakov rovnakým smerom pri dvojstrannom napájaní meničovými napájacími stanicami [22] .....	39
4.12	Napájanie trakčnej sústavy za pomoci frekvenčných meničov [21].....	40
4.13	Vzdialenosti napájacích staníc pri simulácii [21] .....	41
4.14	Porovnanie dimenzovacieho faktoru na kilometer trate [21].....	42
4.15	Zapojenie PCS6000 [21] .....	43
4.16	Odozva SFC z pohľadu riadenia [21].....	43
4.17	Reakcia SFC pri poklese napätia na 0,05 p.u. [21].....	44
4.18	Jednofázový jalový výkon [21] .....	44
4.19	Množstvo harmonických pri rôznych frekvenciách na strane trojfázovej distribučnej siete a jednofázovej trakčnej siete [21].....	45

## **ZOZNAM TABULIEK**

4.1	Základné špecifikácie spôsobov pripojenia na distribučnú sieť [17].....	37
-----	---	----

# ÚVOD

Železničný systém v Českej republike (ČR) sa začal budovať v prvej tretine 19. storočia. Prvá železnica na území ČR bola tzv. konská železnica. Časom keď sa dopyt po preprave začal rozvíjať, tak sa začalo aj rozsiahlejšie budovanie železničnej infraštruktúry. Z konskej železnice sa stala časom železnica elektrická. V ČR sa nachádzajú dve napät'ové hladiny napájania železničnej siete. Na severe je DC sústava 3 kV a na juhu je to AC sústava 25 kV.

Výstavba jednosmernej trakčnej prúdovej sústavy 3 kV napájanej z elektroenergetickej siete 110 kV 50 Hz sa začala v roku 1949, na základe voľby aj iných železničných správ ako napr.: Anglicko, Francúzsko, Poľsko i vtedajšie ZSSR a v roku 1955 bola uvedená do prevádzky. Týmto systémom pokračovala elektrifikácia železníc až do súčasnosti. V súčasnej dobe je 58 % tratí prevádzkovaných na jednosmernej hladine 3 kV.

Tlakom priemyslu a rozvojom výkonovej elektroniky sa začiatok 60. rokov pristúpilo k elektrifikácii druhým trakčným prúdovým systémom 25 kV, 50 Hz. Týmto systémom je dnes v prevádzke 1267 km tratí. Okrem tohto systému sú v ČR aj systémy DC 1,5 kV a 15 kV 16,7 Hz.

Samotné používanie napät'ových hladín so sebou prináša aj mnoho nepriaznivých vplyvov. Striedavá trakčná sústava je zdrojom nesymetrií a harmonických vyšších radov, tieto negatívne zložky ovplyvňujú napät'ovú hladinu 110 kV.

Tým že sa tu nachádzajú dve hlavné rozdielne napät'ové hladiny vzniká množstvo problémov ktoré sú neskôr rozoberané v mojej bakalárskej práci. Prechodom na jednotnú napájaciu sústavu by sa zabezpečila kompatibilita medzi severom a juhom republiky, ktorá by pozitívne prispela k narastajúcemu dopytu po železničnej doprave, prechod by takisto zabezpečil predprípravu pre budúci vývoj železníc v ČR, kedy by už bola napájaciu sústavu predpripravená pre vysokorýchlostné trate. Preto moja bakalárska práca uvažuje o prechode na jednotnú napájaciu striedavú sústavu 25 kV ku ktorej sa ministerstvo dopravy Českej republiky zaviazalo do roku 2037 a spôsobmi, ktoré zabezpečia najvyššiu možnú kvalitu elektrickej energie na strane dodávateľa.

# 1. ŽELEZNIČNÝ SYSTÉM V ČESKEJ REPUBLIKE

Železničný systém v Českej republike vznikol súbežne so železničným systémom v Slovenskej republike. Preto je možné na týchto dvoch systémoch pozorovať zhody v technických riešeniach a víziách do budúceho smerovania a rozvoja železničnej dopravy. Nevýhodou aktuálneho systému je že, väčšina železničných tratí v Českej republike je vybudovaná kopírovaním siete, ktorá bola založená v 19. storočí. Táto schéma tratí nevyhovuje aktuálnym požiadavkám na železničnú dopravu 21. storočia, kde sú hlavnými kritériami rýchlosť a kapacita železničnej dopravy. V ČR je približne 48 % z celkovej dĺžky tratí v oblúkoch, čo značne neprispieva k navýšeniu rýchlostného limitu na tratiach. Aj napriek daným zastaralým systémom patrí ČR medzi krajiny s najhustejšou železničnou sieťou na svete kde na 1 km<sup>2</sup> pripadá až 0,122 km tratí.[1]

## 1.1 Schéma železničnej siete v ČR

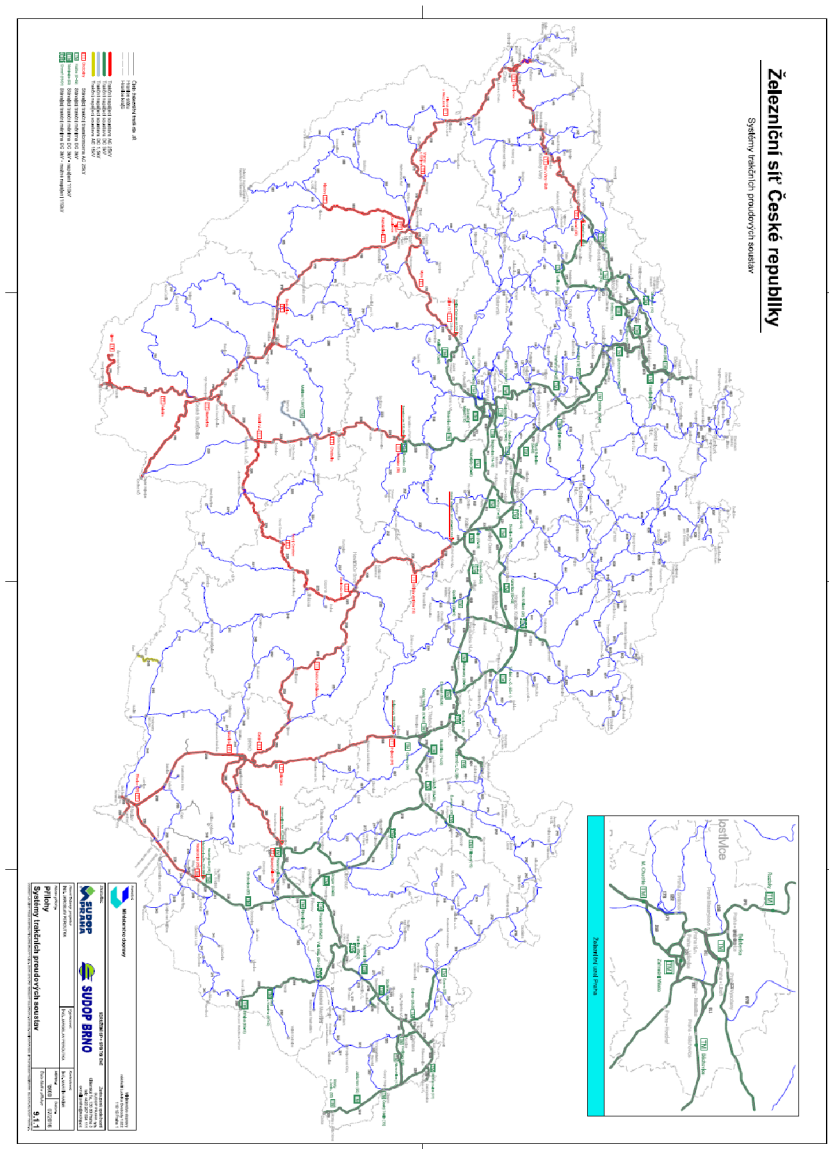
Na obrázku 1.1 je na mape zobrazený rozsah železničnej siete na území ČR. Je z neho možné vyčítať druh elektrifikácie jednotlivých úsekov tratí. Tak isto sú z obrázku zrejmé hlavné úseky tratí, ktoré sú zelene/červene zobrazené. Tieto trate sú z pohľadu budúceho rozvoja železničnej siete najdôležitejšie, nakoľko na nich prebieha väčšina dopravných spojení medzi významnými miestami.

Podiel elektrizovaných tratí je aktuálne 34 %, čo zodpovedá dĺžke 3216 km tratí. Z toho je 1287 km jednokoľajových tratí. Podľa napájacej sústavy je 1795 km tratí napájaných s jednosmerným napätím 3 kV a 1382 km napätím striedavým 25 kV s frekvenciou 50 Hz. Na trati Tábor – Bechyně je prevádzkovaná doprava s napájacou sústavou 1,5 kV DC, ktorá bola sprevádzkovaná v roku 1903. Striedavou sústavou 15 kV 16,7 Hz je napájaný krátky úsek trati medzi mestom Znojmo a hraničným prechodom Retz. [1]

Vývojom technológií v oblasti napájania sa objavilo množstvo napájacích prúdových sústav. Napájanie železničných dráh je v ČR napájané z jednovodičového prívodu, ktorý je tvorený trolejovým nadzemným vedením. Prívod elektrického prúdu do trakčných vozidiel je z trakčných napájacích staníc realizovaný nadzemným vedením a obvod späť je cez koľajnice. [9]

V Českej republike prevažuje využitie dvoch napájacích hladín nad ostatnými. Jednou z nich je sústava DC 3 kV a druhou AC 25 kV 50 Hz.



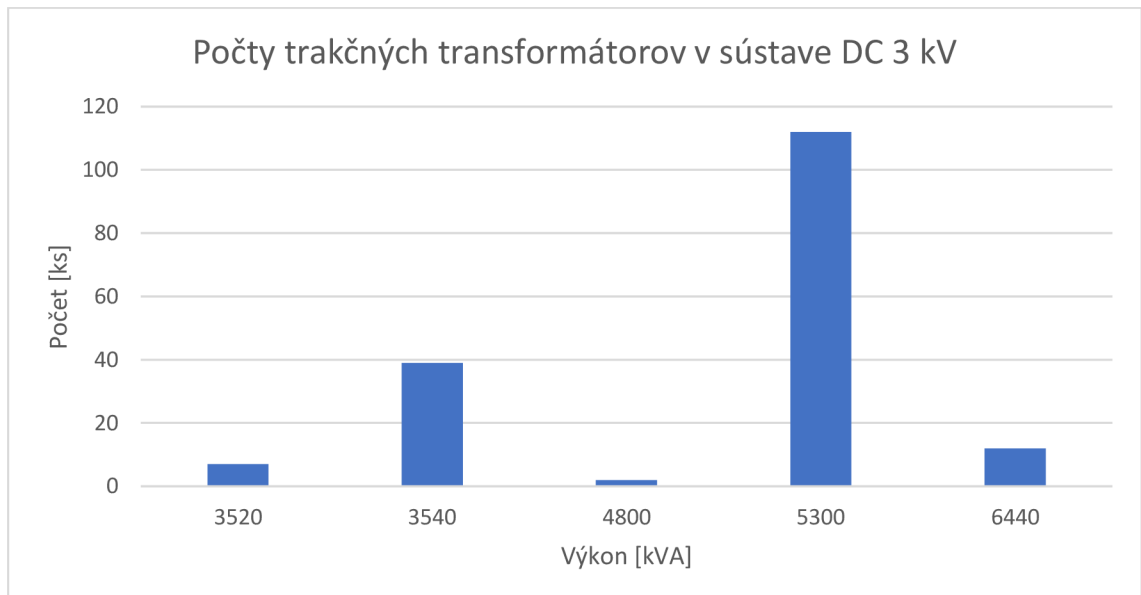


Obrázok 1.1 Mapa trakčných prúdových sústav v ČR [7]

## 1.2 Jednosmerná trakčná prúdová sústava 3 kV

Jednosmerná trakčná prúdová sústava 3 kV je napájaná z meniarňí, cez usmerňovače a transformátory, z trojfázovej energetickej siete. Inštalovaný výkon i vzdialenosť meniarňí sú závislé na veľkosti napätia v rozvode trakčného prúdu a na špičkovom dopravnom toku. Na výkon meniarňí majú vplyv tiež sklonové pomery, maximálny príkon vlakov jednotky a hustota dopravy. Nepravidelný a riedky chod veľmi ťažkých vlakov zvyšuje nároky nielen na inštalovaný výkon meniarňí, ale i na vodivý prierez rozvodu trakčného prúdu. Veľkosť jednosmerného napätia je ekonomicky a technicky obmedzená rozmermi elektrických hnacích vozidiel, resp. izoláciou a komutáciou trakčných motorov, ktoré sú priamo napájané prúdom z trolejového vedenia. Inštalovaný

výkon trakčných meniarňí býva 5 až 10 MW pri vzdialenostiach 20 až 30 km, podľa dopravného zaťaženia. Pri priamom napájaní trakčných meniarňí zo siete 110 kV, má meniareň dva hlavné transformátory a každý je dimenzovaný na plný výkon meniarne. Výkon transformátora sa delí na dva usmerňovače, ktoré môžu byť prepínateľné medzi oboma transformátormi. Trakčné meniarne napájané zo siete 110 kV sú riešené spoločne s rozvodňami a transformovňami, ktoré zásobujú distribučný rozvod 22 kV. Usmerňovacie jednotky sa v meniarňach pripájajú na napätie 22 kV, ktoré je vhodným napätím pre výrobu transformátorov typových výkonov, rádovo 4 MVA, aké sú potrebné pre usmerňovače. Hlavné transformátory 110/22 kV dodávajú konštantné napätie usmerňovacím skupinám. Pri napájaní trakčných meniarňí zo siete 110 kV s medzinapätím 22 kV, má trakčná meniareň pozdĺžne delenú prípojnicu 22 kV, ktorá umožňuje oddelené i spoločné napájanie meniarne i primárnej siete. [9] Regulácia napätia je možná na strane VVN. V rozvodniach a transformovniach 110/22 kV môže ktorýkoľvek transformátor 110/22 kV slúžiť ako záloha pre napájanie meniarne. Transformátory 22/3 kV sú prevádzkovo spoľahlivejšie, dávajú nižšie skratové prúdy na jednosmernej strane a sú chránené pred poruchami od atmosférických prepätí z vonkajšieho rozvodu VVN. Pri napájaní meniarne z rôzne použiteľnej rozvodne a transformovne 110/22 kV, ktoré je často využívané, odpadá vlastná rozvodňa, transformovňa a rozvodňa VN (22 kV), tým je meniareň podstatne jednoduchšia a z finančného hľadiska menej náročná ako pri priamom napájaní trakčných meniarňí. [10] Z obrázku 1.2 je vidieť, že pre jednosmernú sústavu 3 kV sa využíva celkovo 172 trakčných transformátorov a najviac využívané trakčné transformátory majú výkon 5300 kVA je ich 112. [25]

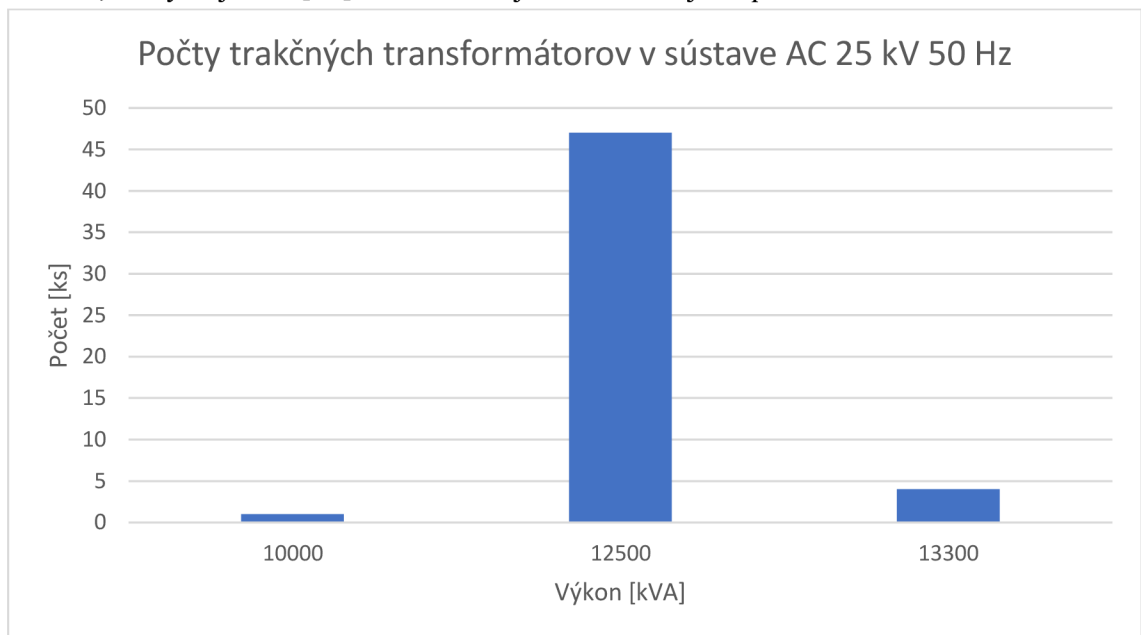


Obrázok 1.2 Graf počtu trakčných transformátorov v sústave DC 3 kV [25]

### 1.3 Jednofázová striedavá trakčná prúdová sústava 25 kV 50 Hz

Jednofázová striedavá trakčná prúdová sústava 25 kV, 50 Hz umožňuje priame napájanie trakčnej siete z trojfázovej energetickej sústavy VVN,  $f = 50$  Hz jednoduchou transformáciou napätia a štiepením fáz. Tento spôsob je zo všetkých používaných napájacích sústav najjednoduchší, investične najlacnejší a prevádzkovo najhospodárnejší. Nevýhodou tohto napájania je nesymetrické zaťažovanie trojfázovej siete. [9]

Táto sústava sa napája z trakčných napájacích staníc, ktoré sú jednoduché transformačné stanice s jednofázovou transformáciou napätia, ktoré majú malé straty, približne ako sieťové transformátory, ktoré môžu byť budované ako vonkajšie a môžeme ich diaľkovo ovládať. Vplyvom vysokého napätia v trakčnej sieti môžu byť ich vzdialenosti medzi sebou cca 50 km (dvojnásobne ako u jednosmernej trakcii). Tým, že zaťažíme iba jednu fázu odberom do trakčnej siete, dochádza k nesymetrii fázorov napätí v trojfázovej energetickej sieti. [10] Na obrázku 1.3 sú počty trakčných transformátorov a ich výkonov. V ČR je najviac používaný typ trakčného transformátora s výkonom 12,5 MVA, ktorých je 47. [25] Bližšie sa tejto téme venuje kapitola 3.2.2.



Obrázok 1.3 Graf počtu trakčných transformátorov v sústave AC 25 kV 50 Hz [25]

## 2. ZMENA INFRAŠTRUKTÚRY TRATÍ

Cieľom zmeny infraštruktúry tratí je dosiahnuť vyššiu efektivitu aktuálnych tratí. O tento problém sa stará Správa železníc (SŽDC). Medzi priority SŽDC patrí výstavba a modernizácia hlavných tratí, rekonštrukcia železničných uzlov, zaistenie interoperability železničnej siete a zvyšovanie bezpečnosti železničnej dopravy. V poslednom období bola medzi priority zaradená aj príprava spracovania vysokorýchlostných tratí v ČR. Jediná dostupná štúdia o danom probléme, ktorá bola vypracovaná na žiadosť ČR v rámci projektu "Interoperabilita - inovačný proces konkurencieschopnosti udržiteľného železničného systému". Stratégie ktoré sa v Českej republike zaviedli v rámci programu Interoperabilita železničnej infraštruktúry sa týkajú nasledujúcich bodov rozobraných v tejto kapitole. Program podpory urýchlenia výstavby tratí rýchlych spojení a príprava ich prevádzkovania v ČR. Hlavné ciele programu sú inovačné procesy konkurencie schopnosti udržateľného železničného systému – I-ŽELEZNICE plne korešponduje so strategickými zámermi rozvoja rýchlych železničných spojení v ČR. Program prechodu na jednotnú napájaciu sústavu 25 kV a 50 Hz. Tento program považujem za jeden z prioritných bodov pri železničnej doprave, lebo predpokladám že Česká republika sa chce udržať vo vývoji železničných tratí s porovnaním jej susediacimi štátmi. Ak zabezpečí rýchlosť pokroku aký majú jej susedné štáty, tak to môže mať pozitívny dopad na ekonomiku celej krajiny. [1]

Prechod na jednotnú striedavú napájaciu trakčnú sústavu umožní naplnenie viacerých cieľov. Prvým je zvýšenie výkonnosti železničnej dopravy efektívnejším napájaním, kde ide hlavne o odstránenie prepadov napätia na zberači vozidiel a s nimi spojeného poklesu trakčného výkonu. V dôsledku to povedie k zrýchleniu železničnej dopravy a umožní jazdy vlakov v tesnejšom slede. Takisto sa zvýši energetická účinnosť znížením strát vo vedení, ktoré sú pri jednosmernej sústave násobne vyššie ako pri striedavej a to má za následok zdraženie železničnej dopravy. [15] Jedným z hlavných dôvodov prechodu na jednotnú napájaciu striedavú sústavu je že súčasná napájaciu sústavu už nepostačuje súčasným nárokom prevádzky a jej posilnením by bolo dosiahnuté len obmedzené množstvo prínosov pri neprimerane vysokej ekonomickej náročnosti. Striedavý systém je všeobecne považovaný za hospodárnejší než jednosmerný. Preto je riešenie postupný prechod na výhodnejšiu striedavú sústavu. [4] Prechod zo systému 3 kV DC na systém 25 kV AC, ktorý disponuje výrazne vyššou prenosovou schopnosťou vytvára podmienky k tomu, aby vozidlá disponovali neobmedzovanými trakčnými vlastnosťami a dodržovali doby ciest stanovené cestovným poriadkom. [5] Nízka prenosová schopnosť napájacieho systému 3 kV, má vplyv na dodržovanie cestovného poriadku a aj na jeho vytváranie. Pre dopravu vlaku daným traťovým úsekom je potrebné určité množstvo energie. Ak nemá byť prekročený výkon pevných trakčných zariadení, tak nesmú vlaky jazdiť v intervale kratšom ako nasledujúce elektrické medzi obdobie. Výsledkom toho je že systém 3 kV

nemá schopnosť umožniť jazdu vlakov v tesnejšom poradí, ale systém s 25 kV to dokáže a to je veľkým prínosom pre oblasť dopravy. [5]

V minulosti sa na jednosmernej napájacej sústave používali lokomotívy s výkonom 2000 kW. Aktuálne sa tam používajú lokomotívy s výkonom okolo 6000 kW ktorých je približne 120. Tieto lokomotívy odoberajú 3x väčší prúd ako pôvodné lokomotívy a straty v trakčnom vedení sú až 9x vyššie. [5]

Dôsledky podľa dokumentu [5]:

- *„Veľké straty na trakčnom vedení ( 20 %-30 %)*
- *Nízky trakčný výkon vozidiel v dôsledku poklesu napätia, je to dôsledok nedodržiavania časov podľa cestovných poriadkov*
- *Nútené obmedzovanie výkonu vozidiel pri poklese napätia pod 2700 V*
- *Nesplnenie kvality napätia podľa EN 50 388*
- *Vysoké dotykové napätie na koľajniciach*
- *Poškodzovanie stykových tlmiviek vysokými prúdmi*
- *Poškodzovanie kovových konštrukcií bludnými prúdmi*
- *Ohrozovanie vozidiel pozdĺžnymi prúdmi*
- *Nebezpečie zavlečenia spätného prúdu do nulového vodiča systému 3 AC 230 V/400 V a do systému uzemnenia hromozvod“*

## **2.1 Efekty prechodu na 25 kV AC z 3 kV DC**

Podľa dopravnej sektorovej stratégie MD ČR [5] má v rozmedzí rokov 2015-2035 dôjsť na železnici ku:

- *„Nárastu prepravených výkonov osobnej železničnej prepravy na 1,434 násobok*
- *Nárastu prepravných výkonov nákladnej železničnej dopravy na 1,193 násobok“*

Trate elektrifikované na 3 kV patria do časti siete, ktorá je najviac zaťažená a najviac na nej rastie dopyt na prepravu. Preto sa predpokladá na týchto tratiach rast prepravných výkonov osobnej železničnej dopravy na 1,56 násobok, čo odpovedá ročnému nárastu prepravných výkonov o 2,8 % a takisto sa predpokladá aj rast nákladnej železničnej dopravy na 1,68 násobok, čo odpovedá ročnému nárastu prepravných výkonov o 3,4 %. [5]

### **2.1.1 Úspora elektrickej energie**

Pri dimenzovaní pevných trakčných zariadení treba uvažovať dynamickejší rozvoj a napájanie elektrických dráh dimenzovať tak, aby neobmedzovalo potenciál danej trate.

Nevýhodou systému 3 kV je nízka účinnosť trakčného vedenia, ktorá navyše klesá s rastúcim výkonom. V porovnaní so systémom 25 kV AC má nižšiu úspešnosť rekuperácie pri brzdení.



Úspory energie pri náhrade systému 3 kV systémom 25 kV majú 3 hlavné dôvody. Nižšie straty pri prenose energie z napájacej stanice k vozidlu, nižšie straty pri spätnom prenose rekuperovanej energie a vyššiu úspešnosť rekuperačného brzdenia

Celkové úspory elektrickej energie sa pohybujú na úrovni 30 % oproti aktuálnej spotrebe. [5]

### 2.1.2 Úspora financií na dokončovanie elektrifikácie sietí

Pri sieti 3 kV musia byť napájacie stanice inštalované blízko seba na vzdialenosti približne 20 km, čo má za následok nerentabilitu elektrifikácie týchto tratí. Naopak pri striedavej sieti 25 kV otvára lepšie možnosti, ktoré sú cenovo dostupnejšie hlavne pri použití jednej fázy s dvojstranným napájaním, kde sa napájacie stanice umiestňujú na vzdialenosť približne 100 km. [5]

Fakt, že počet jednosmerných trakčných transformátorov výrazne prevyšuje napájacie stanice striedavej siete potvrdzujú aj údaje ktoré sú na obrázku 1.2 a 1.3, z ktorých je vidieť, že v ČR je jednosmerných trakčných transformátorov o 120 viac ako striedavých.

### 2.1.3 Úspora pri budovaní vysokorýchlostného železničného systému

Zásadná investičná a prevádzková úspora pri zjednotení napájacieho systému železníc v ČR na hodnotu 25 kV sa týka vysokorýchlostného železničného systému. Aktuálny návrh vysokorýchlostných tratí (VRT) opisuje spojenie miesto Ústí na Labem, Praha, Přerov a Otrava. Tieto mestá sa aktuálne nachádzajú na tratiach so systémom 3 kV DC. VRT treba ale napájať napätím 25 kV lebo rýchlosť ktorú vlaky na tej trati budú dosahovať vyžaduje vysoké výkony, ktoré aktuálne 3 kV trate nie sú schopné zaistiť. Preto ak sa tento dopravný uzol zmení na 25 kV sieť tak to bude dobrou prípravou na neskoršie integrovanie vysokorýchlostných tratí. [5]

## 2.2 Riešenie pri prechode na jednotnú napájaciu hladinu

Harmonogram prechodu na striedavú sústavu bol stanovený na roky 2019-2037 a jeho cieľmi podľa dokumentu [5] sú:

- „Zvýšenie výkonnosti železničnej dopravy výkonnejším napájaním
- Zvýšenie energetickej účinnosti znížením strát vo vedení
- Zníženie nákladov na elektrifikáciu ďalších tratí
- Kompatibilita napájania VRT s konvenčnou železničnou sieťou
- Zefektívnenie prevádzky vlakov lepším využitím trakčných vlastností moderných hnacích koľajových vozidiel
- Zvýšenie výkonnosti pevných trakčných zariadení a zníženie strát na už elektrizovaných tratiach.
- Vytvorenie podmienok pre ekonomicky efektívnu elektrifikáciu ďalších tratí (hlavne na severe ČR)“

Na jednotný napájací systém 25 kV/50 Hz je potrebné prejsť programovo aby boli optimálne využité už pripravované modernizačné akcie na trakčnom zariadení súčasnej železničnej siete aj budúcej výstavby VRT. [5]

### 2.2.1 Napájacie stanice

Zámerom pri prechode napájania z DC trakcii na AC trakciu je využívať existujúce napájacie body z distribučnej sústavy tzn. prebudovať meniarne na transformovne.

Jednou s možností je použitie aktívnych balancérov kde bude zaistená symetria odberu a dá sa potom tieto odberné miesta využiť v rámci dovoleného výkonového limitu zo siete 110 kV v miestach nízkeho skratového výkonu. Balancéry zaistia rozloženie jednofázového odberu do všetkých troch fáz distribučnej siete. Rovnaké výsledky sa dajú dosiahnuť aj pri použití statických meničov ako technológie pre symetrizáciu odberu. Tie pri napájaní trakčného vedenia 25 kV AC jednotnou fázou zaistia rovnomernosť zaťaženia všetkých troch fáz distribučnej siete. Táto technológia sa používa v zahraničí z rovnakých dôvodov. [5]

Týmto riešením by sa splnili požiadavky zo strany železnice aj energetiky. Vo výnimočných prípadoch sa uvažuje aj nad rekonštrukciou TNS napájaných z rozvodov 22 kV. [5]

O možných spôsoboch riešenia napájacích staníc sa táto práca detailnejšie zaoberá v kapitole 4.5 a 4.6.

### 2.2.2 Technické riešenie trakčného vedenia

Pri prechode na novú napájaciu hladinu bude treba riešiť pretransformovanie vedenia na 25 kV AC. Tento prechod je rozdelený na 3 etapy.

Etapa 1 zahŕňa zmenu izolačného stavu trolejových vedení pre navrhovanú hladinu 25 kV AC. V tejto etape sa predpokladá aj montáž bleskoistiek alebo obmedzovačov prepätia pre striedavú AC sústavu 25 kV 50 Hz s pripojením TV tak, že súčasne zostane funkčná existujúca ochrana pred atmosférickým prepätím trakčnej sústavy DC 3 kV až po dokončenie ochrany v etape 3. [5]

Etapa 2 zahŕňa pripojenie napájacích staníc, spínacích staníc, a ostatných transformátorov na TV. Takisto sa budú stavať nové napájacie stanice a transformátory. Do trolejových vedení budú vložené deliče TV 25 kV pre neutrálne pole napájacích a spínacích staníc a provizórne neutrálne pole pre styk trakčných sústav. Ďalej táto etapa plánuje predprípravu pre etapu 3, aby sa pri nej minimalizovala výluka prepojovaného úseku, ako je realizácia nových napájacích previsov a káblových vedení. [5]

Etapa 3 zahŕňa pripojenie napájacích a spínacích staníc na TV podobne ako etapa 2. Po odstavení súčasných trakčných meniarňí sa počíta s odpojením a demontážou bleskoistiek TV DC sústavy, vzdušných a káblových napájacích vedení s demontážou spätných káblových vedení vrátane rozvádzačov. Na miestach kde bude napájacía stanica

AC 25 kV v blízkosti existujúcej DC meniarne sa počíta s využitím vzdušných liniek pre pripojenie napájacích staníc na TV. [5]

### **2.2.3 Technické riešenie zabezpečovacieho zariadenia**

Zabezpečovacie zariadenia slúžia predovšetkým na kontrolu voľnosti úseku trate. Pokiaľ je zariadenie vyhovujúce tak sa uvažuje len o výmene jeho kabeláže v niektorých prípadoch dochádza aj k výmene prostriedkov pre kontrolu voľnosti úseku na ktorom je zabezpečovacie zariadenia inštalované. [5]

### **2.2.4 Technické riešenie oznamovacieho zariadenia**

Pri prechode na AC sústavu sa zrušia diaľkové káble a traťové metalické káble. Po prechode na AC sústavu sa budú využívať optické káble z firmy ČD-Telematika a.s. Na nových alebo existujúcich optických trasách sa navrhuje vybudovať nový prenosový systém s paketovým synchronným prenosom. Dispečerská riadiaca technika je súčasne prenášaná na metalických okruhoch, v prípade prechodu na optické káble bude nutná náhrada aktuálneho systému na systém, ktorý je prevádzkovateľný na nových prenosových systémoch tj. systémy s paketovým prenosom po ethernet sieť. [5]

### **2.2.5 Odstránenie stykových miest**

Stykové miesta sú miesta kde sa stretávajú dve sústavy ktoré majú rôzne napájacie napätové hladiny. Aktuálne je takýchto miest v ČR 7: Kadaň, Králův Dvůr, Benešov, Kutná Hora, Svitavy, Nezamyslice, Nedakonice.

Stykové miesta komplikujú prevádzku z dôvodu keď vlak potrebuje zrýchliť pri rozjazde aby získal traťovú rýchlosť a v tom čase prechádza cez stykové miesto tak musí prerušiť svoju ťažnú silu a tým dochádza k strate času ktorá sa dá kompenzovať jedine následnou vyššou rýchlosťou na trati čo má zas za následok vyššiu spotrebu elektrickej energie. Keď sa prejde na jednotnú napájaciu sústavu a zaniknú stykové miesta tak to rapídne urýchli železničnú dopravu. [5]



### 3. PODMIENKY PRIPOJENIA TRAKČNEJ SÚSTAVY K DISTRIBUČNEJ SÚSTAVE ČR

Podmienky pripojenia k trakčnej sústave opisujú také stavy, ktoré sú potrebné pre bezpečné pripojenie trakčnej sústavy k sústave distribučnej.

#### 3.1 Napätie a frekvencia trakčných sústav

Podľa literatúry [6] z ktorej som čerpal informácie je napätie a frekvencia trakčných zariadení usmernená normou ČSN EN 50163 ed. 2 - Drážni zařízení - Napájecí napětí trakčních soustav, s. 9,10; odstavec 4, ktorá stanovuje základné charakteristiky napájacieho napätia trakčných sústav, ako sú pevné trakčné zariadenia, vrátane pomocných zariadení napájaných z trakčného vedenia a základné charakteristiky napájacích napätí dráhových vozidiel. [6]

##### 3.1.1 Napätie

Pri napätí musia byť podľa dokumentu [6] splnené nasledujúce požiadavky:

- a) „doba trvania napätia medzi  $U_{min1}$  a  $U_{min2}$  nesmie byť dlhšia ako 2minúty,
- b) doba trvania napätia medzi  $U_{max1}$  a  $U_{max2}$  nesmie byť dlhšia ako 5minút,
- c) napätie naprázdno na zberniciach napájacej stanice musia byť nižšie alebo rovné napätiu  $U_{max}$ . Pre DC napájacie stanice môže byť toto napätie naprázdno byť nižšie alebo rovné  $U_{max2}$  za podmienky, že ak je vlak pripojený, tak jeho napätie na pantografe musí byť v súlade s tabuľkou a jej požiadavkami,
- d) za normálnych prevádzkových podmienok musí byť napätie v rozmedzí  $U_{min1} \leq U \leq U_{max2}$ ,
- e) za mimoriadnych prevádzkových podmienok nemôžu napätia v rozmedzí  $U_{min2} \leq U \leq U_{min1}$  ktoré sa nachádzajú v tabuľke spôsobiť žiadne škody ani poruchy,
- f) ak je dosiahnutá hodnota napätia medzi  $U_{max1}$  a  $U_{max2}$ , musí na nestanovenú dobu nasledovať úroveň nižšia alebo rovná  $U_{max1}$ . Hodnoty napätí medzi  $U_{max1}$  a  $U_{max2}$  môžu byť dosiahnuté len pri krátkodobých stavoch ako sú: rekuperačné brzdenie, prepínanie v systéme pre reguláciu napätia ako pri mechanickom prepínači odbočiek.
- g) najnižšie prevádzkové napätie za mimoriadnych prevádzkových podmienok je  $U_{min2}$  najnižšia medzná hodnota napätia trakčného vedenia, pri ktorej majú dráhové vozidlá pracovať“

##### 3.1.2 Frekvencia

Frekvencia 50 Hz elektrickej trakčnej siete je daná trojfázovou sieťou. Frekvencia 16,7 Hz elektrickej trakčnej sústavy nie je daná trojfázovou rozvodnou sieťou ale dopĺňujúcimi prvkami sústavy.

Pri normálnych prevádzkových podmienkach musí stredná hodnota základnej frekvencie meranej 10 s odpovedať rozsahu VN napájacej siete podľa dokumentu [6] nasledovne:

a) „*Sústavy so synchronným pripojením k prepojenej sústave*

*50 Hz ± 1 % počas 99,5 % roku*

*50 Hz + 4 % / - 6 % počas 100 % doby*

b) *Sústavy bez synchronného pripojenia k prepojenej sústave ako sú napájacie sústavy na niektorých ostrovoch*

*50 Hz ± 2 % počas 95 % týždňa*

*50 Hz ± 15 % počas 100 % doby*

*Pri trakčnej sústave 16,7 Hz platia nasledovné hodnoty:*

a) *Sústavy so synchronným pripojením k prepojenej sústave*

*16,7 Hz ± 1 % počas 99,5 % roku*

*16,7 Hz ± 6 % počas 100 % doby*

b) *Sústavy bez synchronného pripojenia k prepojenej sústave ako sú napájacie sústavy na niektorých ostrovoch*

*16,7 Hz ± 2 % počas 95 % týždňa*

*16,7 Hz ± 15 % počas 100 % doby*

c) *Sústavy prepojených s dráhovou prepojenou sieťou 16,7 Hz*

*16,7 Hz + 2 % / -3 % počas 100 % doby“*

## 3.2 Trakčné transformovne a meniarne

Trakčné napájacie stanice slúžia na úpravu napájacieho napätia spravidla trojfázovej sústavy VVN alebo VN na trakčnú napájaciu prúdovú sústavu vhodnú pre napájanie elektrických dráhových vozidiel. [6]

### 3.2.1 Trakčné meniarne

Trakčné meniarne pre trakčnú napájaciu prúdovú sústavu DC 3 kV sú napájané z trojfázovej siete VVN 110 kV, 50 Hz. Kvôli kompenzácii úbytkov v sieti VVN 110 kV sa používa napájanie meniarne s medzistupňa, ktorý tvorí transformovňa zo 110 kV na 22 kV. Táto zároveň slúži aj na napájanie verejnej siete. Výstavba transformátorovej stanice a rozvodne 110/22 kV má zvyčajne usporiadanie, ktoré umožňuje nerušené napájanie meniarne pri poruche na jednom z prívodov 110 kV aj pri výpadku jedného z transformátorov 110/22 kV. V meniarne je transformátor 22/3 kV a diódový usmerňovač. Diódový usmerňovač je šesť alebo dvanásť pulzný, aby zvlnenie usmerného napätia bolo minimálne. [12]

### 3.2.2 Trakčné transformovne

Trakčné transformovne sú napájané priamo z trojfázovej distribučnej siete 110 kV. Výhody použitia trakčných transformovní, ktorých sekundárne napätie je 25 kV, je ich možná vzdialenosť, ktorá sa pohybuje okolo 80 km. Je možné ich vybudovať ako vonkajšie čím sa zabezpečí zníženie investičných nákladov. Trakčné transformovne je možné ovládať diaľkovo. Nevýhoda použitia transformátorov je nesymetrické zaťažovanie trojfázovej siete VVN a nesínusový priebeh odoberaného prúdu koľajovými vozidlami s usmerňovačmi, ktorý spôsobuje vznik vyšších harmonických v trakčnom vedení a napájacej sústave. Nevýhodou je tiež nestabilný fázový posun základnej harmonickej prúdu proti napätiu v trakčnom vedení, ktorý sťažuje kompenzáciu účinníka. Aby účinok nepriaznivých vplyvov na sieť 110 kV bol minimálny, musí mať napájacia trojfázová VVN sieť dostatočne veľký skratový výkon, aby nesymetrické zaťaženie nespôsobovalo nedovolenú uhlovú a napätovú nesúmernosť medzi fázami. Ďalšou podmienkou je, aby výkonová záťaž bola čo najrovnomernejšie rozdelená na všetky tri fázy napájacej sústavy VVN. Jedno z riešení je napájanie pomocou jednofázových transformátorov, pripojených postupne na všetky tri združené napätia sústavy 110 kV. Pokiaľ je zaťaženie transformovní napájaných z toho istého vedenia VVN približne rovnaké, vzniká malá asymetria v sieti 110 kV. Na železničiach sa však používa zapojenie dvoch jednofázových transformátorov do V alebo pripojením jednofázových transformátorov striedavo na všetky fázy kedy, primárne vinutia transformátorov sú zapojené na rozdielne združené napätia. Pri rovnakom odbere v oboch napájacích úsekoch a pri rovnakom napätí a účinníku na sekundárnej strane vzniká prúdová a výkonová nesymetria 50 %, ale pri iných podmienkach sa môže prúdová nesymetria meniť v rozsahu od 0 do 100 %. Táto nesymetria spôsobená nevyváženým trakčným odberom má nepriaznivé účinky na trojfázovú sieť 110 kV. Z týchto dôvodov sa pri napájaní trakčnej siete 25 kV, 50 Hz budujú transformovne na miestach s veľkým skratovým výkonom siete 110 kV, aby účinky nevyváženého trakčného odberu boli minimálne. Napájanie úsekov siete 25 kV, 50 Hz je spravidla jednostranné, keďže susedné úseky bývajú napájané z rôznych fáz. Pri výpočtoch úbytkov napätia v troleji je potrebné do úvahy brať aj indukčnosť slučky trolej – koľaj, pretože ide o obvod napájaný striedavým prúdom. Paralelná spolupráca trakčných transformovní 25 kV, 50 Hz, ktorá je bežná pri jednosmerných napájacích sústavách, vyžaduje u sústavy jednofázovej niektoré technické a organizačné opatrenia. Napriek tomu bude dochádzať k vzájomnému ovplyvňovaniu trakčnej sústavy a napájacej VVN siete cez trakčný transformátor. Na železničiach sa paralelná spolupráca trakčných transformovní v praxi nerealizovala a nepoužíva sa. [12]

České dráhy používajú vo veľkej miere olejové transformátory od výrobcu Škoda Plzeň(ETD) s prevodom 110/27 kV, typu: EJHR28M-7 je to nový typ transformátoru s Cu vinutím.[6] Jeho parametre podľa [25] sú:

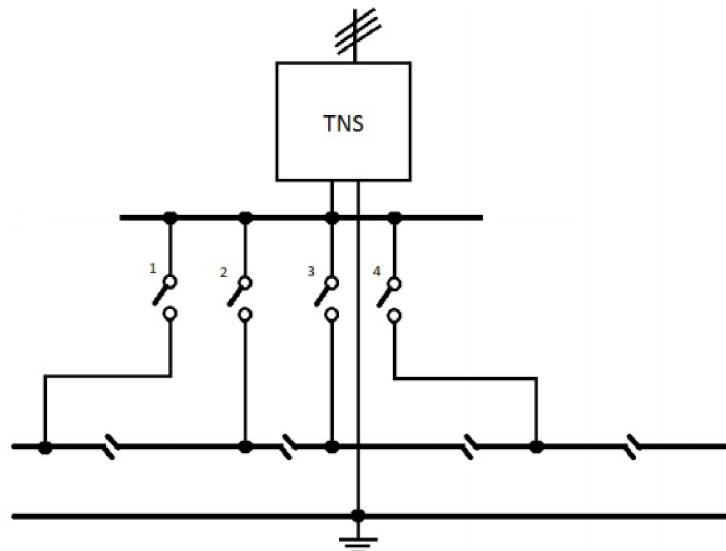
- „*menovitý výkon 12,5 MVA*
- *primárne napätie 110 000 V*
- *primárny prúd 114 A*
- *sekundárne napätie 27 000 V*
- *sekundárny prúd 463 A*
- *frekvencia 50 Hz*“

## 4. SPÔSOBY NAPÁJANIA TRAKČNÝCH SIETÍ

Trakčná sieť je napájaná trakčným prúdom z trakčných meniarňí alebo z trakčných transformovní. Trakčná sieť sa delí na úseky, ktoré sa oddelene napájajú z dôvodu lokalizácie poruchy. Napájané úseky sa dajú rozdeliť podľa spôsobu ich napájania.

### 4.1 Jednostranne sústredené napájanie trakčných úsekov

Každý úsek má svoj vlastný napájač. Pri jednostrannom napájaní je zo spoločnej stanice napájaný väčší počet trakčných úsekov. V koľajiskách uzlových staníc alebo v mestskej doprave sa využíva práve tento spôsob napájania. Výhodami tohto napájania sú spoľahlivosť a jednoduchá lokalizácia porúch, dobré využitie vodivého prierezu a prehľadnosť napájacích schém. Medzi nevýhody patria v niektorých prípadoch dlhé napájacie káble a krátke vzdialenosti úsekov. [11]

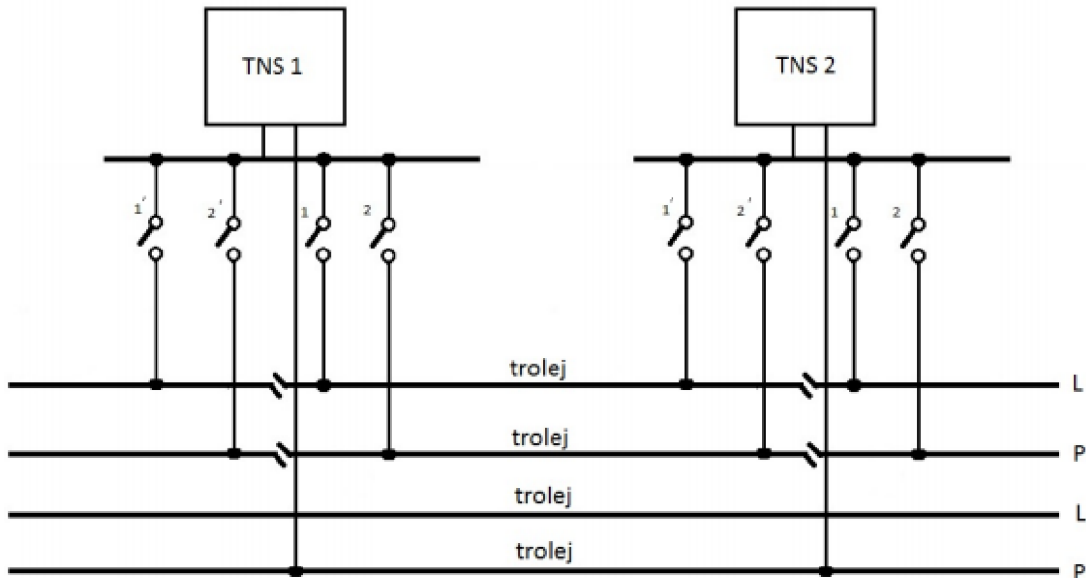


Obrázok 4.1 Schéma jednostranného napájania [14]

### 4.2 Dvojstranne rozložené napájanie trakčnej siete

Tento spôsob využíva napájanie trakčnej siete z jej oboch koncov za pomoci napájacích staníc. Týmto spôsobom napájania je možné predĺžiť vzdialenosť úseku s ohľadom na úbytok napätia. Toto zapojenie sa využíva pri dvojkoľajných železničných tratiach, kde sa napája oddelene trolejové vedenie pravej a ľavej koľaje. Pri tomto zapojení je veľkým pozitívom že pri poruche môže byť stále v prevádzke jedna koľaj nakoľko sa tu uplatňuje energeticky nezávislá prevádzka na oboch koľajniciach.

Bezpečné vypnutie poruchového úseku je zaistené elektrickou väzbou napájačov tak, že vypínač, ktorý je bližšie k miestu poruchy alebo vypne prvý, tak musí rozpojiť aj priradený obvod vypínača z druhej strany úseku. [11]

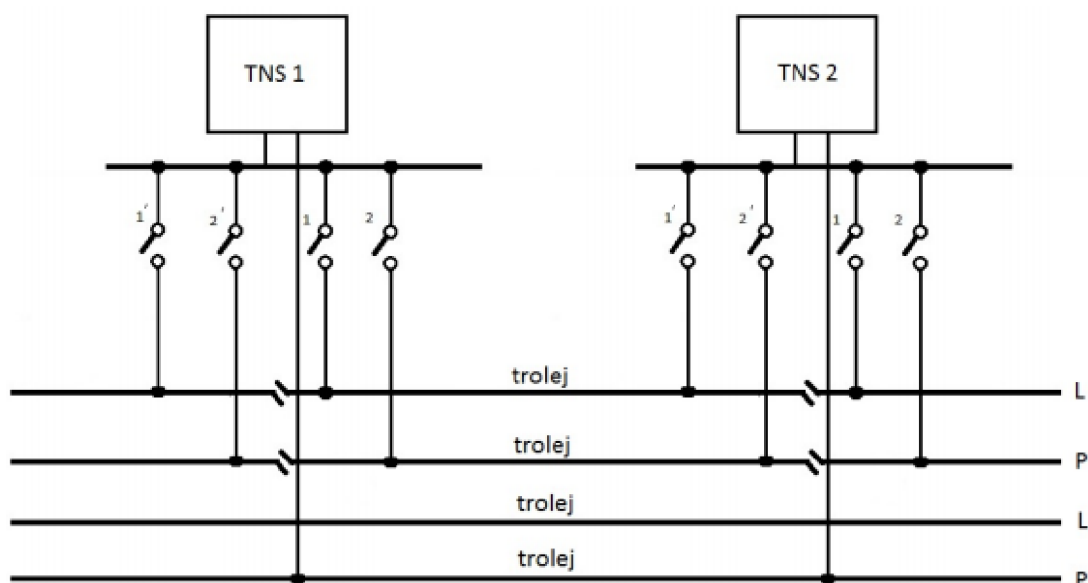


Obrázok 4.2 Schéma dvojstranného napájania [14]

### 4.3 Štvorstranné napájanie dvojkoľajovej trate

Štvorstranné napájanie sa delí na dve typy jedným je napájanie dvojkoľajovej trate s priečnymi spínačmi. Tento spôsob napájania využíva vodivý prierez trolejových a zosilňujúcich vedení oboch koľají. Priečne spojenie sa vytvára na viacerých úsekoch vedenia. Pri prúdových poruchách a pri rozpojení trolejových vedení z oboch smerov sú priečne spínače napät'ovo závislé. To znamená, že vypínajú ak je trolejové vedenie bez napätia a samé sa zapínajú v prípade ak má vedenie z oboch strán pevné napätie.

Druhým typom je napájanie dvojkoľajovej trate so spínacími stanicami, ktoré sa vykonáva pozdĺžnym elektrickým rozdelením obojstranne napájaného dvojkoľajového úseku uprostred a premostením deliacich miest štyrmi smerovacími vypínačmi spôsobom podobnému ako v rozvodni napájačov v napájacej stanici vznikne štvorstranné napájanie so spínacou stanicou. Výhody napájania týmito napájacími stanicami sú priečne spojenie trolejového vedenia oboch prevádzkových smerov, pozdĺžne rozdelenie úsekov k presnejšej lokalizácii porúch vzniknutých na vedení. Pri poruche na nejakom mieste sa vypne len polovičná dĺžka jedného úseku. Bezpečnosť vypínania čiastočného úseku z oboch strán sa zabezpečuje smerovanými ochrannými vypínačmi v spínacej stanici, ktoré môžu mať elektrickú väzbu s vypínačom v blízkej napájacej stanici. [11]



Obrázok 4.3 Schéma štvorstranného napájania dvojkoľajovej trate so spínacou stanicou [14]

#### 4.4 Sústava AC 25 kV 50 Hz

Jedná sa o AC jednofázovú napájaciu sústavu, ktorá sa využíva vo väčšine štátov Európskej únie. V ČR sa používa na 42 % tratí hlavne v južnej časti. Pri tejto napájacej sústave nie je možné obojstranné napájanie z dôvodu nežiaducich prietokov vyrovnávajúcich prúdov medzi napájacími stanicami. Preto sa prevádzkuje výhradne ako paprsková sústava. Z každej napájacej stanice je trakčné vedenie napájané až po spínaciu stanicu, ktorá slúži na predĺženie napájaného úseku v prípade poruchy alebo výluky jednej zo susedných trakčných transformovní. [6]

Jej výhodami sú malé straty v trolejovom vedení vzhľadom k sústavám nižších napätových hladín, možnosť použitia menších prierezov trolejového vedenia, väčšia vzdialenosť medzi napájacími stanicami, jednoduchšie prevedenie napájacích staníc v porovnaní s TNS sústavy DC. [6]

Medzi jej najväčšiu nevýhodu z môjho pohľadu patrí nesymetrické zaťaženie trojfázovej distribučnej napájacej sústavy dodávateľa. Nesymetria spôsobuje zvýšený ohrev transformátoru, preto je potrebné brať na tento faktor ohľad pri projektovaní danej sústavy. Ďalšou nevýhodou je rekuperácia vo vzťahu k dodávateľovi energie, ktorá nie je doriešená a od roku 2008 je rekuperácia zakázaná. Problém s rekuperáciou je momentálne riešený použitím spätných wattových ochrán v TNS, ktoré odopnú stanicu od distribučnej siete v prípade, keď začne tiecť prúd smerom do distribučnej siete, toto riešenie je problematické a môže zapríčiniť vypnutie celej TNS. Poslednou nevýhodou je použitie filtra kompenzačného zariadenia pre dodržanie požiadaviek distribútora

odoberanej elektrickej energie. Hodnota účinníku, ktorá sa požaduje je 0,95 až 1 indukčného charakteru. [6]

#### 4.4.1 Trakčné transformovne

Trakčné transformovne pre toto využitie sú bližšie popísané v kapitole 3.2.2.

#### 4.4.2 Spínacie stanice

Spínacie stanice sa budujú v napájacej sústave pre zvýšenie spoľahlivosti napájanie elektrizovaných sietí, zvýšenie výkonnosti pevných elektrických trakčných zariadení a pre zvýšenie priepustnosti elektrizovaných tratí. Základne sa delia podľa počtu vypínačov na viac vypínačové a jedno-vypínačové spínacie stanice. Nedochádza v nich k transformácii napätia, slúžia pre rozvetvenie siete vysokého napätia. [6]

Viac vypínačové spínacie stanice musia umožňovať jednostranné napájanie trakčného vedenia z príslušných TNS, dvojstranné napájanie trakčného vedenia pri paralelnej spolupráci príslušných TNS, pozdĺžne prepojenie oboch stôp trakčného vedenia pri prerušení napájania z jednej TNS, priečne prepojenie oboch stôp trakčného vedenia. Pri napájaní sústavy 25 kV 50 Hz musia ochrany viac vypínačovej spínacej stanice spĺňať podmienky, ktoré znemožnia prepojenie oboch príslušných trakčných transformovní, odpojiť selektívne poruchový úsek a znemožniť samovoľné vypnutie vypínača podpäťovou ochranou pokiaľ napätie v spínacej stanici neklesne pod 17,5 kV. [6]

Jedno vypínačové spínacie stanice slúžia k priečnemu prepojeniu oboch stôp trakčného vedenia alebo k pozdĺžnemu prepojeniu jednej stopy deleného vedenia. Spínacie stanice pre pozdĺžne spínanie jednej stopy trakčného vedenia na jednokolajovej trati musia znemožniť prepojenie oboch príslušných trakčných transformovní. [6]

#### 4.4.3 Filtračno-kompenzačné zariadenia

Filtračno-kompenzačné zariadenia zaisťujú optimalizáciu odberu elektrickej energie pomocou dynamických kompenzátorov. Filtre sú tvorené sériovou kombináciou kondenzátoru a filtračnej tlmivky, slúžia ako sériové rezonančné obvody, ktoré filtrujú nežiadúce vyššie harmonické frekvencie a súčasne dodávajú do siete kapacitný prúd, ktorý je konštantný. Pri nezaťaženej sieti sa tento kapacitný prúd kompenzuje dekompenzačným členom s riadením prúdu meničom v dekompenzačnej tlmivke. Galvanické oddelenie hradla meniča umožňuje optotyristor vďaka svetelnému vláknu. Parametre optotyristorov umožňujú výrobu meničov na plné napätie sústavy 25 kV. [6]

#### 4.4.4 Odpínače a vypínače

Odpínače sa v rozvodniach nepoužívajú, inštalujú sa na vývodoch z napájacích staníc do trakčného vedenia namiesto odpojovačov. Používané typy odpínačov sú: IVEP, DRIBO, SEZ Krompachy. Pre spínanie vonkajších vedení sa používa jednopólový odpínač typu OJC-Ž. [6] Tento odpínač slúži na viditeľné odpájanie zariadenia od napätia



do hodnoty menovitého prúdu a pozostáva z dvoch pevných a jedného pohyblivého izolátora. [16]

V nových rozvodniach sa používajú výhradne vákuové vypínače typu Siemens 3SH4784 alebo SERW 1CVD-02712. Menovitý prúd vypínačov je 1250 A a vo výnimočných prípadoch 1600 A. [6]

#### 4.4.5 Rozvádzače transformovní

Rozvádzače trakčných transformovní sú vo vonkajšom alebo vnútornom prevedení. Novšie rozvodne sú vo vnútornom prevedení, kde sa najčastejšie používa rozvádzač 25 kV AC typu SAxx. Ďalší typ rozvádzačov je od firmy EŽ Praha s označením EZB-AC určených pre rozvod striedavého prúdu v trakčných napájacích a spínacích staniach pre sústavu s označením - 1PEN 50 Hz 25 kV/TN-C. Rozvodne sú jednosystémové s pozdĺžnym delením, vypínače alebo vypínače s prúdovým meničom sú umiestnené na výsuvných vozíkoch. [6]

#### 4.4.6 Ochrany

Sústava ochrán v trakčnej napájacích a spínacích staniach sa riadi zásadami podľa normy ČSN 33 3051. Musia zaistiť selektívnu činnosť pri vypínaní skratov a preťažení pri mimoriadnom zaťažení aj pri predpokladaných prevádzkových stavoch. Systém ochrán proti skratu a preťažení pri trakčných transformovniach musí brať do úvahy nesínusový časový priebeh prúdu odoberaného z trakčnej transformovne a spínacej stanice. Pri skratoch na trakčnom vedení musia vypínače odpojiť vedenie najneskôr do 0,6 s. Skraty, ktoré sú vzdialené od trakčnej transformovne do jednej pätiny až jednej štvrtiny celkovej vzdialenosti medzi trakčnými transformovňami a spínacími stanicami musia byť vypínané bez časového oneskorenia ochrany.

Ochrany transformátorov:

- nadprúdová okamžitá ochrana pred účinkami skratov
- nadprúdová časovo nezávislá ochrana proti preťaženiu
- zemná kostrová ochrana pred prierazom vinutia na kostru alebo rozdielová ochrana
- spätná wattová ochrana s možnosťou blokovania vypínacej funkcie
- podpäťová ochrana vo funkcii ochrany pred skratom na prípojniciach AC 27 kV
- prepäťová ochrana
- Buchholzové plynové relé – signalizuje a vypína transformátor pri vzniku plynu v nádobe transformátora
- teplomer , ktorý automaticky spína ofukovanie
- tepelná ochrana – zaistí vypnutie stroja pri nadmernom oteplení vinutia transformátora aby nedošlo k jeho zničeniu [6]

Doporučené ochrany vo vývodoch:

- nadprúdová okamžitá ochrana pred účinkami skratov

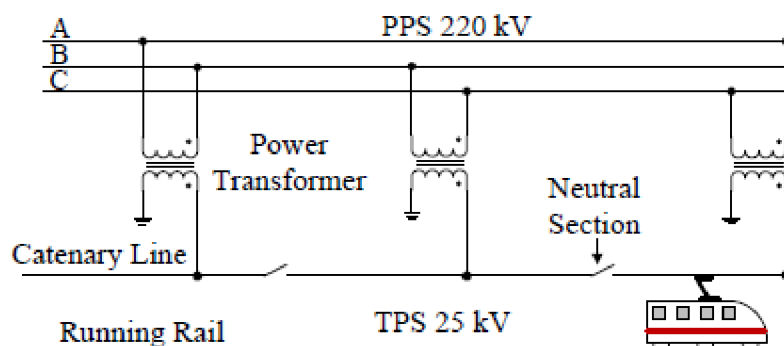
- nadprúdová časovo nezávislá ochrana pred účinkami vzdialených skratov
- dištančná napájačová ochrana so vstavaným napäťovým a nadprúdovým článkom, ktorá nahradzuje dve vyššie spomenuté nadprúdové ochrany
- automatika opätovného zapínania – trvanie bez napäťového stavu 15-20 s
- časový článok pre zabezpečenie selektivity napájačovej dištančnej ochrany s ochranami v spínacích staniách
- ďalšie ochrany podľa miestnych prevádzkových podmienok – podpäťová, prepäťová, spätná wattová [6]

## 4.5 Topológia pripojenia na distribučnú sústavu

Najjednoduchšia a najmenej nákladná konfigurácia pre železničný systém, ktorý pracuje na striedavej sieti je na základe jednofázového transformátora, ktorý je pripojený k trojfázovej sieti na primári a na sekundári k trolejovému vedeniu. Toto zapojenie má ale množstvo nevýhod napríklad: zemné prúdy môžu rušiť komunikačné zariadenia, veľkú impedanciu vedenia a tým spojený pokles napätia, rozdiel potenciálu medzi zemou a trolejovým vedením, ktorý môže spôsobovať nebezpečenstvo. [18]

### 4.5.1 Metóda striedania fáz s použitím výkonových transformátorov

Pri tejto metóde je nadzemné trolejové vedenie rozdelené na časti, ktoré sú elektricky izolované, aby sa zabránilo skratom medzi jednotlivými fázami. Zóny, ktoré sú neelektrifikované sa nazývajú neutrálne úseky a ich dĺžka sa pohybuje v rozmedzí niekoľkých metrov. Toto prevedenie je starý a ekonomický spôsob dosiahnutia rovnováhy medzi fázami. Striedanie fáz ale nerieši problém s nerovnováhou prúdového zaťaženia, keď je trolejové vedenie nerovnomerne zaťažené. Táto topológia zapojenia zabraňuje zdieľaniu záťaže medzi susednými jednofázovými výkonovými transformátormi. [17]



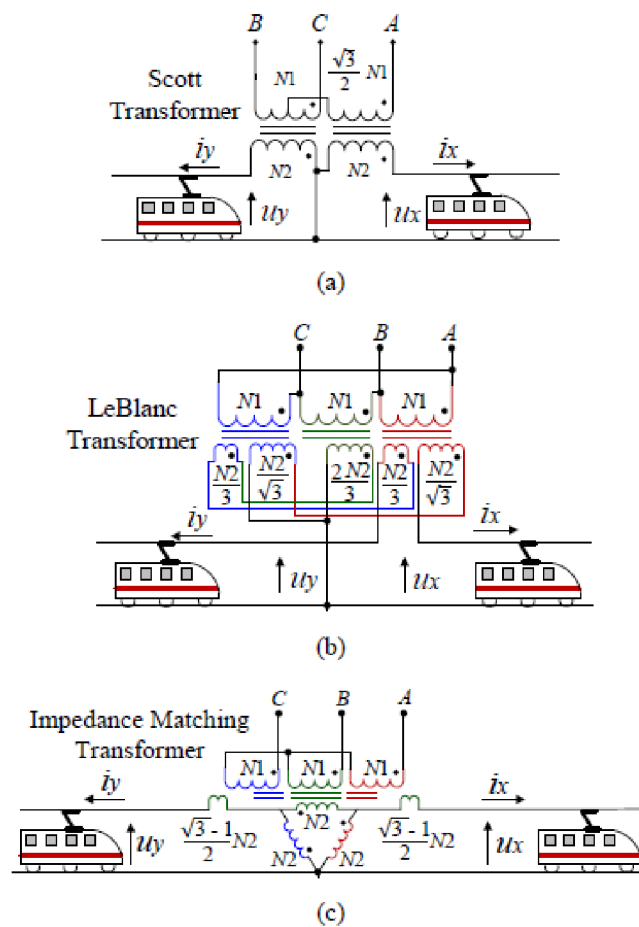
Obrázok 4.4 Metóda striedania fáz [17]

Na obrázku 4.4 je znázornené použitie výkonových transformátorov, ktoré svojim zapojením zabezpečujú jednofázové napájanie pre trolejové vedenie. Transformátory v tomto zapojení sú vždy pripojené na inú kombináciu fáz. Toto je hlavným znakom metódy striedania fáz pri napájaní trakčného trolejového vedenia. [17]

#### 4.5.2 Použitie symetrických trojfázových výkonových transformátorov

Pri niektorých špeciálnych typoch trojfázových výkonových transformátoroch je známe, že sa používajú v dvojfázových napájacích prípojkách a v trakčnej distribučnej sieti. Je to spôsobené niektorými technickými vlastnosťami, ktoré pomáhajú zlepšeniu kvality elektrickej energie. K tomuto zlepšeniu dopomáhajú schopnosťou redukcie spätnej zložky prúdu na strane dodávateľa elektrickej energie. Medzi najviac používané vyvážené transformátory patria transformátory v Scottovom zapojení a LeBlancovom zapojení, impedančné prispôbenie a Woodbridge zapojenie. Spätaná zložka prúdov vstupujúcich do distribučnej siete na strane dodávateľa sa zanedbáva ak majú všetky elektrifikované úseky rovnaké zaťaženie. Pokiaľ ide o skreslenie spôsobené vyššími harmonickými, tak môže byť voľba vyváženého transformátora zaujímavá, nakoľko dokáže niektoré harmonické odstrániť. Po zvážení faktov o zložitom prevedení týchto transformátorov ako je zložitá konfigurácia vinutia a rôzny počet závitov na každej fáze, môžu samotné transformátory spôsobiť nedokonalé vyváženie aj v tom prípade ak je zaťaženie rovnaké v každej elektrifikovanej časti. Pri používaní vyvážených transformátorov by sa mal brať ohľad na niektoré nevýhody, ktoré tieto transformátory prinášajú. Medzi tieto nevýhody patrí využitie materiálov, ktorými sú železo a meď, týchto výkonových transformátorov, ktoré je relatívne nízke v porovnaní s normálnymi nevyváženými výkonovými transformátormi v zapojení V/v. Požadovaná úroveň izolácie napätia je vysoká a nákladná pre výkonové transformátory Scott a LeBlanc, pretože v ich primárnych vinutiach nie je žiadny neutrálny bod. [17]

Obrázok 4.5 a) znázorňuje zapojenie pomocou transformátora typu Scott, Obrázok 4.5 b) znázorňuje zapojenie pomocou transformátora LeBlanc. Obrázok 4.5 c) znázorňuje zapojenie transformátora s vyváženou impedanciou, ktorý je najviac používaný v Číne. Z vyššie uvedených príkladov zapojenia vyváženými transformátormi je vidieť zložitosť vnútorného zapojenia jednotlivých traf, ktoré je neúmerne náročnejšie ako pri transformátoroch zapojených do V/v, ktoré môžu byť preťažené a preto sú často používané v železničných napájacích systémoch. [17]

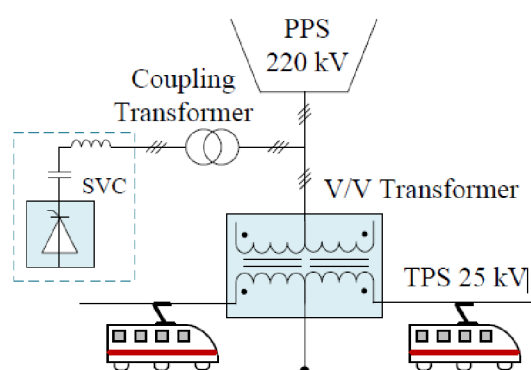


Obrázok 4.5 Zapojenie pomocou: a) Scottoovho transformátora, b) LeBlancovho transformátora, c) Transformátora prispôsobenia impedancie [17]

S narastajúcim dopytom po elektrifikácii železničných tratí nastala implementácia dynamických kompenzácií. Boli nasadené výkonové kompenzátory, ktorých princíp je založený na technológii výkonovej elektroniky zo 70. rokov 20. storočia. S narastajúcimi požiadavkami a záťažami kladenými na trakčnú sústavu narastá prúdová nerovnováha záťaže, ktorá je považovaná za hlavný dôvod kolísania napätia v sieti. Prechod nevyvážených prúdov spôsobuje kolísanie napätia na impedanciách systému a to zas ovplyvňuje ostatných spotrebiteľov elektrickej energie. [19] Okrem nerovnováhy, jalového výkonu a harmonických existujú aj ďalšie problémy, ktoré narúšajú kvalitu elektrickej energie, sú to napríklad harmonická rezonancia a nízko-frekvenčné kmitanie. [20] Nasledujúce časti mojej práce opisujú metódy pripojenia, ktoré sú založené na výkonovej elektronike s dôrazom na vylepšenie kvality elektrickej energie distribučnej siete dodávateľa.

### 4.5.3 Statický kompenzátor Var – SVC

Na konci 70. rokov 20. storočia boli na zlepšenie kvality elektrickej energie zavedené prepínače. V tej dobe boli ako prepínače používané tyristory, používali sa na dynamickú kompenzáciu. Niektoré statické kompenzátory sú navrhnuté tak, aby kombinovali niekoľko reaktívnych prvkov, ktoré sa dajú opraviť alebo ovládať tyristorovými vypínačmi. SVC sú známe tým, že kompenzujú spätnú zložku prúdu a jalový výkon. Ich hlavnou nevýhodou je produkcia vyšších harmonických, ktorá vyplýva z nízkej frekvencie prepínania výkonových tyristorových spínačov. Na obrázku 4.6 je znázornené zapojenie statického kompenzátora za pomoci zostupného transformátora, ktorý je pripojený na distribučnú sieť. Sekundár transformátora V/v je pripojený na trolejové trakčné vedenie. [17]



Obrázok 4.6 Zapojenie pomocou SVC [17]

Statická kompenzácia je v súčasnosti považovaná za nízko nákladovú kompenzáciu pretože, dokáže znížiť účinník systému ak je navrhnutý na kompenzáciu spätnej zložky prúdu. Ak systém prenáša jalový výkon, tak SVC nemôže byť použitý ako kompenzátor. Preto výrobcovia prispôbujú SVC tak, aby vyhovoval každému zákazníkovi a jeho konkrétnym potrebám. [17]

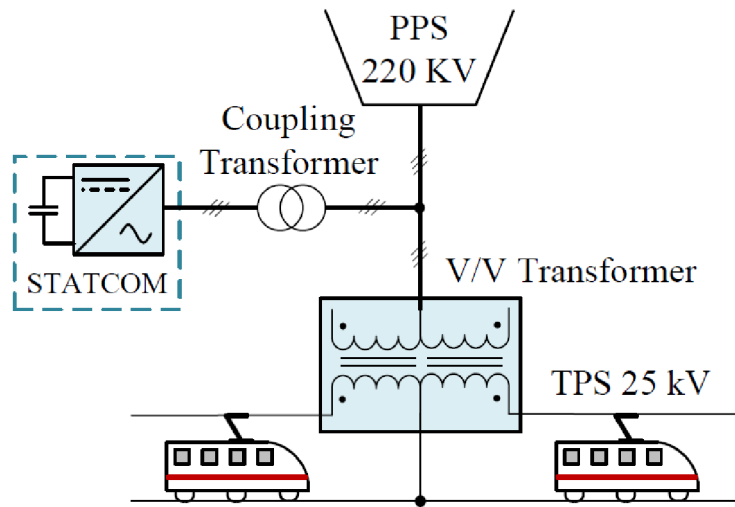
Dokument [22] sa zaoberá riadením výkonu za pomoci napájacích staníc zložených z meničov v trakčnej sústave AC 25 kV a 50 Hz. Rozvoj vysokonapäťových polovodičových meničov pre energetické aplikácie vytvoril predpoklady pre uplatnenie týchto technológií v trakčnej napájacej sústave. Možnosti ako meniče využiť sú zapojenia STATCOM, SFC, PFC, ktoré popisujem v nasledujúcich častiach mojej práce. Vzhľadom na to, že meničové napájacie stanice majú disponujú riadením účinníka na strane distribučnej siete, to prináša možnosť odberu energie s účinníkom blízkym k 1 a zároveň aj potenciál pre dodávanie kapacitného jalového výkonu za účelom kompenzácie distribučnej siete. [22] Jalový výkon sa využíva len na vytvorenie a napájanie magnetického poľa strojov, motorov a transformátorov a vďaka kompenzácií by sa v nich mohlo dosiahnuť zníženie energetických strát a cien za elektrickú energiu práve kvôli tomu, že stroje, ktoré využívajú magnetické pole pre svoju funkčnosť by

generovali menšie straty. Pri účinníku 1 v porovnaní s účinníkom 0,7 je dostupný výkon transformátora na strane VN zvýšený o 43 %. [23]

#### 4.5.4 Statický synchronný kompenzátor – STATCOM

V posledných desaťročiach sa začali tyristorové SVC nahrádzať modernejšími tranzistormi IGBT. Vďaka tomu sa STATCOM považoval za budúcnosť výkonových kompenzátorov.

STATCOM pozostáva z meniča, ktorý je zdrojom napätia s kondenzátorom v medzi obvode, spojovacieho transformátora a indukčnosti, ktorá je inštalovaná na strane AC. Tieto zariadenia je možné používať na strane vysokého napätia pri frekvencii 50-60 Hz. Vďaka tomu sa vyrába vo väčšom množstve v porovnaní s SVC. Nasledujúci obrázok znázorňuje STATCOM pripojený paralelne s distribučnou sieťou. Výhodou paralelného pripojenia je že, sa STATCOM môže odpojiť bez toho aby bola narušená prevádzka trakčnej rozvodne. STATCOM nevyžaduje žiadne interné napájanie, takisto nespotrebovávajú činný výkon a hlavným cieľom je že, s distribučnou sieťou si vymieňa len jalový výkon. Jeho VA charakteristika môže byť výrazne nižšia ako VA rozvodne. V porovnaní s SVC sa STATCOM chová ako obojsmerný kompenzátor jalového výkonu s rýchlejšou odozvou, väčšou zaťažiteľnosťou, má nižší obsah harmonických a kompaktniejšiu konštrukciu. [17] Zapojenie pomocou STATCOM je na obrázku 4.7.



Obrázok 4.7 Zapojenie pomocou STATCOM [17]

STATCOM sa používa ako nástroj na vyváženie nesymetrického zaťaženia. STATCOM je v podstate plne ovládateľný zdroj napätia, ktorý pracuje samostatne na samostatných fázach. Dokáže kompenzovať záporné fázové sekvenčné zložky prúdu, ktorý sa odoberá zo siete a tým splniť požiadavky distribútorov elektrickej energie na vyváženie nesymetrického zaťaženia. Spolu s kompenzáciou dokáže aj redukovať kolísanie napätia a frekvencie. Nakoľko je STATCOM prepojený s distribučnou sieťou

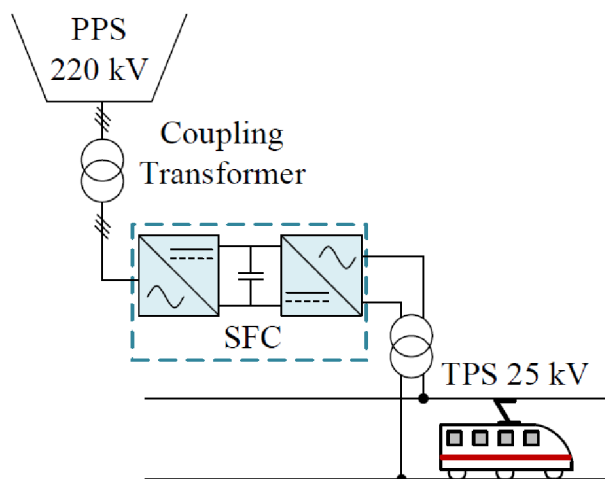
o hodnotách napätia 110 kV – 400 kV, tak to má za následok vysoké požiadavky na spojovací transformátor. [21]

#### 4.5.5 Statický menič frekvencie SFC

SFC sa skladá z trojfázového meniča AC/DC v zapojení back-to-back k jednofázovému meniču DC/AC s jednou linkou DC, ako je znázornené na nasledujúcom obrázku. SFC dokáže zabrániť prieniku harmonických, ktoré produkujú lokomotívy, z trakčnej sústavy do sústavy distribučnej na strane dodávateľa. SFC dokážu pozitívne ovplyvniť problém so spätnou zložkou prúdu, pretože predstavujú jednofázové zaťaženie na trakčnom napájacom systéme ako vyvážené trojfázové zaťaženie na distribučnej sústave. Preto kompenzácia harmonických a spätnej zložky prúdu sa považuje za neodmysliteľnú súčasť statického meniča frekvencie. Ak je trolejové vedenie osadené viacerými SFC, potom musia pracovať vo všetkých štyroch kvadrantoch a mať dostačujúci výkon aby sa zabezpečilo dostačujúce napájanie lokomotív. SVC, STATCOM tiež dopomáhajú zlepšeniu kvalitatívnych parametrov. V porovnaní s predchádzajúcimi výkonovými kompenzátormi medzi ktoré patrí SVC, STATCOM a RPC je cena SFC výrazne vyššia. Je to z dôvodu, že tento systém musí byť dimenzovaný na celkový výkon lokomotív, zatiaľ čo predchádzajúce systémy sa dimenzujú len na časť zaťaženia záťaže. [17]

V niektorých krajinách, napríklad v Nemecku a Rakúsku, sa nastavila frekvencia trakčného napájacieho systému na 16,7 Hz pri ktorej má SFC výhodu frekvenčnej konverzie. Frekvenčná konverzia je proces prenosu bez skreslenia spektra signálu do iného frekvenčného rozsahu. Ďalšou výhodou SFC v elektrifikácii železníc je nepretržitá trolejová linka bez prerušenia. Keďže sa napájací výkonový transformátor v zapojení V/v nepoužíva v spoločnom systéme s SFC je schopnosť preťaženia tohto systému značne obmedzená v porovnaní s kompenzátormi STATCOM a RPC. Okrem toho sú potrebné dva spojovacie transformátory, ako to je vidieť z obrázku 4.8, aby sa zabezpečilo prepojenie SFC medzi rôznymi napájacími hladinami trakčnej napájacej sústavy a distribučnej sústavy. Moderné topológie zapojení odporúčajú použitie SFC na základe viacúrovňového meniča s označením MMC, ktorý môže byť priamo pripojený na vysoké napätie a vďaka tomu sa dosiahne eliminácia spojovacích transformátorov. [17]



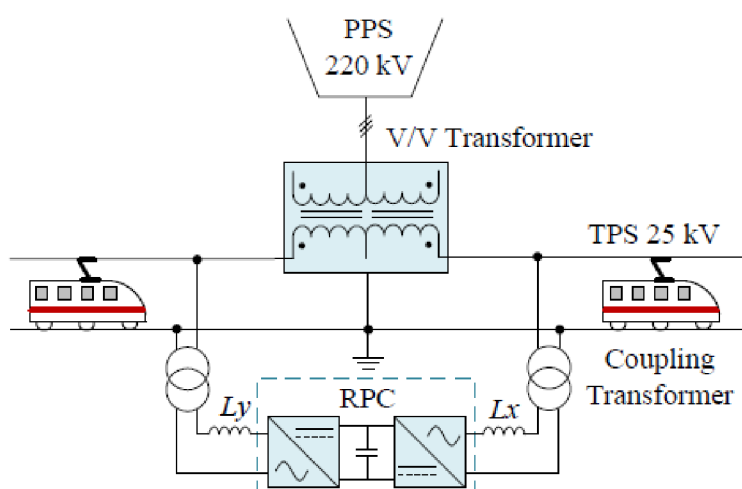


Obrázok 4.8 Zapojenie pomocou SFC [17]

#### 4.5.6 Trakčný kondicionér napájania RPC

Trakčný kondicionér napätia je zariadenie ktoré sa používa na zlepšenie kvality elektrickej energie. RPC je efektívnym riešením pri riešení problémov s spätnou zložkou prúdu a harmonickými v elektrifikovaných tratiach. Jeho konštrukcia sa skladá z dvoch jednofázových meničov v zapojení back-to-back a jednotlivými DC linkami ako to je znázornené na obrázku 4.9. Každý menič je zapojený na trolejové vedenie cez spojovací transformátor. RPC dokáže vyrovnať činný výkon čerpaný z hlavného napájania z dvoch fáz trakčnej sústavy. Toto je presunutím polovice činného výkonu zo zaťaženej časti vedenia to časti, ktorá je zaťažená menej. Presúvanie a bilancovanie činného výkonu medzi dvoma fázami nestačí na dosiahnutie vyvážených prúdov v distribučnej sústave. Preto RPC kompenzuje aj jalový výkon, kde jeden z RPC meničov poskytuje kapacitný jalový výkon a druhý kompenzuje indukčný jalový výkon. Od kedy je výkon odoberaný z distribučnej siete cez transformátor v zapojení V/v alebo v Scottovom zapojení, na rozdiel od SFC tieto zariadenia nemôžu vykonávať frekvenčný prevod. Avšak na strane záťaže môžu byť úseky preťažené to je výhoda výkonového transformátora v zapojení do V/v. [17]





Obrázok 4.9 Zapojenie pomocou RPC [17]

#### 4.5.7 Porovnanie

V nasledujúcej tabuľke sú zobrazené podstatné špecifikácie jednotlivých topológií. Z ktorej sa dá usúdiť, najlepším riešením je topológia s využitím statického meniča frekvencie. Nakoľko disponuje možnosťou filtrácie harmonických a spätnej zložky prúdu. Tak isto sa pri niektorých trakčných systémoch môže za výhodu považovať aj možnosť frekvenčnej konverzie.

Tabuľka 4.1 Základné špecifikácie spôsobov pripojenia na distribučnú sieť [17]

POWER COMPENSATOR	HARMONICS FILTERING	NSC COMPENSATION	FREQUENCY CONVERSION	NEUTRAL SECTIONS (NSS)	OVERLOAD CAPABILITY	POWER RATING (PER UNIT LOAD) [2]	PASSIVE FILTER SIZE ON PPS
SVC	No	Yes	No	Yes	No	$\approx 0.58$	Large
STATCOM	Yes	Yes	No	Yes	Yes	$\approx 0.58$	Small
SFC	Yes	Yes (inherent)	Yes	No	No	$= 1.00$	Small
RPC	Yes	Yes	No	Can be omitted	Yes	$\approx 0.50$	Small

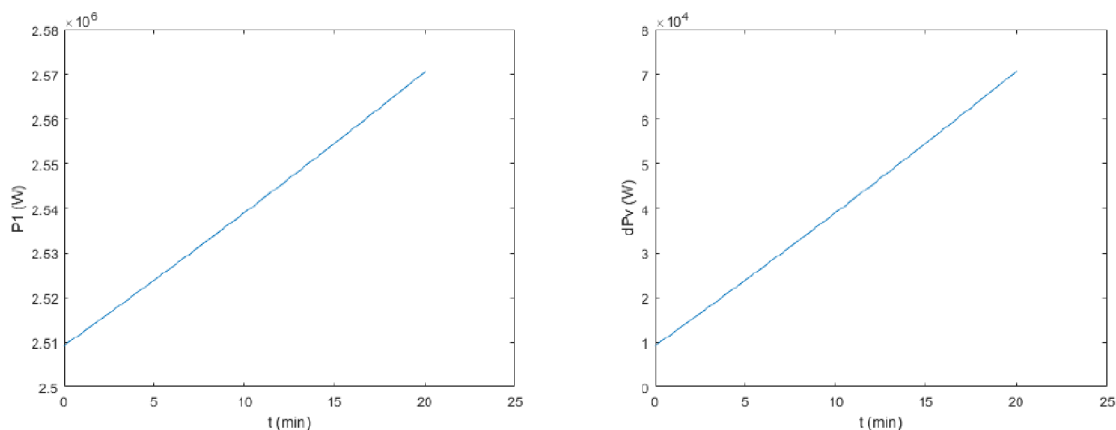
## 4.6 Využitie meničových napájacích staníc pri dvojstrannom napájaní

V kapitole 4.5 boli predstavené možné zapojenia meničov. Medzi významné výhody meničových napájacích staníc je možnosť dvojstranného napájania a riadené obmedzovanie výkonového zaťaženia napájacích staníc. V zdroji [22] je prezentovaná simulačná analýza trakčného dvojstranného napájania a hlavné vlastnosti systému pri napájaní vlakových súprav. Simulačný model je zameraný pre analýzu a optimalizáciu

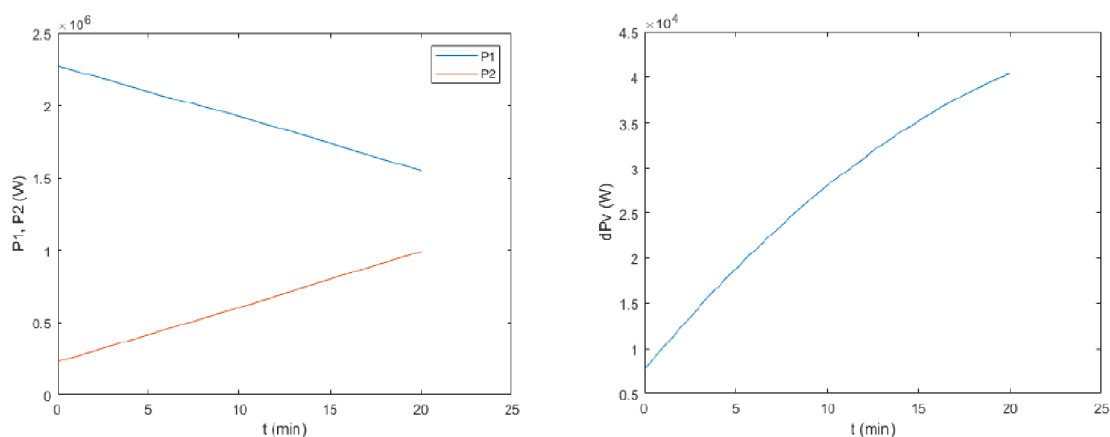
súčinnosti viacerých meničových napájacích staníc na hladine 25 kV 50 Hz pri ich synchrónnom riadení s cieľom riadeného delenia výkonu medzi jednotlivé napájacie stanice v prevádzkových situáciách na trati ako je viac vozidiel s rôznymi výkonmi v rôznych miestach trati vrátane vozidiel, ktoré majú možnosť rekuperácie. [22]

Pri požiadavke riadeného delenia výkonu je podmienkou zaistiť delenie výkonov medzi jednotlivé napájacie stanice zmenou napätových spádov medzi jednotlivými napájacími stanicami. Toto je možné vďaka riaditeľnosti efektívnych hodnôt výstupných napätí meničov. Týmto je možné zabezpečiť dodávku do lokomotívy zo vzdialenejšej napájacej stanice z dôvodu zvýšenia rovnomernosti odberu výkonu jednotlivých staníc z distribučnej siete. [22]

Pri simulácii riešenia dvojstranného napájania trakčného úseku s pohybom vlakových súprav sa uvažuje ich pohyb v rovnakom smere, pri ktorom prebehla simulácia, ktorá porovnáva dvojstranné napájanie meničovými napájacími stanicami a jednostranné napájanie z napájacej stanice, ktorá obsahuje transformátor. Pri simulácii bola uvažovaná dĺžka jednostranne napájaného úseku 40 km a pri dvojstrannom napájaní bola vzdialenosť medzi napájacími stanicami 80 km. Na obrázku 4.10 sú časové závislosti výkonu napájacej stanice a okamžitého výkonu na trolejovom vedení pre prípad jednostranného napájania. Z výpočtov podľa [22] vyšlo, že stratový výkon na trakčnom vedení je 13,16 kWh a energetická účinnosť prenosu trakčným vedením je 0,9845. Na obrázku 4.11 sú časové závislosti pre prípad napájania z dvoch strán meničovými napájacími stanicami. Je jasne vidieť, že výkon napájacích staníc sa s časom dorovnáva, čoho dopadom je vyváženejší odber z distribučnej siete. Pri tejto simulácii sa zvýšila energetická účinnosť prenosu energie na 0,9894 a stratový výkon vo vedení sa znížila na 8,93 kWh. Z toho vyplýva, že energetický prínos dvojstranného napájania za pomoci meničových napájacích staníc je výhodné riešenie aktuálnej situácie, lebo pri ňom straty vo vedení klesli približne o tretinu. Okrem toho sa pri dvojstrannom napájaní znižujú aj úbytky napätia na vedení. Ak by sa jednalo o väčšie zaťaženie, ak by v simulácii uvažovali plne naložené nákladné vlaky, tak by bola výhoda dvojstranného napájania z hľadiska úbytkov napätia oveľa výraznejšia. Simulačný program, ktorý sa len vyvíja, by do budúcnosti mal viesť k simulácii aj situácií kedy sa uvažuje rekuperácia elektrickej energie. Pri rekuperácii je nežiadúce aby sa odovzdávala do distribučnej siete, preto by sa muselo riadenie meničových napájacích staníc zamerať na ošetrovanie tohto stavu a naopak zabezpečiť aby sa rekuperovaná energia spotrebovala priamo v trakčnej sieti. [22]



Obrázok 4.10 Časová závislosť výkonu napájacej stanice pri jazde dvoch vlakov rovnakým smerom pri jednostrannom napájaní [22]



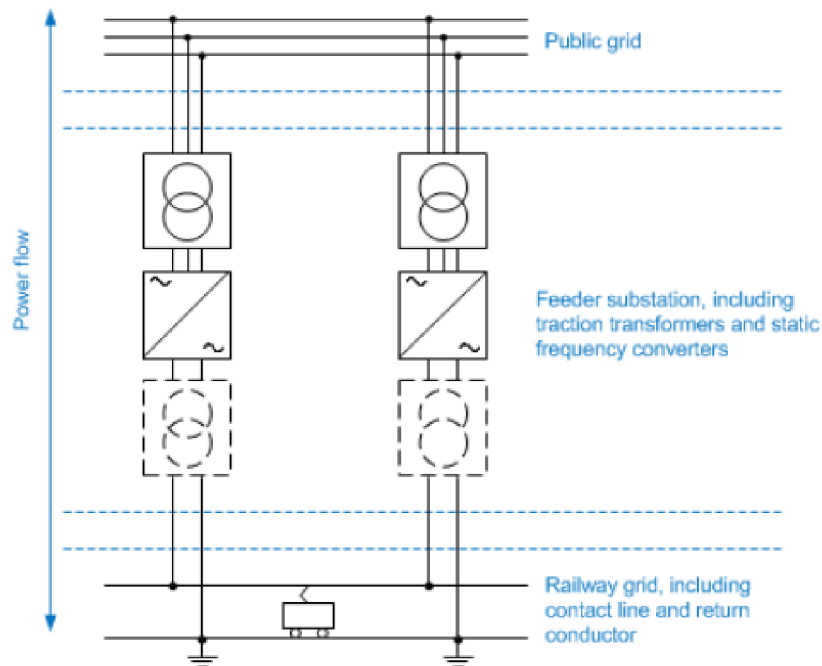
Obrázok 4.11 Časová závislosť výkonu napájacích staníc pri jazde dvoch vlakov rovnakým smerom pri dvojstrannom napájaní meničovými napájacími stanicami [22]

## 4.7 Používaná technológia od firmy ABB

Technológia od firmy ABB je založená na topológii pripojenia pomocou statického meniča frekvencie. Technológia SFC je často používaná pri železničných systémoch s nižšími frekvenciami 16,7 Hz a 25 Hz. Klasické napájanie trakčnej siete pomocou jednofázových transformátorov pripojených k trojfázovej sieti je síce jednoduché, ale má niekoľko nevýhod ako sú napríklad: nevyvážené zaťaženie trojfázovej siete, tvorba harmonických, ktoré prechádzajú do distribučnej siete. Tieto problémy je možné eliminovať pomocou SFC. [21]

Krajiny, ktoré používajú frekvenciu trakčnej siete 16,7 Hz, tak ju napájajú buď vlastnými jednofázovými výrobnými jednotkami alebo stanicami s frekvenčnými meničmi, ktoré používajú trojfázový AC prúd z distribučnej siete na napájanie trakčnej jednofázovej siete s 16,7 Hz. Pri tomto napájaní sa uvažuje frekvenčný menič ako

samostatný zdroj napätia, ktorého jedna strana je pripojená na distribučnú sieť cez transformátor a druhá je pripojená cez transformátor na trakčnú sieť. Jeho hlavnou charakteristikou je, že obe strany sú elektricky oddelené pomocou medzi obvodu. Okrem toho dokáže každá strana meniča samostatne ovládať napätie, jalový výkon a frekvenciu. [21]



Obrázok 4.12 Napájanie trakčnej sústavy za pomoci frekvenčných meničov [21]

#### 4.7.1 Technické výhody

Pri množstve nových riešení trakčných sietí s 50 Hz je uvažovaný práve statický menič frekvencie v napájacích rozvodniach na vzájomné prepojenie trojfázovej distribučnej siete a jednofázovej trakčnej siete s rovnakou frekvenciou. SFC vyžaduje vyššie počiatkové náklady ako pripojenia, ktoré sa používajú v zastaralých systémoch. [21]

SFC je určené na čerpanie symetrickej záťaže z verejnej siete s  $\cos\varphi=1$ . To znamená, že nie je potrebný samostatný systém, ktorý by zabezpečil symetrické zaťaženie fáz na strane distribučnej siete. SFC dokáže riadiť napätia, uhly a frekvencie na distribučnej aj trakčnej strane. Vďaka tomuto sa dá trakčné vedenie synchronizovať a minimalizovať na ňom rozdiely na veľkú vzdialenosť. Disponuje možnosťou prepojenia príľahlých trakčných úsekov, ktoré môžu byť navzájom prepojené a neutrálne úseky môžu byť vylúčené. Koncept zapojenia do mriežky dosiahne prevádzku s vyššou účinnosťou a nižšími požiadavkami na údržbu. SFC takisto dokáže nastaviť trakčné napätie na vyššiu úroveň, nezávisle od distribučnej siete, čím sa zvýši účinnosť jazdiacich vlakov. [21]

Dlhé železničné trate a riadenie činného výkonu za pomoci SFC umožní lepšie využitie rekuperovanej energie. Zníži sa spotreba činného výkonu a zvýši sa účinnosť

systemu ako celku. Okrem toho je možné zabezpečiť riadenie jalového výkonu na strane distribučnej siete pri čom vzniká nový potenciálny zdroj výnosov. [21]

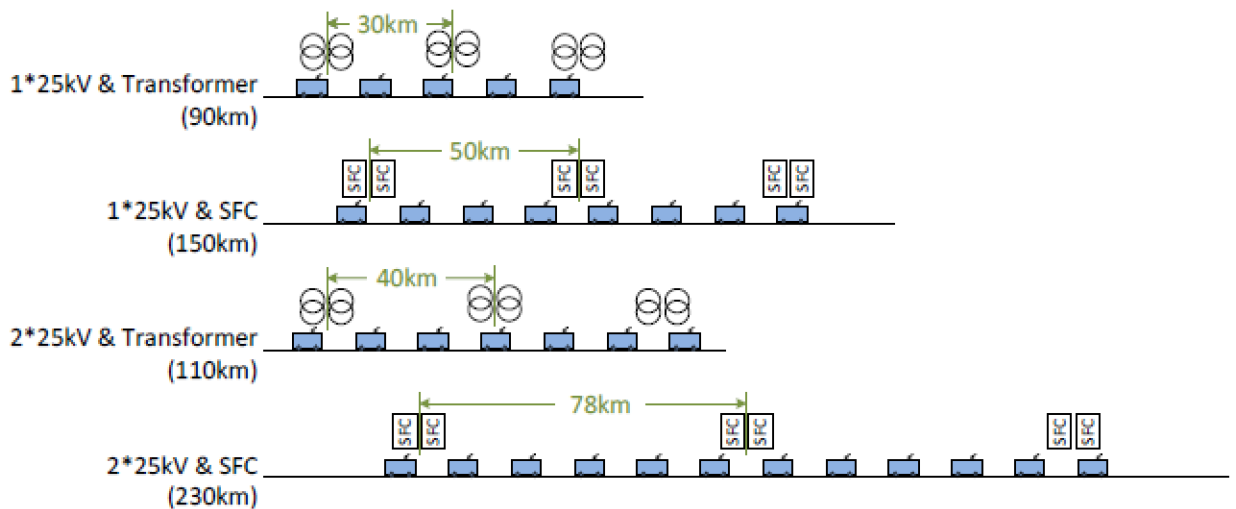
Dvojstranné napájanie neznižuje špičkové zaťaženie spotrebované v jednotlivých úsekoch pripojenia k distribučnej sieti, ale tiež znižuje efektívnu impedanciu trakčnej siete, kde môže dokonca dosiahnuť aj určitý stupeň nadbytočnosti. [21]

Podstatnou výhodou SFC je, že na strane, ktorá je pripojená na distribučnú sieť majú nastavené pevné harmonické spektrum. Vďaka tomu je harmonické skreslenie, ktoré generujú lokomotívy, na strane distribučnej siete vylúčené. [21]

#### 4.7.2 Simulácia

Pri porovnávaní trakčných systémov s transformátormi a s SFC boli použité lokomotívy s výkonom 4,2 MW a maximálnou rýchlosťou 110 km/h a bola povolená možnosť rekuperácie. Simulácia prebiehala na dvojkolajovom úseku so zastávkami každých 10 km. Výškový profil trati nebol braný do úvahy. Nastavenie trate bolo založené na troch napájacích bodoch, pri čom stredná napájacia stanica bola vyradená z prevádzky. [21]

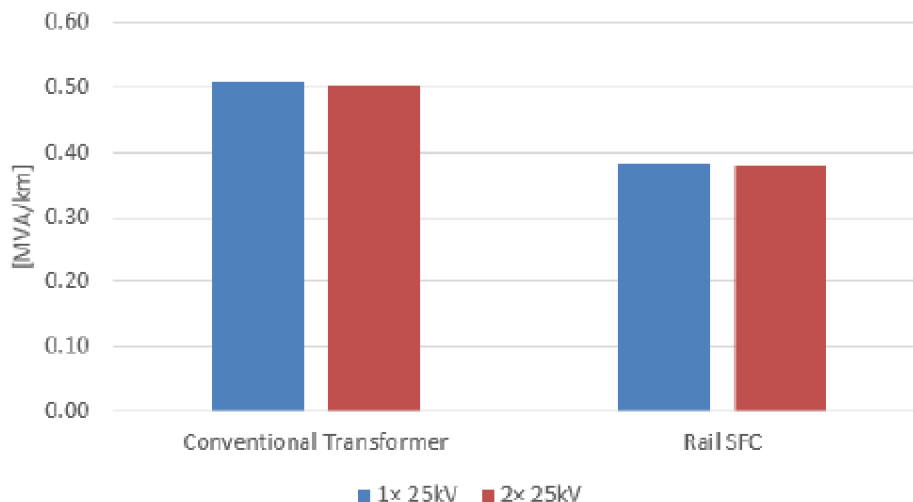
Simulácia dokázala, že vzdialenosť medzi napájacími stanicami sa zvýšila pri použití SFC namiesto transformátorov ako znázorňuje obrázok 4.13.



Obrázok 4.13 Vzdialenosti napájacích staníc pri simulácii [21]

Zlepšenie sa tu dá vysvetliť hlavne tým, že schopnosť riadenia napätia SFC, ktorá zásobuje trakčnú sieť vyšším napätím nezávisle od distribučnej siete predlžuje možný napájaný úsek. Ako ukazuje simulácia, tak nie je potrebné striedanie fáz na dlhých úsekoch. Rekuperovaná energia sa šíri trakčným vedením po celej jeho dĺžke a môže byť spotrebovaná inými vlakmi. Medzi tým môže byť rekuperovaná energia blokovaná meničom, čo znižuje spotrebu činného výkonu a straty napájacieho transformátora. [21]

Vďaka tejto simulácii sa dospelo k záveru, že je možné uvažovať pri dimenzovaní uvažovať nižší dimenzovací faktor na kilometer trate pri použití SFC, ako je uvedené na obrázku 4.14. [21]

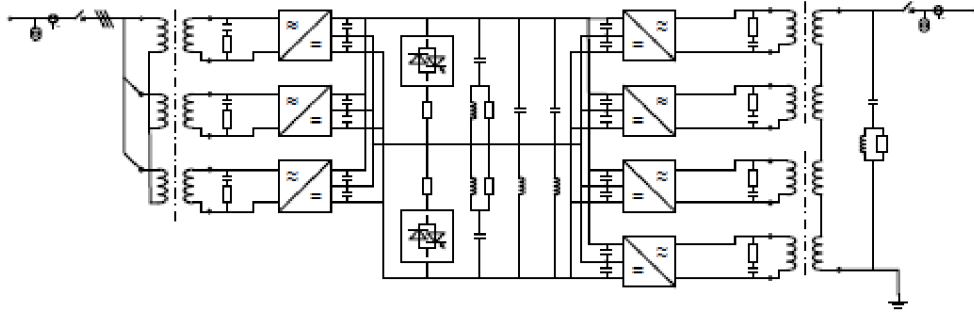


Obrázok 4.14 Porovnanie dimenzovacieho faktoru na kilometer trate [21]

#### 4.7.3 Referenčný projekt WULKURAKA

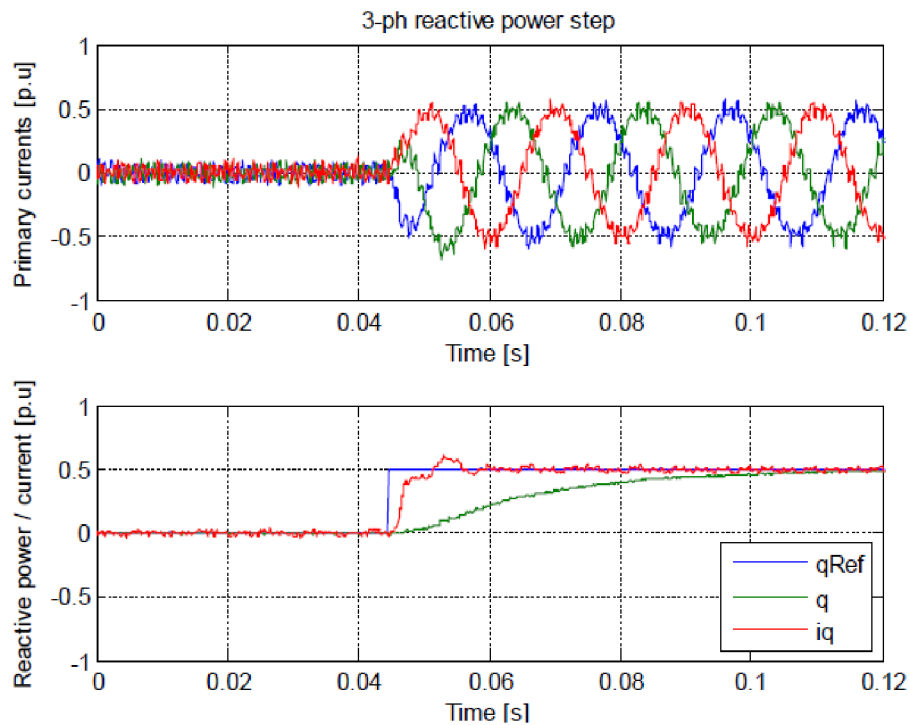
Referenčný projekt WULKURAKA v Austrálii v štáte Queensland. Je založený na technológii od ABB s názvom PCS6000, čo je statický frekvenčný menič s výkonom 20 MVA, ktorý efektívne premieňa trojfázové napájanie distribučnej siete s 50 Hz na požadovaných 25 kV a 50 Hz na trakčnej jednofázovej sieti. Tento systém bol uvedený do prevádzky v roku 2015. [21]

Na obrázku 4.15 je zapojenie PCS6000, ktoré využíva technológiu IGCT. IGCT je osvedčená technológia a vyznačuje sa úsporami pri výrobe a tým pádom je táto technológia po ekonomickej stránke dostupná. [24] Trojfázové napätie sa najprv transformuje na vstupnú úroveň napätia meniča, potom sa napätie privedie na medzi obvod. Dve trojfázové, trojúrovňové napäťové meniče sa používajú ako prevodníky napätia, každý z nich je pripojený na sekundárne vinutie transformátora. Toto zapojenie minimalizuje harmonické skreslenie počas prevádzky. Z jednosmerného medzi obvodu sa napätie opäť prevedie na striedavé jednofázové s frekvenciou 50 Hz a až potom sa transformuje na požadované napätie 25 kV. [21]



Obrázok 4.15 Zapojenie PCS6000 [21]

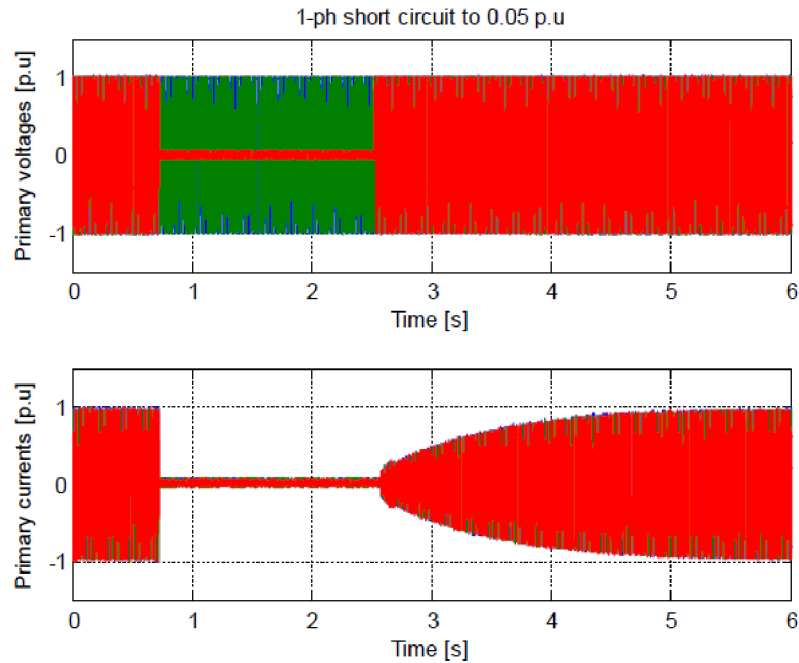
SFC je stavané na rýchlu reakciu na požiadavky z oboch jeho strán. Pre lepšie pochopenie doby odozvy SFC z hľadiska riadenia jalového výkonu bol v simulátore vykonaný test, ktorý je na obrázku 4.16. [21]



Obrázok 4.16 Odozva SFC z pohľadu riadenia [21]

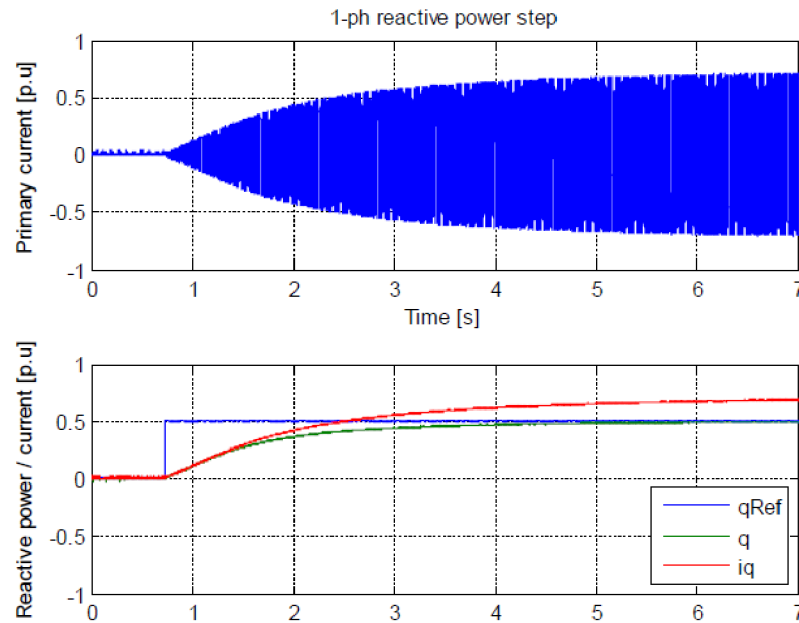
SFC zvláda jednofázové, dvojfázové aj trojfázové rušenie pomocou rýchleho riadenia v uzavretej slučke. Podľa veľkosti poklesu napätia riadenie v uzavretej slučke reaguje rôznymi spôsobmi. Ak napätie poklesne na maximum 0,7 p.u. SFC neblokuje spaľovacie impulzy do trojfázových integrovaných tyristorov s komutovaným prechodom. Ak napätie klesne pod 0,7 p.u., tak sú spaľovacie impulzy okamžite blokováné a pritom na strane trakčnej siete beží SFC v režime fázovej kompenzácie a produkuje jalový výkon. Na obrázku 4.17 je vidieť pokles napätia vo fáze A až 0,05 p.u. Keď sa napätie stabilizuje

sú spaľovacie impulzy povolené, SFC spustí prenos činného výkonu podľa požadovanej hodnoty tak ako pred poruchou. [21]



Obrázok 4.17 Reakcia SFC pri poklese napätia na 0,05 p.u. [21]

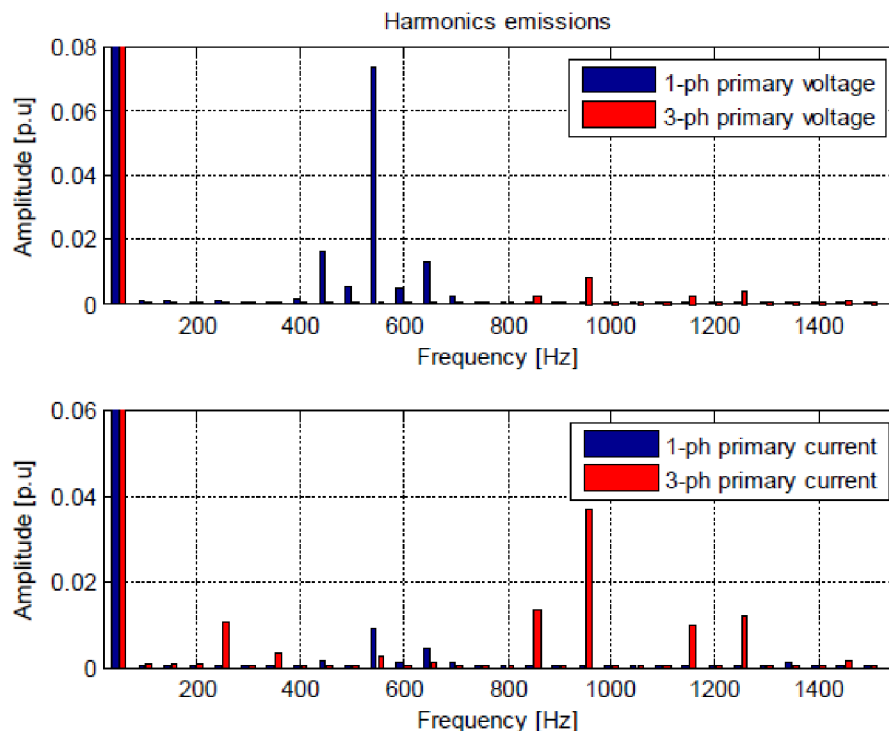
Na strane trakčnej jednofázovej sústavy teda na bol získaný výsledok, ktorý je na obrázku 4.18 z ktorého je vidieť, že zložka jalového prúdu sa nedrží referenčných hodnôt. Tento jav je zapríčinený tým, že trakčná strana nemá kontrolu uzatvorenou slučkou a odozva riadenia jalového výkonu je v porovnaní s trojfázovou sústavou podstatne vyššia. [21]



Obrázok 4.18 Jednofázový jalový výkon [21]



Odolnosť voči vplyvom nežiaducich vyšších harmonických, ktoré produkujú vozidlá napojené na trakčnú sieť, je na obrázku 4.19 z ktorého je jasne vidieť, že žiadne vyššie harmonické z trakčnej jednofázovej sústavy nepreniknú cez SFC do distribučnej trojfázovej sústavy pri frekvencii 50 Hz. [21]



Obrázok 4.19 Množstvo harmonických pri rôznych frekvenciách na strane trojfázovej distribučnej siete a jednofázovej trakčnej siete [21]

Použitie meničov podporí distribučnú sieť tým, že odfiltruje nežiaduce harmonické, ktoré sa produkujú na strane trakčnej siete. Inštalácia SFC zabezpečí možnosť rozvoja koľajovej dopravy nakoľko umožní prenášať väčšie výkony ako aktuálne riešenie, ktoré je používané.

V ČR sa začala prestavba úseku trate medzi mestami Řikovice a Nedakonice o celkovej dĺžke približne 43 km. V trakčnej napájacej stanici v Otrokoviciach budú inštalované dva frekvenčné meniče a v Řikoviciach sa TNS vybaví striedavou časťou kde bude nainštalovaný aj jeden frekvenčný menič. [26] Čo bude mať pozitívny dopad na distribučnú sieť lebo zariadenia, ktoré sú momentálne inštalované na tejto trati nedokážu odfiltrovať nežiaduce harmonické tak ako SFC.

## ZÁVER

Jednosmerná napájacia sústava 3 kV, ktorou je elektrifikovaná severná časť Českej republiky, už nemá predpoklady na zvládnutie dopytu po preprave, ktorá medziročne rastie. Takisto rastie dopyt aj po možnosti prepravy väčších množstiev tovaru naraz tomu sa prispôsobujú výkony moderných lokomotív, ktoré sú niekoľkonásobne vyššie ako tie, pre ktoré bola jednosmerná napájacia sústava dimenzovaná v dobe, kedy ju navrhovali. S rastúcimi výkonmi lokomotív je úmerný aj nárast odberu výkonov z trakčnej siete a s ním spojené straty. Jednosmerná napájacia sústava má násobne vyššie straty na rovnakom úseku ako striedavá napájacia sústava, čo vplýva negatívne na nevyváženosť odberu elektrickej energie z distribučnej siete. Preto sa uvažuje o prechode na jednotnú napájaciu sústavu AC 25 kV 50 Hz. Od striedavej napájacej sústavy sú očakávané menšie straty na trakčnom vedení a možnosť rekuperácie elektrickej energie a jej následné využitie v trakcii tieto faktory sú nepochybne veľkým ekonomickým benefitom vzhľadom na narastajúce množstvo železničnej prepravy.

Trakčné siete je možné napájať viacerými spôsobmi. Jednostranné napájanie, kde má každý úsek svoj napájač, má výhodu v tom, že pri poruche je možné rýchlo identifikovať daný úsek na trati. Ale pri poruche vypadne časť trakčného vedenia z prevádzky. Štvorstranné napájanie dvojkolajovej trate má výhodu priečného spojenia trolejového vedenia v oboch prevádzkových smeroch a pozdĺžne rozdelenie úsekov k presnejšej lokalizácii porúch vzniknutých na vedení vďaka tomu sa pri poruche vypne len polovičná dĺžka poruchového úseku. Dvojstranné napájanie využíva napájanie trakčnej siete z oboch jej koncov. Týmto spôsobom je možné predĺžiť vzdialenosti napájacích staníc s ohľadom na úbytky napätia na trakčnom vedení. Toto napájania sa používa pri napájaní dvojkolajových tratí, kde pri poruche môže byť jedna koľaj stále v prevádzke nakoľko koľaje na sebe nie sú energeticky závislé. V súčasnosti sa považuje tento spôsob napájania za budúcnosť v trakčnom systéme, preto je v bakalárskej práci popísaná simulácia, ktorá prezentuje možnosti využitia meničov pri dvojstrannom napájaní. Meniče sú vhodné na budúce využitie nakoľko dokážu rozdeliť výkon medzi napájacie vďaka riaditeľnosti efektívnych hodnôt výstupných napätí a tým zabezpečiť vyvážený odber elektrickej energie z distribučnej siete. Z výsledkov uvedených v práci jasne plynie, že stratový výkon pri použití dvojstranného napájania voči jednostrannému napájaniu klesol a účinnosť prenosu trakčným vedením narástla. Toto sú podstatné ukazovatele pre vyhodnotenie ekonomického prínosu zmeny infraštruktúry železníc Českej republiky. Statický menič frekvencie, ktorý používa firma ABB vo svojej technológii sa ukazuje ako najlepšie možné riešenie, ktorého nevýhodou sú vyššie počiatkové náklady vzhľadom na súčasnú používanú technológiu. SFC je dimenzované na čerpanie symetrickej záťaže z trojfázovej distribučnej siete s účinníkom rovným 1. Vďaka tomu nie je potrebný dodatočný systém na zabezpečenie symetrickeho zaťaženia na strane distribučnej siete. SFC takisto predstavuje potenciál na dodávanie kapacitného

jalového výkonu za účelom kompenzácie distribučnej siete. Pri použití nových technológií a povolení rekuperácie dokážu moderné meničové napájacie stanice zabezpečiť aby sa rekuperovaná energia neprenášala do distribučnej siete, ale aby sa spotrebovala priamo v trakčnej sieti na úseku, kde to je potrebné.

## LITERATÚRA

- [1]. Ucelený přehled strategií a analýz TP do roku 2020. *Národní technologická platforma* [online]. Srpen 2017 [cit. 2020-10-29]. Dostupné z: <https://www.sizi.cz/file.php?nid=14068&oid=5829223>
- [2]. Co je vysokorychlostní železnice. *Správa železnic* [online]. [cit. 2020-10-29]. Dostupné z: <https://www.spravazeznic.cz/vrt/co-je-vrt>
- [3]. Vysokorychlostní železnice v České republice. In: *Správa železnic* [online]. [cit. 2020-10-29]. Dostupné z: <https://www.spravazeznic.cz/documents/50004227/80173101/Vysokorychlostn%C3%AD+%C5%BEeelnice+v+%C4%8Cesk%C3%A9+republie/f9615dbc-cb56-436e-aa88-a9f4e37e849c>
- [4]. Koncepce přechodu na jednotnou napájecí soustavu na české železniční síti. *Ministerstvo dopravy ČR* [online]. 20. 1. 2017 [cit. 2020-10-29]. Dostupné z: <https://www.mdcz.cz/Dokumenty/Drazni-doprava/Zeleznicni-infrastruktura/Koncepce-prechodu-na-jednotnou-napajeci-soustavu-n>
- [5]. PEROUTKA, Jaroslav, Petr PEROUTKA a Ing. Petr Lapáček. *Studie „Koncepce přechodu na jednotnou napájecí soustavu ve vazbě na priority programového období 2014-2020 a naplnění požadavků TSI ENE“* [online]. [cit. 2020-10-29]. Dostupné z: <https://www.vlaky.net/upload/images/reports/006516/Podklad.pdf>
- [6]. DOLEČEK, Radovan a Ondřej ČERNÝ. *Trakční napájecí soustavy* [online]. Pardubice, 2015 [cit. 2020-10-29]. ISBN ISBN 978-80-7395-880..0 (pdf)
- [7]. *Systémy trakčních proudových soustav* [online]. In: . [cit. 2020-10-29]. Dostupné z: [https://www.mdcz.cz/getattachment/Dokumenty/Drazni-doprava/Zeleznicni-infrastruktura/Koncepce-prechodu-na-jednotnou-napajeci-soustavu-n/mapa\\_system.pdf.aspx](https://www.mdcz.cz/getattachment/Dokumenty/Drazni-doprava/Zeleznicni-infrastruktura/Koncepce-prechodu-na-jednotnou-napajeci-soustavu-n/mapa_system.pdf.aspx)
- [8]. *Historie našich železnic v kostce* [online]. , 2 [cit. 2020-11-11]. Dostupné z: <https://www.spravazeznic.cz/documents/50004227/50156852/historie-zeleznic-v-cr.pdf>
- [9]. LANÁKOVÁ, G. a ŠINDLER D., *Nápajanie elektrických dráh*. 1. vyd. Bratislava: Alfa, 1989, 205 s
- [10]. LANÁKOVÁ, G. a V. OSLOVIČ. *Pevné elektrické trakčné zariadenia*. Žilina: EDIS, 2006.
- [11]. JANSÁ, F. a Š. PELEŇSKÝ. *Napájení elektrických drah III*. 1. Bratislava: Alfa, 1976.
- [12]. HORÁK, Karel, Jiří DRÁBEK, Josef PALEČEK a Michal POKORNÝ. *Energetika a trakce*. Alfa Bratislava, 1983.
- [13]. TALAFOUS, Luboš. Trakční měřírny. In: *EDUCON* [online]. 2015 [cit. 2020-11-22]. Dostupné z: <https://www.educon.zcu.cz/rservice.php?akce=tisk&cislomodulu=2015050204>
- [14]. *Nápajanie elektrifikovaných železničných tratí a elektrické trakčné zariadenia v skratke. Železničné info* [online]. 2008 [cit. 2020-11-22]. Dostupné z: <https://www.zeleznicne.info/pda/pdaview.php?link=2008110013&PDAkatNazev=Trate>

- [15]. HARÁK, Martin. Napájecí soustavy na železnici se sjednotí. In: *Železničář* [online]. s. 1 [cit. 2020-11-22]. Dostupné z: <https://zeleznicar.cd.cz/zeleznicar/hlavni-zpravy/napajeci-soustavy-na-zeleznici-se-sjednoti/-13976/17,0,/>
- [16]. *Odpínače typu OJC-Ž* [online]. , 2 [cit. 2021-01-12]. Dostupné z: [https://www.sez-krompachy.sk/files/2020-01-31-101151-Katal\\_gov\\_list\\_OJC-Z.pdf](https://www.sez-krompachy.sk/files/2020-01-31-101151-Katal_gov_list_OJC-Z.pdf)
- [17]. TANTA, Mohamed, Victor MONTEIRO, Tiago J. C. SOUSA, Antonio P. MARTINS, Adriano S. CARVALHO a Joao L. AFONSO. Power quality phenomena in electrified railways: Conventional and new trends in power quality improvement toward public power systems. *2018 International Young Engineers Forum (YEF-ECE)* [online]. IEEE, 2018, 2018, , 25-30 [cit. 2021-04-19]. ISBN 978-1-5386-1504-1. Dostupné z: doi:10.1109/YEF-ECE.2018.8368934
- [18]. *Literature review of converters suitable for MVDC railway electrification* [online]. University of Birmingham, 2019 [cit. 2021-04-19]. Literature review. University of Birmingham.
- [19]. FUKALA, Bogdan a Josef PALEČEK. *Comparison of Schemes of Traction Transformer Stations in Terms of Their Impact on the Asymmetry in the Power Supply System* [online]. VŠB-TU OF OSTRAVA, DEPT. OF ELECTRICAL ENGINEERING. Ostrava, Czech Republic, , 1 [cit. 2021-04-19].
- [20]. ZARE, Majid, Ali Yazdian VARJANI, Seyed Mohammad DEGHAN a Saeed KAVEHE. *Power Quality Compensation and Power Flow Control in AC Railway Traction Power Systems* [online]. Shiraz University, Iran, 2019, 12.2.2019, , 1 [cit. 2021-04-19].
- [21]. ZHAO, Chuanhong, Cosmin BANCEANU, Thomas SCHAAD, Philippe MAIBACH a Steve AUBERT. *STATIC FREQUENCY CONVERTERS – A FLEXIBLE AND COST EFFICIENT METHOD TO SUPPLY SINGLE PHASE RAILWAY GRIDS IN AUSTRALIA*. ABB Switzerland Ltd, 2015.
- [22]. NOVÁK, Jaroslav, Dušan ČERMÁK a Ladislav MLYNAŘÍK. *ANALÝZA ŘÍZENÍ VÝKONŮ MĚNIČOVÝCH NAPÁJECÍCH STANIC V TRAKČNÍ SOUSTAVĚ 25 KV 50 HZ*. Pardubice. Analýza. Univerzita Pardubice, Dopravní fakulta Jana Pernera, Katedra elektrotechniky, elektroniky a zabezpečovací techniky v dopravě.
- [23]. Manažment jalovej energie. *Schneider electric* [online]. 2013 [cit. 2021-5-17]. Dostupné z: [https://download.schneider-electric.com/files?p\\_File\\_Name=SKCOM273.pdf](https://download.schneider-electric.com/files?p_File_Name=SKCOM273.pdf)
- [24]. *PCS 6000 Rail Frequency converter at Timelkam, Austria* [online]. ABB. Dostupné také z: <https://search.abb.com/library/Download.aspx?DocumentID=3BHS355311E01&LanguageCode=en&DocumentPartId=&Action=Launch>
- [25]. Interné materiály SŽDC

- [26]. *Změna trakční soustavy na AC 25kV, 50Hz v úseku Nedakonice - Říkovice* [online]. In: . SUDOP BRNO, spol. s r.o., 22. 10. 2019, s. 2 [cit. 2021-5-25]. Dostupné z: <https://www.stavby.szdc.cz/letaky/S621500843.pdf>

## ZOZNAM SYMBOLOV A SKRATIEK

### Skratky:

AC	Striedavá sústava
ČR	Česká republika
ČSN	Česká sústava noriem
DC	Jednosmerná sústava
FEKT	Fakulta elektrotechniky a komunikačných technológií
MD	Ministerstvo dopravy
RPC	Trakčný kondicionér napájania
SFC	Statický menič frekvencie
STATCOM	Statický synchronný kompenzátor
SVC	Statický kompenzátor
SŽDC	Správa železníc
TNS	Trakčná napájacia stanica
TV	Trakčné vedenie
VN	Vysoké napätie
VRT	Vysoko rýchlostná trať
VUT	Vysoké učení technické v Brně
VVN	Veľmi vysoké napätie

### Symbole:

$I$	prúd	(A)
$U$	napätie	(V)