



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

NÁVRH TRANSFORMAČNÍ STANICE PRO VYVEDENÍ VÝKONU Z FVE A DIESEL-GENERÁTORU

DESIGN OF A TRANSFORMER STATION FOR POWER OUTPUT FROM A PV POWER PLANT AND A DIESEL GENERATOR

DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. Jiří Marák

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

doc. Ing. Jaroslava Orságová,
Ph.D.

BRNO 2024

Diplomová práce

magisterský navazující studijní program **Elektroenergetika a komunikační technologie**

Ústav elektroenergetiky

Student: Bc. Jiří Marák

ID: 195680

Ročník: 2

Akademický rok: 2023/24

NÁZEV TÉMATU:

Návrh transformační stanice pro vyvedení výkonu z FVE a diesel-generátoru

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

- 1) Koncepce, místo připojení v distribuční síti a návrh transformátoru pro vyvedení výkonu FVE 5 MW a podpůrný zdroj diesel-generátor 1000 kW.
- 2) Výpočet zkratových poměrů.
- 3) Návrh rozváděče 22kV, stanoviště transformátoru a hlavní rozvodny NN.
- 4) Návrh rozpadového bodu a ochran sítě (napětí, frekvence) v souladu s PPDS a s podmínkami PDS EG.D.
- 5) Dispečerské řízení činného a jalového výkonu dle podmínek PDS EG.D.

DOPORUČENÁ LITERATURA:

doporučená literatura podle pokynů vedoucího závěrečné práce

Termín zadání: 5.2.2024

Termín odevzdání: 20.5.2024

Vedoucí práce: doc. Ing. Jaroslava Orságová, Ph.D.

doc. Ing. Jaroslava Orságová, 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

Tato diplomová práce se zabývá návrhem transformační stanice pro vyvedení výkonu z fotovoltaické elektrárny a diesel-generátoru ve funkci podpůrné služby sítě. Hlavním cílem práce je navrhnout komplexní řešení, které zahrnuje koncepci, místo připojení v distribuční síti a návrh transformátorů pro vyvedení výkonu FVE o výkonu 5 MW a podpůrného zdroje diesel-generátoru o výkonu 1000 kW, včetně výpočtu zkratových poměrů. V práci jsou dále navrženy rozpadové body a ochrany sítě. V závěrečné části práce je navrženo dispečerské řízení a obchodní měření v souladu s podmínkami provozovatele distribuční sítě.

KLÍČOVÁ SLOVA

návrh trafostanice, fotovoltaická elektrárna, diesel-generátor, transformátor, rozvodna, transformační stanice, rozvaděč, zkrat, ochrany, nadproud, zkratová odolnost, přepětí, podpětí, nadfrekvence, podfrekvence, dispečerské řízení

ABSTRACT

This thesis is about design of a transformation station for power output from both a photovoltaic power plant and a diesel generator, serving as grid support. The primary objective is to devise a comprehensive solution including conceptualization, grid connection point, and transformer specifications capable of handling the 5 MW power output from the PV plant and the 1000 kW output from the diesel generator, including the calculation of short-circuit conditions. Furthermore, the thesis delves into the design of network breakpoints and protective measures. Lastly, it proposes dispatch control and billing metering in accordance with the operational requirements stipulated by the distribution system operator.

KEYWORDS

design of a transformer substation, photovoltaic power plant, diesel generator, transformer, switchgear, transformation station, distribution panel, short circuit, protections, overcurrent, short-circuit withstand capability, overvoltage, undervoltage, overfrequency, underfrequency, dispatch control

MARÁK, Jiří. *Návrh transformační stanice pro vyvedení výkonu z FVE a diesel-generátoru*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Ústav elektroenergetiky, 2024, 59 s. Diplomová práce. Vedoucí práce: doc. Ing. Jaroslava Orságová, Ph.D.

Prohlášení autora o původnosti díla

Jméno a příjmení autora:	Bc. Jiří Marák
VUT ID autora:	195680
Typ práce:	Diplomová práce
Akademický rok:	2023/24
Téma závěrečné práce:	Návrh transformační stanice pro vyvedení výkonu z FVE a diesel-generátoru

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/nebo majetkových a jsem si plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon), ve znění pozdějších předpisů, včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č. 40/2009 Sb.

Brno

.....

podpis autora*

*Autor podepisuje pouze v tištěné verzi.

PODĚKOVÁNÍ

Rád bych poděkoval vedoucí diplomové práce paní doc. Ing. Jaroslavě Orságové, Ph.D. za odborné vedení, konzultace, trpělivost a podnětné návrhy k práci.

Dále bych chtěl poděkovat zaměstnancům firmy Puttner, s.r.o. za cenné odborné rady a zprostředkování zkušeností z praxe.

Obsah

Úvod	11
1 Cíle práce	13
2 Koncepce	14
2.1 Připojovaná výrobná	14
2.1.1 Fotovoltaická elektrárna	14
2.1.2 Dieselgenerátor	15
2.2 Místo připojení v DS	15
2.3 Koncepce trafostanice	15
2.3.1 Rozvodna VN	16
2.3.2 Stanoviště transformátorů	16
2.3.3 Rozvodna NN	16
2.3.4 Transformátory	16
3 Návrh transformátorů	18
3.1 Stanovení počtu a výkonu transformátorů	18
3.2 Zvolené transformátory	19
4 Výpočet zkratových poměrů	20
4.1 Zkratové impedance	21
4.2 Zkratové poměry na straně VN	24
4.3 Zkratové poměry na straně NN	26
4.3.1 Rozvaděče pro FVE	27
4.3.2 Rozvaděče pro diesel-generátor	28
5 Návrh trafostanice	30
5.1 Provedení objektu trafostanice	30
5.2 Ochranné pospojování	31
5.3 Uzemnění transformovny	31
5.4 Zálohované napájení 24VDC	31
5.5 Návrh rozvaděče VN 22 kV	32
5.5.1 Rozvaděč v TS1	32
5.5.2 Rozvaděč v TS2	33
5.6 Rozvaděče NN	34
5.6.1 Rozvaděče pro FVE	34
5.6.2 Rozvaděč pro diesel-generátor	35
5.6.3 Hradící členy	35

5.6.4	Rozvaděče vlastní spotřeby	35
5.7	Kabely	36
5.7.1	Kabely VN	36
5.7.2	Kabely NN	36
5.7.3	Uložení kabelů v zemi	37
6	Chránění	38
6.1	Rozpadový bod	38
6.2	Ochrana v rozpadových místech	39
6.3	Nadproudivá ochrana v přívodním poli VN	39
7	Měření a řízení v trafostanicích	40
7.1	Dispečerské řízení	40
7.1.1	Dálkové ovládání	40
7.1.2	Dispečerské měření	41
7.1.3	Signalizace	42
7.1.4	Skříň dispečerského řízení AXY01	43
7.1.5	Řízení střídačů	43
7.2	Obchodní měření	44
	Závěr	45
	Literatura	47
	Seznam symbolů a zkratk	49
	Seznam příloh	59

Seznam obrázků

4.1	Náhradní schéma zkratových impedancí	21
4.2	Náhradní schéma zkratových impedancí s vyznačením zkratu na straně VN	24
4.3	Náhradní schéma pro výpočet zkratu v rozvaděčích NN pro FVE . . .	26
4.4	Náhradní schéma pro výpočet zkratu v rozvaděčích NN pro dieselgenerátor	27
4.5	Zjednodušené schéma pro výpočet zkratu v rozvaděčích NN pro FVE	27
4.6	Zjednodušené schéma pro výpočet zkratu v rozvaděči NN pro dieselgenerátor	28
5.1	Jednopolové schéma sestavy rozvaděče VN v TS1	33
5.2	Jednopolové schéma sestavy rozvaděče VN v TS2	34

Seznam tabulek

2.1	Vybrané parametry střídače SOFAR 125KTL-HV	14
2.2	Vybrané parametry diesel-generátoru XC1100K	15
3.1	Vybrané parametry zvolených transformátorů, převzato z [5]	19
4.1	Vypočtené zkratové proudy a přiřazené zkratové odolnosti	29
6.1	Nastavení nadproudové ochrany	39
1	Maximální ztráty pod zatížením a při chodu naprázdno (W) v případě třífázových středních výkonových transformátorů ponořených do ka- paliny s jedním vinutím o $U_m \leq 24$ kV a druhým vinutím o $U_m \leq 3,6$ kV [6]	50
2	Maximální ztráty pod zatížením a při chodu naprázdno (W) v pří- padě třífázových středních výkonových transformátorů suchého typu s jedním vinutím o $U_m \leq 24$ kV a druhým vinutím o $U_m \leq 3,6$ kV[6] .	51

Úvod

S rostoucím tlakem na přechod k udržitelným a obnovitelným zdrojům energie jsou otevírány nové možnosti pro rozvoj energetických systémů, které jsou schopny integrovat různorodé zdroje elektřiny. Tato diplomová práce se zabývá návrhem transformační stanice, která bude kombinovat výrobu elektřiny z fotovoltaické elektrárny (FVE) o výkonu 5 MW a diesel-generátoru s výkonem 1000 kW, který bude ve funkci podpůrné služby. Hlavními cíly této práce bude vytvoření komplexní koncepce transformační stanice, připojení k distribuční síti, návrh transformátorů, výpočet zkratových poměrů, návrh rozvaděče 22 kV a stanoviště transformátorů, a také návrh hlavní rozvodny nízkého napětí, včetně kabelových propojů. Dále bude proveden návrh rozpadového místa výroby se síťovými ochranami a návrh nadproudové ochrany. Nakonec bude proveden návrh dispečerského řízení dle příslušného provozovatele distribuční soustavy.

V první části této práce bude probrána koncepce celková transformační stanice z hlediska nároků a požadavků. Dále budou zvoleny a specifikovány oba zdroje elektřiny, tedy střídače pro fotovoltaickou část a diesel-generátor. V druhé kapitole bude popsán výběr transformátorů. Dále zde bude postup stanovení počtu a výkonu transformátorů.

Ve třetí kapitole této práce bude proveden výpočet zkratových poměrů, což je klíčový faktor pro další postup. Provedení analýzy zkratových podmínek umožní dimenzovat přístroje a také navrhnout vhodné ochranné prvky a zabezpečit optimální chod celého systému.

Další kapitola už se zaměří na samotný návrh trafostanice. Popsáno bude provedení objektu trafostanice, včetně vnitřního vybavení zajišťující její bezpečný a bezporuchový provoz. Dále návrh rozvaděče VN 22 kV, stanoviště pro transformátory a hlavní rozvodny nízkého napětí a pomocných obvodů, včetně technické specifikace zařízení.

Ochrany sítě jsou nezbytné pro zajištění bezpečného a spolehlivého provozu elektrické sítě. Proto se bude další kapitola zabývat chráněním navrhované trafostanice. Budou zde navrženy a popsány rozpadové body. V těchto rozpadových bodech budou působit síťové ochrany dle PPDS hlídající přepětí, podpětí, podfrekvenci a nadfrekvenci. Kromě síťových ochrany je nutné navrhnout také nadproudovou ochranu, aby byly ošetřeny možnosti vzniku různých událostí. Tím bude dosaženo zachování stability a spolehlivosti elektrické soustavy a také spolehlivého a bezpečného provozu navrhované trafostanice i vzhledem k požadavkům a standardům provozovatele distribuční sítě.

Dispečerské řízení je klíčové, jak pro provoz transformační stanice, tak už pro samotné připojení výroby ze strany distributora. Dispečerské řízení zajišťuje op-

timální využití dostupného výkonu z fotovoltaické elektrárny a diesel-generátoru v souladu s požadavky a potřebami sítě. To zahrnuje monitorování a regulaci činného a jalového výkonu, přičemž je důležité dodržet stanovené limity a požadavky provozovatele sítě. Prostřednictvím dispečerského řízení je také možné provádět dálkové ovládání vybraných spínacích prvků a v neposlední řadě též signalizaci o stavu spínacích prvků, provedení povelů, působení ochran a podobně. Nakonec bude v práci proveden návrh obchodního měření, opět v souladu s podmínkami provozovatele distribuční sítě. Obchodní měření slouží ke sledování a zaznamenání veškerých toků elektrické energie, tedy energie danou výrobnou odebírané a dodávané, což umožňuje správnou fakturaci a zúčtování na trhu s elektřinou.

Výsledkem práce bude kompletní návrh transformační stanice pro efektivní a spolehlivé vyvážení výkonu z fotovoltaické elektrárny a podpůrného diesel-generátoru, včetně návrhu ochran a dispečerského měření. Cílem této diplomové práce je také, kromě samotného návrhu, poskytnout aplikovatelný přístup k návrhu transformační stanice.

1 Cíle práce

Cílem práce je navrhnout transformační stanici, která umožní efektivní vyvedení výkonu z fotovoltaické elektrárny o výkonu 5 MW a diesel-generátoru o výkonu 100 kW pracujícího jako podpůrná služba sítě. Vypracovat koncepci transformační stanice, včetně místa připojení k distribuční síti a vhodného počtu a výkonu transformátorů. Vypočítat zkratové poměry na straně VN i NN pro následující dimenzování elektrických zařízení.

Navrhnout rozvaděč VN 22 kV, stanoviště transformátorů a hlavní rozvodnu NN.

Následně navrhnou rozpadový bod včetně ochran sítě (napětí, frekvence) v souladu s PPDS a podmínkami PDS EG.D pro zajištění stability sítě za všech provozních podmínek.

Navrhnout dispečerské řízení a měření dle podmínek PDS EG.D pro řízení činného a jalového výkonu.

2 Koncepce

2.1 Připojovaná výrobná

Navrhovaná trafostanice bude sloužit pro vyvedení elektrického výkonu vyrobeného ve fotovoltaické elektrárně (FVE) na napěťové úrovni 400 V do sítě distributora na napěťové úrovni 22 kV. Kromě FVE bude do trafostanice připojen také diesel-generátor ve funkci podpůrné služby, který má výkon na napěťové úrovni nízkého napětí, a který je nutné také transformovat na hladinu 22 kV.

2.1.1 Fotovoltaická elektrárna

Fotovoltaická elektrárna se skládá z fotovoltaických panelů v sérioparalelním zapojení o celkovém výkonu 5 MWp. Panely jsou připojeny přes DC část do střídačů, které zajišťují konverzi stejnosměrné elektrické energie na střídavou a přímou dodávku vyrobené elektrické energie v automatickém režimu nafázování do sítě VN přes transformátory v trafostanici. Střídač obsahuje integrovanou napěťově-frekvenční ochranu pro samočinné odpojení od sítě.

Výkon získaný ze solárních panelů je ze stejnosměrného napětí přeměněn v třífázovém měničích na střídavé napětí 400/230V, 50Hz, které bude připojeno přes rozvaděče NN v trafostanicích a přes transformátory k síti VN. Nafázování je automaticky zajištěno měničem.

Propojení solárních panelů je provedeno DC kabely 1x6 mm² s dvojitou izolací pomocí konektorů. Solární panely jsou připojeny v sérioparalelním zapojení do rozvaděčů R-DC, kde je umístěna přepěťové ochrana a pojistkový odpínač s válcovými pojistkami pro jistění přívodů ze solárních panelů. Ze sekce DC jsou vedeny fotovoltaické kabely 2x16 mm² s dvojitou izolací na DC vstupy střídače. Střídače jsou umístěny vždy na krajích jednotlivých polí FVE na nosných sloupcích panelů. Ze střídavých výstupů střídačů jsou vedeny kabely typu H07RN-F 5x70 mm² do rozvaděčů NN v trafostanici, kde jsou umístěny přepěťové ochrany AC a jistění jednotlivých střídačů. Celkem bude v elektrárně umístěno čtyřicet střídačů o výkonu 125 kW. Střídače použité ve FVE jsou typ SOFAR 125KTL-HV 2.1.

Tab. 2.1: Vybrané parametry střídače SOFAR 125KTL-HV

P_n	P_{max}	I_n	I_{max}	I_p	I''_k	f_n	U_n	$\cos \varphi$
125 kW	137 kVA	144 A	160 A	756,7 A	378 A	50 Hz	400-575 VAC	1

2.1.2 Dieselgenerátor

Diesel-generátor použitý ve funkci podpůrné služby bude pracovat bez vazby na FVE. Generátor je kompaktní celek, který je tvořen vznětovým motorem s chladičem a uzavřeným mazacím okruhem spojeným přes pružnou spojku s alternátorem. Soustrojí je pružně uloženo na společném rámu. Soustrojí je opatřeno startovacími akumulátory pro automatický start. Soustrojí je navrženo v kapotovaném provedení Eurosilent (v protihlukové kapotáži) s interní nádrží se systémem automatického doplňování z externí zásobní nádrže. Typ diesel-generátoru použitého je X1100C od firmy SDMO. Vybrané parametry jsou uvedeny v tabulce (2.2).

Tab. 2.2: Vybrané parametry diesel-generátoru XC1100K

Typ	X1100C
Provedení kapotáže	Eurosilent
Jistič alternátoru	1600 A
Napětí	400/230V, 50 Hz
Maximální výkon St-By [$\cos\varphi = 0,8$ kW/kVA]	880/1100 [kW/kVA]
Trvalý výkon PRP [$\cos\varphi = 0,8$ kW/kVA]	800/1000 [kW/kVA]
Podélná rázová reaktance x''_d	17,6 %
Rozměry [mm] (d x š x v)	6400x2170x2721
Hmotnost [kg] (čistá)	9840

2.2 Místo připojení v DS

Jak již bylo zmíněno, trafostanice bude připojená do distribuční soustavy na hladině vysokého napětí 22 kV kabelovým paprskem z nadzemního vedení. V místě připojení je provozovatelem distribuční soustavy společnost EG.D, a.s., všechna pravidla a podmínky, kterými se se bude návrh řídit a podle kterých bude trafostanice navrhována, se budou vztahovat k tomuto provozovateli distribuční soustavy.

2.3 Koncepce trafostanice

Trafostanice by měla sestávat z těchto tří hlavních částí:

- rozvodny vysokého napětí,
- stanoviště transformátorů,
- rozvodny nízkého napětí.

Dále bude potřeba trafostanici vybavit pomocnou technologií pro dálkové řízení a signalizaci pro potřeby distributora i provozovatele trafostanice. Trafostanice bude projektována jako bezobslužná.

2.3.1 Rozvodna VN

v rozvodně bude umístěn rozvaděč VN. Do rozvaděče bude zapojen kabelový přívod 22 kV z distribuční soustavy. Dále se v rozvaděči bude nacházet obchodní měření a budou z něj kabely vyvedeny vývody k jednotlivým transformátorům.

2.3.2 Stanoviště transformátorů

Každý transformátor bude mít vlastní stanoviště, které bude dostatečně velké, aby byla umožněna pohodlná doprava a instalace, a po uvedení do provozu také revize a údržba transformátorů. Ztrátové teplo vzniklé provozem transformátoru je nutné ze stanoviště odvětrat, aby nedocházelo k dalšímu zahřívání transformátoru. Toho bude v navrhovaném případě dosaženo přirozením větráním stanoviště skrze větrací otvory, které budou vhodně chráněny krytím dle příslušné normy[2]. v případě olejových transformátorů je ještě nutné pod trafem zbudovat jímku pro případný únik oleje.

2.3.3 Rozvodna NN

v rozvodně NN budou nacházet rozvaděče NN. Vybavení rozvaděčů bude plnit dvě hlavní úlohy, jednak zde budou hlavní jističe pro jištění sekundární strany transformátoru a jednak sem bude taktéž přiveden výkon ze střídačů FVE nebo z diesel-generátoru.

2.3.4 Transformátory

Prvním a důležitým krokem při návrhu trafostanice je stanovení jmenovitého výkonu a počtu transformátorů. Od této skutečnosti se následně odvíjí dimenzování dalších zařízení trafostanice.

Jmenovitý výkon transformátorů a jejich počet se stanoví dle celkového instalovaného výkonu fotovoltaické elektrárny a diesel-generátoru. Fotovoltaická elektrárna bude vyrábět elektrickou energii pouze pokud bude svítit slunce a okamžitý vyráběný výkon bude v závislosti na intenzitě slunečního záření, to implikuje, že fotovoltaická elektrárna bude dodávat maximální, tedy instalovaný výkon jen pár hodin denně. Podle dat ERÚ[1] je průměrný koeficient využití solárních elektráren v ČR zhruba 12,6 % a panely, které nejsou umístěny s optimálním sklonem či orientací, mají

koeficient využití ještě nižší. A samozřejmě také reálný špičkový výkon je nižší než výkon instalovaný. Transformátory mohou být také krátkodobě přetěžovány. Vzhledem k těmto faktům není potřeba transformátory moc předimenzovat. Na druhou stranu nesmí být transformátory trvale přetěžovány. Při přetížení transformátoru se zvyšuje jeho teplota. Vyšší teplotou dochází k rychlejšímu stárnutí izolace a tím i ke snížení životnosti transformátoru.

3 Návrh transformátorů

Jak bylo v předchozí kapitole popsáno, pro návrh transformátorů je klíčový instalovaný výkon připojované elektrárny. Výkon FVE bude rozdělen na stejně velké bloky pro jednotlivé transformátory. Je to výhodné mimo jiné i vzhledem k opravám nebo servisu kdy v případě odstavení a práce na jednom transformátoru, může zbývající část elektrárny dále vyrábět elektrickou energii a dodávat ji do sítě. Transformátory nebudou pracovat v paralelním provozu.

3.1 Stanovení počtu a výkonu transformátorů

Výkon navrhovaná FVE bude rozdělen na čtyři bloky po 1250 kW, což dává $4 \cdot 1250 = 5000$ kW, tedy výkon elektrárny. Pro vyvedení výkonu FVE budou uvažovány čtyři transformátory o jmenovitém výkonu nejbližším vyšším od 1250 kW tedy 1600 kVA. Skutečné zatížení získáme z rovnice(3.1), Kde S_i je instalovaný výkon a S_t je výkon transformátoru.

$$\beta = \frac{S_i}{S_t} \cdot 100 \quad (\%; \text{kVA}; \text{kVA}) \quad (3.1)$$

Pro navržené trať tedy bude platit:

$$\beta = \frac{1250}{1600} \cdot 100 = 78,1 \%$$

Jak je patrné transformátory budou i při maximální dodávce výrobě energie ideálně zatížené.

Instalovaný dieselgenerátor má zdánlivý výkon 1100 kVA a činný výkon je 880 kW. Podpůrný zdroj by měl být z hlediska spolehlivosti připojen do rozvaděče VN přes vlastní transformátor. Proto bude pro dieselgenerátor bude uvažován transformátor o jmenovitém výkonu 1250 kVA.

Ekodesign

V současné době je na území celé EU, tedy včetně České republiky v platnosti nařízení Evropské komise č. 548/2014 ze dne 21. května 2014, respektive upravující nařízení Evropské komise č. 2019/1783 ze dne 1. října 2019[6], kterým se provádí směrnice Evropského parlamentu a Rady 2009/125/ES, týkající se malých, středních a velkých výkonových transformátorů. V současnosti platný stupeň 2 je v účinnosti od 1. července 2021. Nařízení Evropské komise č. 548/2014 stanovuje požadavky na ekodesign pro uvádění na trh nebo do provozu výkonových transformátorů s minimálním výkonem 1 kVA používaných v elektrických přenosových a distribučních sítích o kmitočtu 50 Hz nebo pro průmyslové aplikace. Toto nařízení se vztahuje

na všechny transformátory zakoupené po 11. červnu 2014. Hlavním cílem tohoto nařízení je snížení spotřeby energie a zlepšení environmentálních aspektů spojených s výrobou a provozem transformátorů. To má zásadní dopad na návrh a provoz trafostanic, protože transformátory jsou klíčovou součástí těchto zařízení.

V návrhu je tedy možné počítat pouze s nízkoztrátovými transformátory. Na výběr jsou buď transformátory suchého typu nebo transformátory ponořené do kapaliny – olejové. Z tabulky č.1 v přílohách je patrné, že olejové transformátory mají nižší ztráty při chodu nakrátko a naprázdno, než je tomu tak u transformátorů suchých, viz tabulka č.2 v přílohách. Logické je tedy zvolení transformátoru s nižšími ztrátami. Jediná místa, kde se mohou transformátory s litou izolací na rozdíl od olejových transformátorů instalovat, jsou všude tam, kde provoz z hlediska nebezpečí výbuchu, požáru nebo seismické odolnosti, případně kde ohrozí znečištění životního prostředí, nepřipouští instalaci olejových transformátorů. To ale není případ navrhované trafostanice, kde budou i z hlediska charakteru výroby elektrické energie použity transformátory olejové s nižšími ztrátami.

3.2 Zvolené transformátory

V trafostanici budou tedy instalovány čtyři olejové transformátory o výkonu 1600 kVA pro samotnou FVE elektrárnu a jeden olejový transformátor o výkonu 1250 kVA pro diesel-generátor. Vzhledem k nařízení Evropské komise č. 548/2014 tedy jsou ztráty dané pro všechny výrobce stejné a není potřeba porovnávat jednotlivé modely a jejich parametry. Zvoleny budou transformátory od firmy Elpro-Energo. Vybrané parametry zvolených transformátorů jsou uvedeny v tabulce 3.1.

Tab. 3.1: Vybrané parametry zvolených transformátorů, převzato z [5]

Typ	Jmenovitý výkon (kVA)	Převod (kV)	P_k (W)	P_k (W)	uk (%)
OTC1250B20	1250	22/0,4	855	9500	6
OTC1600B20	1600	22/0,4	1080	12000	6

Nyní už jsou zvoleny všechny komponenty a známy všechny parametry potřebné k výpočtu zkratových poměrů.

4 Výpočet zkratových poměrů

Pro návrh komponent trafostanice, jako rozvaděčů a kabelů, je důležité stanovit požadovanou zkratovou odolnost. Ta se stanovuje dle zkratových poměrů. Pro potřeby návrhu není nutné znát všechny typy a průběh zkratového proudu. Postačovat budou charakteristické hodnoty zkratového proudu, jako počáteční rázový zkratový proud, nárazový zkratový proud a ekvivalentní oteplovací proud.

Počítán bude pouze.

Při výpočtu se bude postupovat dle normy ČSN EN 60909-0[4], tedy metodou ekvivalentního zdroje napětí v místě zkratu. Ze všeho nejdříve je nutné stanovit jmenovité parametry, se kterými se bude počítat. Výpočet bude proveden ve skutečných hodnotách.

Počáteční souměrný rázový zkratový proud se vypočítá jako:

$$I_k'' = \frac{c \cdot U_n}{\sqrt{3} \cdot |\bar{Z}_c|} \quad (A; V; \Omega). \quad (4.1)$$

Nárazový zkratový proud:

$$i_p = \kappa \cdot \sqrt{2} \cdot I_k'' \quad (A; -; A). \quad (4.2)$$

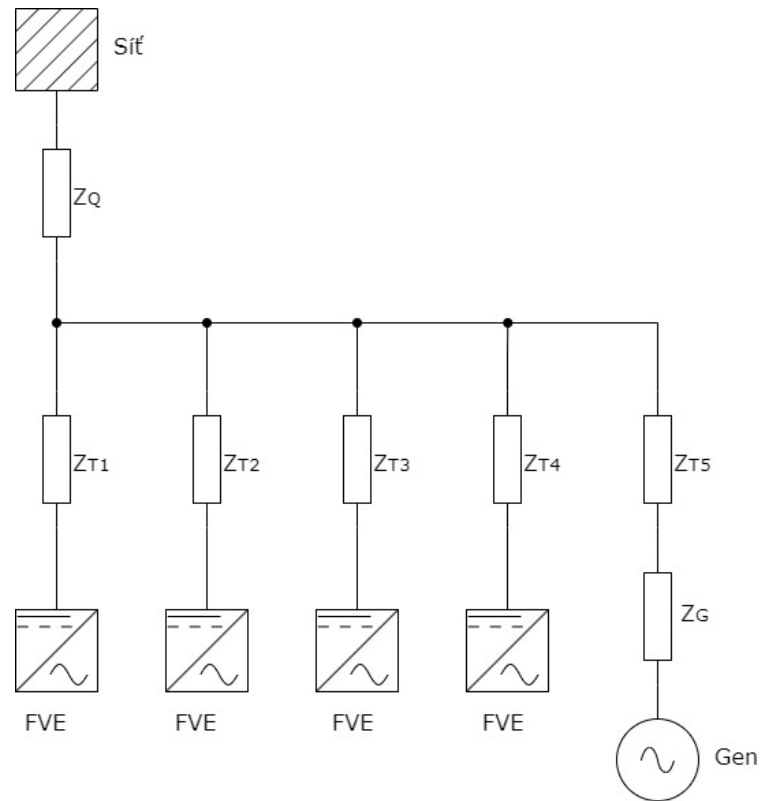
Pro odolnost tepelným účinkům zkratových proudů je potřeba ještě vypočítat ekvivalentní oteplovací zkratový proud:

$$I_{th} = I_k'' \sqrt{m + n} \quad (A; A; -; -). \quad (4.3)$$

Hodnota součinitele pro tepelné účinky stejnosměrné složky zkratového proudu m se určí obrázku 18 v normě[4]. Pro hodnota součinitele pro tepelné účinky střídavé složky n lze dle normy pro DS použít $n = 1$.

4.1 Zkratové impedance

Z technických parametrů jednotlivých prvků trafostanice je nejprve nutné spočítat jejich zkratové impedance. Impedance veškerých kabelů propojů se zanedbají. Náhradní schéma je na obrázku 4.1.



Obr. 4.1: Náhradní schéma zkratových impedancí

Transformátor

Zkratová impedance transformátoru se získá výpočtem ze štítkových hodnot transformátoru. (4.4)

$$R_T = u_{rt} \cdot \frac{U_{nT}^2}{S_{nT}} = \frac{P_k}{S_{nT}} \cdot \frac{U_{nT}^2}{S_{nT}} \quad (\Omega; W; VA; V; VA) \quad (4.4)$$

$$Z_T = \frac{u_{kr}}{100\%} \cdot \frac{U_{nT}^2}{S_{nT}} \quad (\Omega; -; V; VA) \quad (4.5)$$

A pomocí těchto hodnot lze vypočítat reaktanci transformátoru:

$$X_T = \sqrt{Z_T^2 - R_T^2} \quad (\Omega) \quad (4.6)$$

A to už postačuje k tomu aby se stanovila výsledná zkratová impedance:

$$\bar{Z}_T = R_T + jX_T \quad (\Omega) \quad (4.7)$$

Impedanci je nutné ještě korigovat. Korekční součinitel pro transformátory se určí jako:

$$K_T = 0,95 \cdot \frac{c_{\max}}{1 + 0,6 \cdot x_T} \quad (-) \quad (4.8)$$

kde c_{\max} pro soustavy vysokého napětí je 1,1, a pro zjednodušení lze uvažovat že $x_t \approx u_k$.

Nejprve impedance transformátorů T1-T4 1600 kVA pro FVE z hodnot v tabulce 3.1:

$$\begin{aligned} R_T &= u_{rt} \cdot \frac{U_{nT}^2}{S_{nT}} = \frac{P_k}{S_{nT}} \cdot \frac{U_{nT}^2}{S_{nT}} = \frac{12000}{1600 \cdot 10^3} \cdot \frac{(22 \cdot 10^3)^2}{1600 \cdot 10^3} = 2,269 \Omega \\ Z_T &= \frac{u_{kr}}{100\%} \cdot \frac{U_{nT}^2}{S_{nT}} = \frac{6}{100\%} \cdot \frac{(22 \cdot 10^3)^2}{1600 \cdot 10^3} = 18,150 \Omega \\ X_T &= \sqrt{Z_T^2 - R_T^2} = \sqrt{18,150^2 - 2,269^2} = 18,008 \Omega \\ \bar{Z}_T &= R_T + jX_T = 2,269 + j18,008 \Omega \\ K_T &= 0,95 \cdot \frac{c_{\max}}{1 + 0,6 \cdot u_k} = 0,95 \cdot \frac{1,1}{1 + 0,6 \cdot 0,06} = 1,009 \end{aligned}$$

Výsledná impedance pro transformátor 1600 kVA na hladině VN po korekci je:

$$\bar{Z}_{T,k} = \bar{Z}_T \cdot K_T = (2,269 + j18,008) \cdot 1,009 = 2,89 + j18,164 \Omega.$$

Ten stejný výpočet pro transformátor 1250 kVA pro diesel-generátor z hodnot v tabulce 3.1:

$$\begin{aligned} R_{T5} &= u_{rt} \cdot \frac{U_{nT}^2}{S_{nT}} = \frac{P_k}{S_{nT5}} \cdot \frac{U_{nT}^2}{S_{nT}} = \frac{9500}{1250 \cdot 10^3} \cdot \frac{(22 \cdot 10^3)^2}{1250 \cdot 10^3} = 2,943 \Omega \\ Z_{T5} &= \frac{u_{kr}}{100\%} \cdot \frac{U_{nT}^2}{S_{nT}} = \frac{6}{100\%} \cdot \frac{(22 \cdot 10^3)^2}{1250 \cdot 10^3} = 23,232 \Omega \\ X_{T5} &= \sqrt{Z_{T5}^2 - R_{T5}^2} = \sqrt{23,232^2 - 2,943^2} = 23,045 \Omega \\ \bar{Z}_{TG} &= R_T + jX_T = 2,943 + j23,045 \Omega \\ K_{T5} &= 0,95 \cdot \frac{c_{\max}}{1 + 0,6 \cdot u_k} = 0,95 \cdot \frac{1,1}{1 + 0,6 \cdot 0,06} = 1,009 \end{aligned}$$

Výsledná impedance pro transformátor 1250 kVA na hladině VN po korekci je:

$$\bar{Z}_{T5,k} = \bar{Z}_T \cdot K_T = (2,943 + j23,045) \cdot 1,009 = 2,968 + j23,245$$

Síťový napáječ

Zkratový výkon sítě v místě připojení uvažujeme $S_k'' = 500 \text{ MVA}$. Ekvivalentní impedance Z_Q sítě v místě připojení napáječe se určuje následovně:

$$\bar{Z}_Q = j \cdot \frac{c \cdot U_{n,VN}^2}{S_k''} \quad (\Omega; -; V; VA) \quad (4.9)$$

$$\bar{Z}_Q = j \cdot \frac{1,1 \cdot (22 \cdot 10^3)^2}{500 \cdot 10^6} = j1,065 \Omega$$

Diesel-generátor

Zkratová impedance diesel-generátoru se spočítá pomocí saturované podélné rázové reaktance generátoru x_d'' z tabulky 2.2 :

$$\bar{Z}_G = R_G + j \cdot x_d'' \cdot \frac{U_{nG}^2}{S_{nG}} \quad (\Omega; \Omega; -; V; VA) \quad (4.10)$$

$$\bar{Z}_G = 0 + j \cdot 0,176 \cdot \frac{400^2}{1100 \cdot 10^3} = j0,0256 \Omega$$

Výslednou hodnotu je nutné korigovat. Korekční součinitel se získá ze vzorce (4.11)

$$K_G = \frac{U_n}{U_{rG}} \cdot \frac{c_{\max}}{1 + x_d'' \cdot \sqrt{1 - \cos^2 \varphi_{rG}}} \quad (-) \quad (4.11)$$

$$K_G = \frac{400}{400} \cdot \frac{1,1}{1 + 0,176 \cdot \sqrt{1 - \cos^2 0,8}} = 1,0973$$

Výsledná korigovaná zkratová impedance diesel-generátoru je rovna:

$$\bar{Z}_{GK} = \bar{Z}_G \cdot K_G \quad (4.12)$$

$$\bar{Z}_{GK} = j \cdot 0,0256 \cdot 1,0973 = j0,028 \Omega.$$

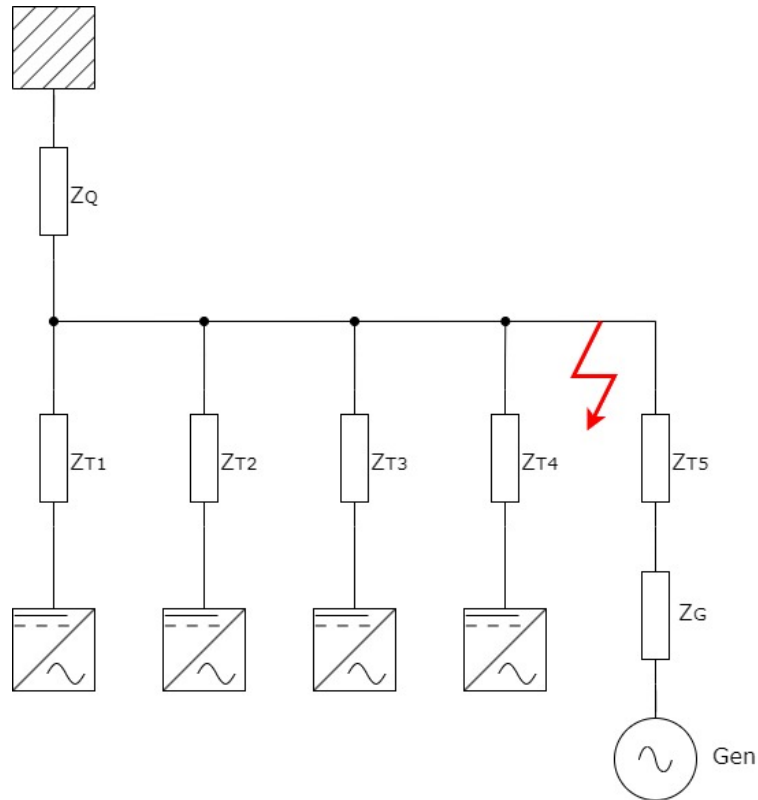
Střídače

Z technického listu střídačů lze vyčíst přímo zkratové příspěvky, není tedy nutné nic přepočítávat $I_k'' = 378 \text{ A}$ a $i_p = 757,7 \text{ A}$. Zkratové příspěvky od jednotlivých bloků FVE:

$$I_{k,FVE}'' = 10 \cdot 378 = 3780 \text{ A}$$

$$i_{p,FVE} = 10 \cdot 756,7 = 7567 \text{ A}$$

4.2 Zkratové poměry na straně VN



Obr. 4.2: Náhradní schéma zkratových impedancí s vyznačením zkratu na straně VN

Vztažné napětí U_{VN} bude zvoleno jmenovité napětí U_n hladiny VN tedy 22 kV . Impedanci diesel-generátoru je potřeba přepočítat na tuto hladinu.

$$\bar{Z}_{GK,VN} = \bar{Z}_{GK} \cdot \frac{U_{VN}^2}{U_{NN}^2} = j0,028 \cdot \frac{22^2}{0,4^2} = j77,41\ \Omega$$

Zkratový příspěvek od sítě (4.1):

$$I''_{kS} = \frac{c \cdot U_n}{\sqrt{3} \cdot |\bar{Z}_Q|} = \frac{1,1 \cdot 22 \cdot 10^3}{\sqrt{3} \cdot |j1,065|} = 13,122\text{ kA}$$

Zkratový příspěvek od generátoru:

$$I''_{kG} = \frac{c \cdot U_n}{\sqrt{3} \cdot |\bar{Z}_{GK,VN} + Z_{T5,k}|} = \frac{1,1 \cdot 22 \cdot 10^3}{\sqrt{3} \cdot |j77,41 + (2,968 + j23,245)|} = 138,7\text{ A}$$

Zkratový příspěvek od střídačů je nutné přepočítat na hladinu VN:

$$I''_{k,FVE} = I''_{k,FVE} \cdot \frac{U_{NN}}{U_{VN}} = 3780 \cdot \frac{0,4}{22} = 68,727\text{ A}$$

Střídačů jsou čtyři bloky, takže se výsledný proud bude:

$$I''_{k,FVE,C} = I''_{k,FVE} \cdot 4 = 68,727 \cdot 4 = 274,9 \text{ A}$$

Celkový počáteční souměrný rázový zkratový proud bude roven součtu zkratových příspěvků jednotlivých zdrojů.

$$I''_k = I''_{kS} + I''_{kG} + I''_{k,FVE,C} = 13\,122 + 138,7 + 274,9 = 13,535 \text{ kA}$$

Nárazový zkratový proud na straně VN:

$$\kappa = 1,02 + 0,98^{-3 \frac{R}{X}} = 1,02 + 0,98^{-3 \cdot 0,0695} = 1,82$$

$$i_p = \kappa \cdot \sqrt{2} \cdot I''_k = 1,82 \cdot \sqrt{2} \cdot 13,535 = 34,84 \text{ kA.}$$

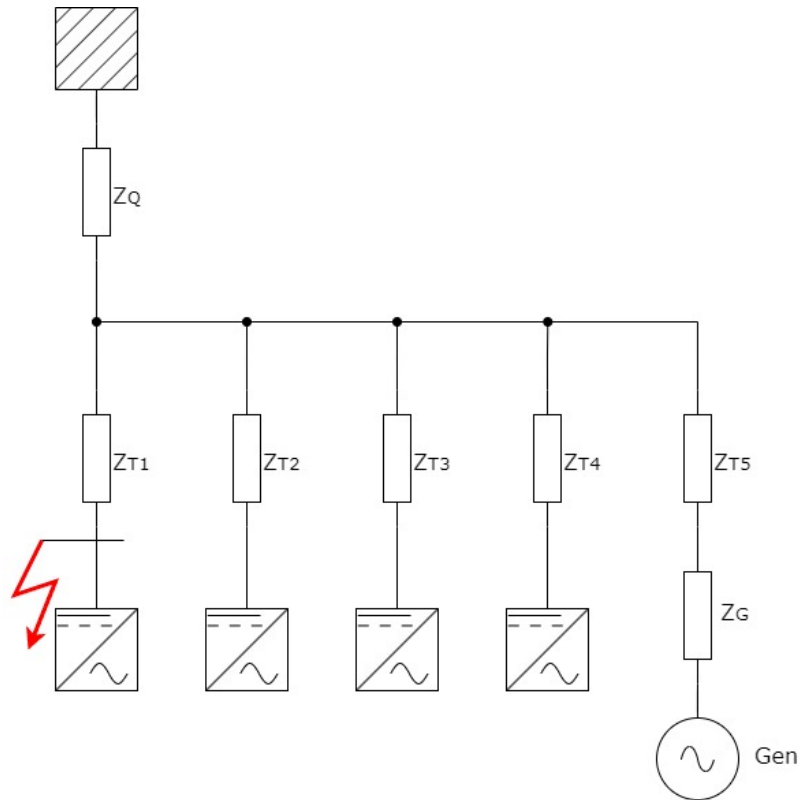
Ekvivalentní oteplovací zkratový proud na straně VN, hodnota součinitele tepelných účinků jednosměrné složky byla stanovena jako $m = 0,2$:

$$I_{th} = I''_k \sqrt{m + n}$$

$$I_{th} = 13,535 \cdot 10^3 \sqrt{0,2 + 1} = 14,83 \text{ kA.}$$

4.3 Zkratové poměry na straně NN

Vztažné napětí U_{NN} bude zvoleno 400 V a proto je nutné přepočítat impedance transformátorů a síťového napáječe na hladinu NN. U zkratů na straně NN budou zanedbány příspěvky od zdrojů v této elektrárně připojených přes jiný transformátor, protože takový zkratový proud by musel projít přes dva transformátory, tedy i dvě pojistky, které jej omezí, a hlavně u FVE je příspěvek tak malý, že ovlivní jen velmi málo výsledný zkratový proud. Největším zkratovým příspěvkem je příspěvek od sítě. Jelikož nebudou rozvaděče NN propojeny je potřeba spočítat zvlášť pro rozvaděče pro FVE a diesel-generátor. Rozvaděče pro FVE jsou identické, postačí tak jeden výpočet.



Obr. 4.3: Náhradní schéma pro výpočet zkratu v rozvaděčích NN pro FVE

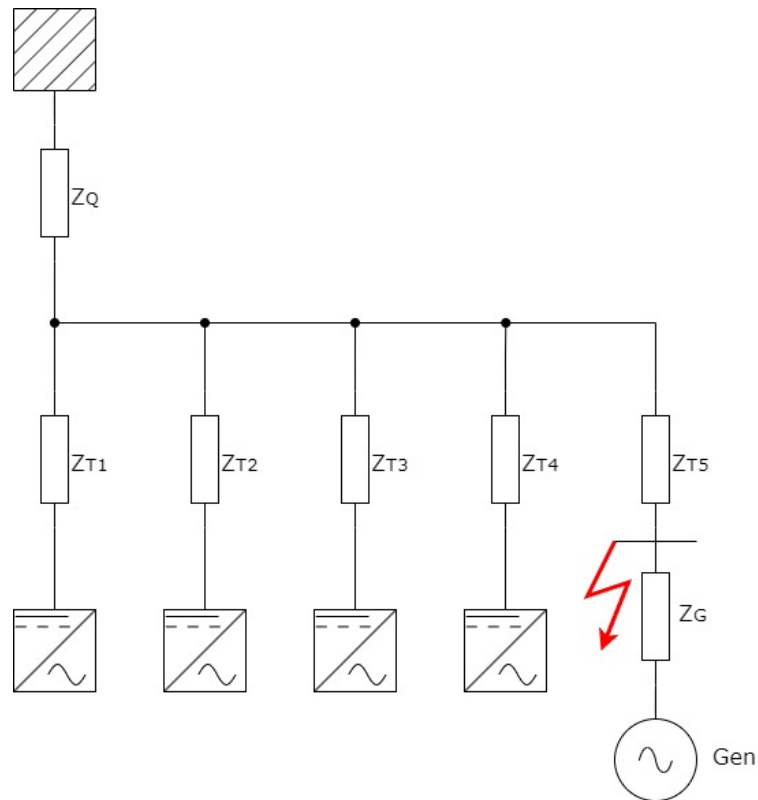
Přepočet impedancí síťového napáječe na hladinu NN:

$$\bar{Z}_{Q,NN} = \bar{Z}_Q \cdot \frac{U_{NN}^2}{U_{VN}^2} = j1,065 \cdot \frac{0,4^2}{22^2} = j0,352 \text{ m}\Omega.$$

Přepočet impedancí transformátorů na hladinu NN:

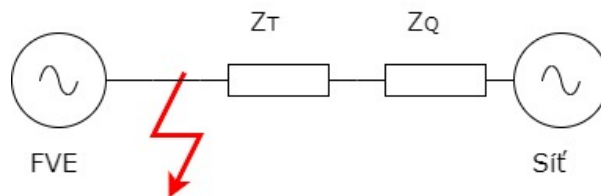
$$\bar{Z}_{T,k,NN} = \bar{Z}_{T,k} \cdot \frac{U_{NN}^2}{U_{VN}^2} = (2,89 + j18,164) \cdot \frac{0,4^2}{22^2} = (0,8 + j6) \text{ m}\Omega$$

$$\bar{Z}_{T5k,NN} = \bar{Z}_{T5k} \cdot \frac{U_{NN}^2}{U_{VN}^2} = (2,968 + j23,245) \cdot \frac{0,4^2}{22^2} = (1 + j7,7) \text{ m}\Omega.$$



Obr. 4.4: Náhradní schéma pro výpočet zkratu v rozvaděčích NN pro dieselgenerátor

4.3.1 Rozvaděče pro FVE



Obr. 4.5: Zjednodušené schéma pro výpočet zkratu v rozvaděčích NN pro FVE

Zkratový příspěvek od sítě:

$$I''_{kS} = \frac{c \cdot U_n}{\sqrt{3} \cdot |\bar{Z}_{Q,NN} + \bar{Z}_{T,k,NN}|} = \frac{1,1 \cdot 400}{\sqrt{3} \cdot |0,0008 + j0,006 + j0,00352|} = 39,68 \text{ kA}$$

$$i_{p,S} = \kappa \cdot \sqrt{2} \cdot I''_{kS} = 1,82 \cdot \sqrt{2} \cdot 39,68 = 102,13 \text{ kA.}$$

K výsledku se ještě přičte příspěvek od střídačů:

$$I''_k = I''_{kS} + I''_{k,FVE} = 39,68 + 3,78 = 43,46 \text{ kA}$$

$$i_p = i_p + i_{p,FVE} = 102,13 + 7,567 = 109,7 \text{ kA.}$$

Ekvivalentní oteplovací zkratový proud:

$$I_{th} = I_k'' \sqrt{m+n}$$

$$I_{th} = 43,46 \cdot 10^3 \sqrt{0,2+1} = 47,61 \text{ kA.}$$

4.3.2 Rozvaděče pro diesel-generátor

Nejprve se spočítá celková impedance:

$$\bar{Z}_{celk} = \frac{\bar{Z}_{GK} \cdot (\bar{Z}_{Q,NN} + \bar{Z}_{T5k,NN})}{\bar{Z}_{GK} + (\bar{Z}_{Q,NN} + \bar{Z}_{T5k,NN})} = \frac{j0,028 \cdot ((0,001 + j0,0077) + j0,00352)}{j0,028 + ((0,001 + j0,0077) + j0,00352)} =$$

$$\bar{Z}_{celk} = 0,00006 + j0,0061 \Omega.$$

Pak už celkový počáteční souměrný rázový zkratový proud a rázový zkratový proud:

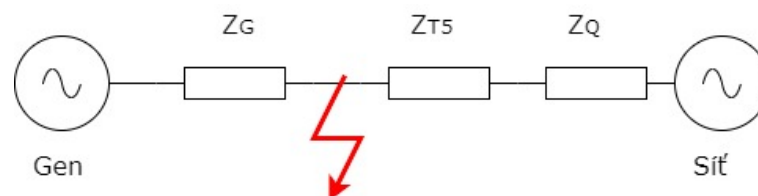
$$I_k'' = \frac{c \cdot U_n}{\sqrt{3} \cdot |\bar{Z}_{celk}|} = \frac{1,1 \cdot 400}{\sqrt{3} \cdot |0,00006 + j0,0061|} = 41,24 \text{ kA}$$

$$i_p = \kappa \cdot \sqrt{2} \cdot I_{kS}'' = 1,82 \cdot \sqrt{2} \cdot 41,24 = 106,16 \text{ kA.}$$

Ekvivalentní oteplovací zkratový proud:

$$I_{th} = I_k'' \sqrt{m+n}$$

$$I_{th} = 41,24 \cdot 10^3 \sqrt{0,2+1} = 45,18 \text{ kA.}$$



Obr. 4.6: Zjednodušené schéma pro výpočet zkratu v rozvaděči NN pro diesel-generátor

Tab. 4.1: Vypočtené zkratové proudy a přiřazené zkratové odolnosti

zkratový proud	rozvaděč VN	rozvaděč NN FVE	rozvaděč NN diesel-generátor
I''_k [kA]	13,54	43,46	41,24
i_p [kA]	34,84	109,7	106,16
I_{th} [kA]	14,83	47, 61	45,18
Normalizovaná řada	zkratových	odolností	
Jmenovitý vypínací proud I_{bn} [kA]	16	50	50
Jmenovitý krátkodobý proud I_{Ithn} [kA]	16	50	50
Jmenovitý dynamický proud i_{pm} [kA]	40	125	125

5 Návrh trafostanice

Celá trafostanice pro elektrárnu bude rozdělena na dvě trafostanice, které budou označeny jako TS1 a TS2. K rozdělení bylo přistoupeno vzhledem k množství zařízení a transformátorů. Trafostanice budou téměř totožné, jenom v jedné bude, z důvodu připojení dieselu, o jeden transformátor a rozvaděč NN více.

Trafostanice TS1 bude tvořena místností pro společnou rozvodnu VN i NN a stanovišti pro transformátory. Ve společné rozvodně VN a NN bude umístěna sestava rozvaděče VN se vstupním polem a obchodním měřením, dvě pole s vývody na transformátor a pole pro kabelový propoj do TS2 a dále rozvaděče NN. Do výřezu ve vnější stěně bude umístěn rozvaděč RE s elektroměrem pro obchodní měření, aby bylo možné odečítat stav elektroměru pracovníky distributora bez nutnosti vstupovat do trafostanice. v druhém přisazeném kiosku budou dvě stanoviště s transformátory.

Trafostanice TS2 opět bude tvořena místností pro společnou rozvodnu VN i NN a stanovišti pro transformátory. v TS2 bude ve společné rozvodně umístěna sestava rozvaděče VN s polem pro kabelový propoj do TS1 a tři pole s vývody na transformátor. Ve společné rozvodně budou také dva rozvaděče NN pro vývod FVE a jeden rozvaděč pro připojení diesel-agregátu. v druhém přisazeném kiosku budou tři stanoviště s transformátory, dva pro FVE a jeden pro diesel-agregát. Pod oběma objekty trafostanic bude vybudována společná mřížová zemnicí soustava. Výkres půdorysné dispozice obou objektů trafostanic jsou v příloze.

5.1 Provedení objektu trafostanice

Objekty trafostanice budou typizované železobetonové prefabrikáty – kiosky. Skelet trafostanice je složený z nadzemního železobetonového kiosku a podzemní základové vany. Základová vana bude sloužit také jako stavební základ kiosku, kabelový prostor a záchytná jímka pro případný únik oleje z transformátoru. Ve vaně budou kabelové průchodky pro prostup kabelů VN a NN do a z trafostanice. Kiosky se stanovišti transformátorů budou uvnitř členěny železobetonovými příčkami na jednotlivé stanoviště. Tloušťka stěn kiosku je 100 mm. Trafostanice jsou plánována jako bezobslužné, bez stálé obsluhy. Každá trafostanice se bude skládat ze dvou kiosků. v jednom budou stanoviště transformátorů a v druhém společná rozvodna VN a NN. Zvolen bude typ GRITEC, sestava se bude skládat z typizovaných kiosků[14]. U TS1 to budou typy UF3054 a UF3048. U TS2 to budou UF3042 a UF3066. Dveře musí být takových rozměrů, aby bylo možné nastěhovat vybavení trafostanice. Z hlediska bezpečnosti je nutné, aby se všechny dveře otvíraly směrem ven. Dveře u stanovišť

transformátorů budou mít žaluzie pro nenucené větrávání. Stejně žaluzie budou v otvoru v protější stěně a u krajních stanovišť také v boční stěně. Tak bude zajištění optimální proudění vzduchu pro odvod ztrátového tepla transformátorů ze stanovišť. Transformátory budou osazeny na ocelových profilech aby jejich případná výměna dveřmi trafokomory byla snazší. Rozvaděče VN a NN budou umístěny na mezipodlahu rozvodny. Součástí dodávky kiosků bude i osvětlení trafostanice. Pro napájení osvětlení trafostanice a jiné vlastní spotřeby bude v obou rozvodnách instalován rozvaděč vlastní spotřeby RVS.

5.2 Ochranné pospojování

Ochranné pospojování bude součástí dodávky jednotlivých kiosků. Bude provedeno páskem FeZn 30/4 mm pevně na povrchu ve výši 0,5m nad podlahou. Na ochranné pospojování budou připojeny kovové skříně rozvaděčů VN a NN, PEN přípojnice rozvaděče NN, uzel a konstrukce transformátoru, stínění kabelů VN a všechny kovové konstrukce. Ochranné pospojování bude po usazení trafostanice připojeno na připravené uzemnění.

5.3 Uzemnění transformovny

Uzemňovací soustava bude provedena dle ČSN 33 2000-5-54 ed.3 a ČSN EN 50522 ed.2 a bude společná pro zařízení VN, NN a hromosvod. Pod prostorem stanice se vybuduje mřížová zemnicí soustava z pásku FeZn 30/4 mm. Před vstupy do stanice se vybudují ekvipotenciální prahy. Uzemňovací přívody pro připojení vnitřního ochranného pospojování se provedou páskem FeZn 30/4 mm.

5.4 Zálohované napájení 24VDC

Jelikož budou v trafostanici instalovány zařízení vyžadující externí napájení stejnosměrným napětím 24 voltů je nutné do trafostanice umístit rozvaděč s akumulátorem. Pro zálohované napájení ochran, motorových pohonů jističů v rozpadových místech a dispečerského řízení bude instalován do společné rozvodny instalován rozvaděč označený jako R24. Rozvaděč bude napájen z rozvaděče vlastní spotřeby. V rozvaděči bude jistič přívodu střídavého napětí, jističe pro jednotlivé stejnosměrné vývody, usměrňovač a baterie. Baterie budou umístěné ve spodní části rozvaděče a jejich kapacita bude 65 Ah.

5.5 Návrh rozvaděče VN 22 kV

Rozvaděč VN musí obsahovat přívodní pole, kam bude zapojen přívod od distributora. Dále zde bude pole s obchodním měřením, protože dle připojovacích podmínek distributora[3] u příkonu transformátoru nad 630 kVA nebo použití více transformátorů se měření provádí na straně VN. A samozřejmě zde musí být jednotlivá pole vývodu na transformátory. Jak bylo v předchozí kapitole zmíněno trafostanice bude rozdělena do dvou kiosků na dvě samostatné trafostanice a to znamená i dvě sestavy rozvaděčů VN, které budou vzájemně propojeny kabely, čímž vznikne ještě potřeba dvou polí kabelových vývodů pro propojení obou trafostanic.

Celkem bude potřeba jedno přívodní pole, jedno pole měření, dále pět polí pro vývody na transformátory a dvě kabelové pole pro propojení trafostanic.

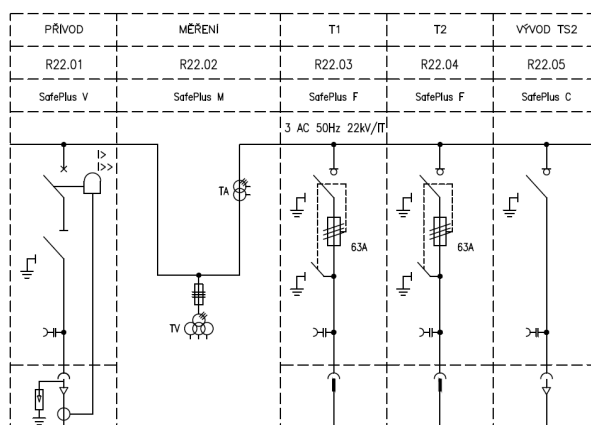
Jako rozvaděč VN 22 kV byl zvolen systém rozvaděčů SafePlus od firmy ABB. SafePlus je plynem izolovaný, kompaktní rozšířitelný systém rozvaděčů pro sekundární distribuci. Jako izolační plyn je použit osvědčený plyn Fluorid sírový, známý také jako SF₆, s vnikajícími eklektickými vlastnostmi. Rozvaděč je flexibilní díky možností rozšíření o kombinace plně modulárních a částečně modulárních konfigurací.[7] Rozvaděče budou označeny jako R22. Jednopolové schéma VN rozvaděčů je v příloze.

5.5.1 Rozvaděč v TS1

Rozvaděč VN se v TS1 bude skládat ze sestavy V-M-F-F-C viz obrázek 5.1:

- R22.01 – v – kabelový přívod z nadzemního vedení 22kV, s vypínačem a nadproudovou ochranou,
- R22.02 – M – pole měření,
- R22. 03, 04 – F – vývody k transformátorům s odpínačem a pojistkami,
- R22.05 – C – kabelový vývod s odpínačem.

Přívodní pole rozvaděče s vypínačem a nadproudovou ochranou slouží k vypnutí celé elektrárny v případě potřeby, například údržby, nebo v případě poruchových stavů – zkraty, přetížení nebo zpětný tok proudu prostřednictvím ochrany. Přívodní kabely budou na průchodkách vybaveny T-adaptéry s omezovači přepětí. Pole měření bude vybaveno měřicími transformátory proudu a napětí, které budou specifikovány v části zabývající se měřením. Pro vývody na jednotlivé transformátory budou následovat pole kabelových vývodů s odpínačem a pojistkou. Pojistky na primární straně transformátoru slouží k jištění transformátoru proti zkratu. Transformátory o výkonu 1600 kVA připojené do tohoto rozvaděče v TS1 budou jištěny pojistkami 63 A. Ovládání pohonu v přívodním poli bude motorické, ve vývodových polích bude ruční pomocí manipulační rukojeti, která bývá součástí dodávky rozvaděče. Přípojný bod rozvaděče bude skrze ochranné pospojování připojen na společnou zemnicí soustavu.



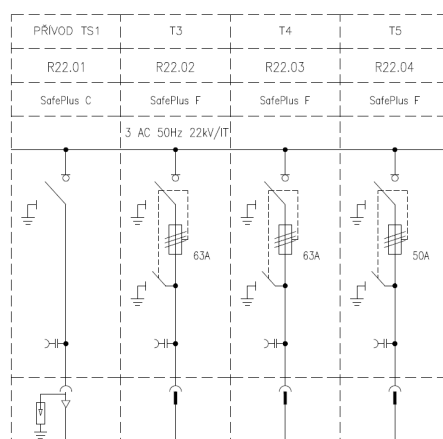
Obr. 5.1: Jednopolové schéma sestavy rozvaděče VN v TS1

5.5.2 Rozvaděč v TS2

Rozvaděč VN se v TS2 bude skládat ze sestavy C-F-F-F viz obrázek 5.2:

- R22.01 — C – kabelový vývod s odpínačem,
- R22.02, 03, 04 – F – vývody k transformátorům s odpínačem a pojistkami.

Přívodní pole s odpínačem slouží pro kabelové propojení s rozvaděčem v TS1 a možnost odpojení rozvaděče pro případ údržby či revize. Na průchodkách propojovacích kabelů budou opět T-adaptéry s omezovači přepětí. Následují pole vývodů na transformátory s odpínači a pojistkou. Jištění primárních obvodů transformátorů pro FVE bude osazeno pojistkami 63A a posledního transformátoru pro dieselgenerátor pojistkami 50 A. V tomto rozvaděči bude ovládání všech polí ruční pomocí manipulační rukojeti. Rozvaděč bude opět, tak jako v TS1, připojen pomocí ochranného pospojování na společnou zemnicí soustavu.



Obr. 5.2: Jednopolové schéma sestavy rozvaděče VN v TS2

5.6 Rozvaděče NN

Ve společných rozvodnách budou osazeny ocelo-plechové skříňové rozvaděče NN, v provedení IP20/00, vyšší stupeň krytí není nutný, protože se jedná o uzamčené vnitřní prostory, kam bude mít přístup pouze obsluha – tj. osoba znalá. Přívody a vývody budou spodní. Pro každý transformátor bude vlastní rozvaděč a tyto rozvaděče nebudou vzájemně propojeny. Rozvaděč vlastní spotřeby trafostanice bude napojen vždy ze všech rozvaděčů NN pro potřeby odstávky a možného přepojení. Rozvaděče budou zkratovou odolností dle normalizované řady zkratových odolností $I_{thn} = 50 \text{ kA}$, $I_{bn} = 50 \text{ kA}$ a $i_{pn} = 125 \text{ kA}$, odpovídající vypočteným hodnotám zkratů v předchozí kapitole. Jednopolová schémata rozvaděčů NN jsou v příloze.

5.6.1 Rozvaděče pro FVE

Rozvaděče RH pro FVE budou připraveny pro kabelové vývody do 400A jištěné odpínači, na které budou připojeny střídače. Přívodní pole budou vybavena hlavním jističem, pro jištění sekundární strany transformátoru, přepětovou ochranou typ 1+2, uživatelským měřicím přístrojem a síťovou ochranou. Hlavní jistič bude typ Arion WL120 s jmenovitým proudem 2000 A a nadproudovou spouští nastavenou na 1800 A. Pojistkové odpínače budou lištové, velikosti 2, typ FSD2 do 400 A. Uživatelský multimetr bude získávat hodnoty proudu z měřicích transformátorů proudu s převodem 1800/1 A. Jelikož se neuvažuje o rozšíření FVE, není proto nutné v rozvaděcích ponechávat rezervu. Celkem bude pro každý blok FVE sestava rozvaděče skládající se ze tří polí o rozměrech 800x600 mm.

5.6.2 Rozvaděč pro diesel-generátor

Vzhledem k tomu, že do rozvaděče bude připojen pouze diesel-generátor, bude rozvaděč sestávat pouze z jednoho pole s hlavním jističem pro jistění sekundární strany transformátoru, přepětovou ochranou typ 1+2, uživatelským měřicím přístrojem a s jističem pro připojení diesel-agregátu 1100 kVA. Hlavní jistič bude vzduchový typ Arion WL116 s jmenovitým proudem 2000 A a nadproudovou spouští nastavenou na 1800 A. Jistič diesel-agregátu bude typ 3VA27 s jmenovitým proudem 1600 A a elektronickou nadproudovou spouští nastavenou na 1520 A.

5.6.3 Hradící členy

U výroben s rotačními stroji, při výkonu větším než 500 kVA, může docházet k ovlivňování HDO. Výrobce může být PDS vyzván k provedení potřebných opatření k jeho odstranění. K tomuto účelu slouží hradící členy. V návrhu není s hradícími členy počítáno, nicméně je potřeba při návrhu rozvaděčů počítat s prostorovou rezervou pro případnou dodatečnou instalaci. To se týká rozvaděče pro diesel-generátor, kde je vzhledem k osazení rozvaděče pouze dvěma jističi dostatek místa.

5.6.4 Rozvaděče vlastní spotřeby

Rozvaděč vlastní RVS spotřeby bude v obou trafostanicích TS1 a TS2. Rozvaděče budou napájeny vždy ze dvou rozvaděčů RH tak, aby bylo možné v případě údržby přepínat přívody. Z rozvaděče vlastní spotřeby bude napájena vlastní elektroinstalace trafostanice a také zálohované rozvaděče pro ovládání a chránění. Jednotlivé vývody budou chráněny modulárními jističi se jmenovitým proudem a charakteristikou dle připojených zařízení.

5.7 Kabely

5.7.1 Kabely VN

Jako kabely pro VN budou použity standardní stíněné jedno-žilové energetické kabely se zvýšenou odolností vůči podélnému šíření vlhkosti a s dvojitým pláštěm 22-AXEKVCEY. Pro hlavní přívod VN, který bude veden v zemi od stožáru distributora do trafostanice, a stejně tak pro propoj mezi trafostanicemi budou použity kabely o průřezu 240 mm². Pro jednotlivé vývody na transformátory lze použít kabely o menším průřezu 70 mm², jelikož už se nachází za pojistkami, které omezují velikost zkratového proudu.

5.7.2 Kabely NN

Kabelové propoje z transformátorů do rozvaděčů NN

Jako kabelové propoje budou použity jednožilové propojovací kabely 1-CHBU 1x 240 mm² se zvýšenou odolností proti povětrnostním vlivům, odírání a působení motorové nafty. Tyto kabely mají pryžovou izolaci a jejich proudová zatížitelnost na vzduchu je 607 A. Na každé trafo pro FVE bude připojeno šestnáct kabelů, čtyři na každou fázi a čtyři na PEN. Transformátor pro diesel-generátor má menší jmenovitý výkon než ty pro FVE, a proto bude použito pouze dvanáct kabelů, tři na každou fázi a tři na PEN.

Kabely z FVE

Každý střídač bude připojen do příslušného rozvaděče NN samostatným kabelem. Střídače FVE mají jmenovitý proud 144 A a maximální proud 160 A. Pro připojení jsou proto zvoleny hliníkové kabely 1-AYKY-J 3x95+70, které mají proudovou zatížitelnost v zemi 215 A.

Kabely z diesel-generátoru

Výkon z diesel-generátoru bude do trafostanice, do rozvaděče NN RH5 vyveden v zemi jednožilovými měděnými kabely 1-NYY 1x 240 mm². Kabely mají proudovou zatížitelnost v zemi např. 737,2 A[9], záleží dle výrobce. Celkem bude pro vyvedení výkonu z diesel-generátoru použito dvanáct jednožilových kabelů, tři na každou fázi a tři na PEN.

5.7.3 Uložení kabelů v zemi

Přívodní kabely VN ze sekčního odpínače a kabelový propoj VN mezi budovami trafostanic TS1 a TS2 budou vedeny v zemi. Stejně tak všechny přívodní kabely NN od jednotlivých střídačů. Komunikační kabely budou vedeny v chráničkách. Kabely se do země musí ukládat tak, aby bylo splněno minimální dovolené krytí.[10]

Pro kabely s napětím do 1 kV, tzn. všechny kabely NN v navrhované FVE, je minimální dovolené krytí 70 cm od povrchu terénu. Kabely VN 22 kV se uloží v celé trase s krytím minimálně 1 m v kabelové rýze hloubky 1,2 m. Kabely budou uloženy na vrstvu písku minimálně 8 cm a zasypány budou opět stejně tlustou vrstvou písku. V hloubce 20-30 cm nad kabely VN bude uložena výstražná fólie. Výkop se nesmí zasypat popelem nebo podobným materiálem. Šířka rýhy a uspořádání je závislé na počtu kabelů.

Mezera mezi souběžně uloženými kabely 22 kV musí být alespoň dvojnásobek vnějšího průměru kabelu, minimálně 20 cm. Mezi kabely 22 kV a kabely 1 kV a ovládacími musí být minimálně 25 cm. Pokud není možné uvedené vzdálenosti dodržet, musí se vložit mezi kabely přepážka dostatečně mechanicky pevná (betonová deska, cihly apod.) Pro křížení platí stejné vzdálenosti a podmínky jako pro souběh.

6 Chránění

Pro bezpečný a bezporuchový provoz navržené trafostanice je potřeba ji také chránit. K tomuto účelu slouží elektrické ochrany. Kromě opatření na vlastní ochranu výrobní je nutno ještě splnit další opatření daná PPDS a požadavky distributora.

Dle nařízení Evropské komise 2016/631[11] se v případě této elektrárny jedná o výrobní modul B2. Podle této klasifikace budou v souladu s přílohou 4 PPDS[12] a také s Podklady pro Dispečerské řízení a chránění decentralních zdrojů (od 1000kW) připojovaných do distribučních sítí EG.D[13] nastaveny ochrany. Z výše jmenovaných dokumentů vyplývá nutnost hlídat nadpětí a podpětí, ale také nadfrekvenci a podfrekvenci v rozpadovém místě. Pro točivé stroje o výkonu nad 30 kVA je potřeba také hlídat jalový výkon odebíraný zdrojem a podpětí. Dále by je potřeba instalovat ochranu plnicí funkci zkratové ochrany a nadproudové směrové ochrany, se směrem do zdroje. Tato ochrana bude ve vstupním poli rozvaděče VN, aby byly chráněny už rozvaděče VN včetně kabelového propoje.

6.1 Rozpadový bod

Rozpadový bod slouží pro bezpečné a galvanické odpojení výrobní od zbytku DS, například v případě výpadku sítě nebo jiného problému, který by mohl ohrozit bezpečnost sítě nebo naopak samotné FVE, je systém odpojen od sítě. Toto odpojení bude realizováno pomocí vypínacích prvků. Rozpadový bod bude na straně nízkého napětí. U FVE to bude hlavní jistič sekundární strany transformátoru v jednotlivých rozvaděčích NN a u diesel-generátoru to bude jistič generátoru přímo na stroji. Na vypínací prvky rozpadových bodů budou působit ochrany dle přílohy 4 PPDS[12], které jsou popsány v další kapitole.

Opětovné připojení odpojené výrobní z důvodu odchylky napětí nebo frekvence je možné po splnění následujících kritérií:

- Napětí a frekvence jsou po dobu 300 s v daných mezích,
 - napětí v mezích 85 – 110 % jmenovité hodnoty,
 - frekvence v rozmezí 47,5– 50,05 Hz[12].
- Postupné najetí na výkon od nuly s gradientem maximálně deset procent jmenovitého výkonu za minutu.

Opětovné připojení FVE budou vykonávat motorové pohony na jističích v rozpadových místech. Motorové pohony budou napájeny stejnosměrným napětím 24 V z rozvaděče R24.

6.2 Ochrana v rozpadových místech

Jelikož je rozpadových míst více, je nutné použít stejný počet ochran. Ochrany budou působit na spínací prvky v rozpadových bodech. U rozvaděčů pro FVE bude ochrana působit na vypínací cívku hlavních jističů NN a u diesel-generátoru bude působit na vypínací cívku hlavního jističe generátoru.

Jako ochrana rozpadových míst, do kterých je zapojena fotovoltaika, byla zvolena ochrana MainsPro od firmy ComAp. Tato ochrana bude hlídat přepětí, podpětí, nadfrekvenci a podfrekvenci. Napětí pro ochranu není nutno transformovat, nebudou tudíž potřeba transformátory napětí a může být přes jištění napojeno přímo do ochrany. Napětí bude bráno hned za hlavním jističem ve funkci rozpadového bodu.

Pro ochranu rozpadového místa diesel-generátoru je zvolena ochrana InteliPro taktéž od firmy ComAp. Tato ochrana bude kromě přepětí, podpětí, nadfrekvence a podfrekvence, hlídat také směr jalového výkonu současně s podpětím. Ochrana bude získávat potřebné hodnoty proudu z přístrojového transformátoru proudu, s převodem 1800/5 A, třída přesnosti jádra 5P, nadproudový činitel 10 a jmenovitou zátěží 5 VA. Měřené napětí bude přes jištění napojeno do ochrany bez nutnosti transformace.

Ochrany budou napájeny přímo z přípojnic rozvaděče kde budou instalovány. Toto napájení není nutno zálohovat, protože pokud bude zdroj odpojen není potřebná ochrana v rozpadovém místě.

6.3 Nadproudová ochrana v přívodním poli VN

Nadproudová ochrana bude umístěna na straně VN, do přívodního pole R22.1 rozvaděče VN v TS1 a bude zde působit na vypínač v přívodním poli. Tato ochrana bude chránit celou výrobu před zkratem a přetížením. Jako nadproudová ochrana je zvolena REF615 od firmy ABB[8]. Pro měření budou použity přístrojové transformátory proudu s převodem 150/1 A, třídou přesnosti 5P, jmenovitým nadproudovým činitelem 10 a jmenovitou zátěží 4 VA. Ochrana bude nastavena dle tabulky 6.1. Přesné nastavení ochrany by bylo možné provést až podle hodnot v místě připojení poskytnutých provozovatelem distribuční soustavy.

Tab. 6.1: Nastavení nadproudové ochrany

stupeň $3I>$	$1,2I_n$	180 A/1,2 A	$t>0,5$ s
stupeň $3I>>$	$2,8I_n$	420 A/2,8 A	$t>0,2$ s

7 Měření a řízení v trafostanici

7.1 Dispečerské řízení

Podle PPDS provozovatel distribuční soustavy odpovídá za její bezpečný a spolehlivý provoz. Jedním z mnoha nástrojů k tomu mu mimo jiné slouží technický dispečink PDS. Dispečerské řízení slouží k dálkovému řízení a monitoringu paralelních výroben zapojených do distribuční sítě.

Dispečerské řízení se bude řídit podmínkami distributora[13]. Provozovatel distribuční soustavy v místě připojení, tedy EG.D, požaduje následující dispečerské informace a pokyny, které lze rozdělit na tři skupiny:

- Dálkové ovládání
- Dispečerské měření
- Signalizace

Všechny tyto dispečerská data se přenáší do, respektive z dispečinku EG.D, do řídicího systému SCADA (Supervisory Control And Data Acquisition – dispečerské řízení a sběr dat). V případě fotovoltaických elektráren (FVE) a jiných rozptýlených zdrojů energie je regulace jalového výkonu zvláště důležitá. Tyto zdroje mohou generovat výkon náhodně a nepředvídatelně, což může vést k nestabilitě v síti.

7.1.1 Dálkové ovládání

PDS požaduje ovládat určité prvky a řídit činný a jalový výkon. Jelikož výrobní vnořená, PDS požaduje dálkové ovládání vypínače pole vývodu do DS.

- Povel VYP vypínače
- Povel ZAP vypínače

Dále je požadováno řízení svorkového činného a jalového výkonu. To bude prováděno přímo ve střídačích. U činného výkonu se jedná nastavení regulačního výkonu zdrojů v předepsané procentní výši instalovaného výkonu. Pro FVE se jedná o povel:

- Povel P1, nastavení 0 %
- Povel P2, nastavení 30 %
- Povel P3, nastavení 60 %
- Povel P4, nastavení 100 % – základní provozní stav

U řízení jalového výkonu je vyžadováno krokování po 200 kVAR. Jalový výkon se reguluje v předepsaném tolerančním pásmu jmenovitého napětí při účinnících $\cos\varphi = 0,9$ odběr jalové energie do 0,9 dodávka jalové energie[12].

Pro navrhovanou výrobní to tedy po krocích 200kVAR vychází na 23 povelů:

- Povel Q11, nastavení $\cos\varphi = 0,999$ kapacitní

- Povel Q10c, nastavení $\cos \varphi = 0$, 996 kapacitní
- Povel Q9c, nastavení $\cos \varphi = 0$, 992 kapacitní
- Povel Q8c, nastavení $\cos \varphi = 0$, 987 kapacitní
- Povel Q7c, nastavení $\cos \varphi = 0$, 979 kapacitní
- Povel Q6c, nastavení $\cos \varphi = 0$, 971 kapacitní
- Povel Q5c, nastavení $\cos \varphi = 0$, 960 kapacitní
- Povel Q4c, nastavení $\cos \varphi = 0$, 947 kapacitní
- Povel Q3c, nastavení $\cos \varphi = 0$, 933 kapacitní
- Povel Q2c, nastavení $\cos \varphi = 0$, 917 kapacitní
- Povel Q1c, nastavení $\cos \varphi = 0$, 90 kapacitní
- Povel Q0L, nastavení $\cos \varphi = 1$
- Povel Q1L, nastavení $\cos \varphi = 0$, 90 induktivní
- Povel Q2L, nastavení $\cos \varphi = 0$, 917 induktivní
- Povel Q3L, nastavení $\cos \varphi = 0$, 933 induktivní
- Povel Q4L, nastavení $\cos \varphi = 0$, 947 induktivní
- Povel Q5L, nastavení $\cos \varphi = 0$, 960 induktivní
- Povel Q6L, nastavení $\cos \varphi = 0$, 971 induktivní
- Povel Q7L, nastavení $\cos \varphi = 0$, 979 induktivní
- Povel Q8L, nastavení $\cos \varphi = 0$, 987 induktivní
- Povel Q9L, nastavení $\cos \varphi = 0$, 992 induktivní
- Povel Q10L, nastavení $\cos \varphi = 0$, 996 induktivní
- Povel Q11L, nastavení $\cos \varphi = 0$, 999 induktivní

7.1.2 Dispečerské měření

Dispečerské měření slouží PDS pro získání informací o skutečné výrobě a přetoku do distribuční sítě. Distributor požaduje jednak měření v předávacím místě, tj. měření přetoku do DS a jednak měření sumy třífázových svorkových činných a jalových výkonů. Všechna měření musí být spojitá, aby je dispečerský systém EG.D mohl zpracovávat v reálném čase.

Měřicí transformátory pro dispečerské měření budou v místě obchodního měření. Měřicí transformátory napětí budou mít tři sekundární vinutí. Jedno bude pro obchodní měření a druhé pro dispečerské měření. Do třetího vinutí bude připojena odporová zátěž pro potlačení ferorezonance. Zvoleno je ferorezonanční ochranné zařízení VT Guard Pro od firmy ABB, chránící napěťové transformátory vysokého napětí před ferorezonančními kmity, které mohou být vyvolány přechodnými jevy, například spínací operace. Měřicí transformátory proudu budou mít dvě jádra, opět jedno jádro pro obchodní měření a jedno jádro pro dispečerské měření. Obchodní měření bude popsáno v samostatné kapitole.

Meteorologická data

Kromě měření elektrických veličin požaduje PDS EG.D také měření meteorologických dat. Zatím ve formě přípravy pro dodatečnou realizaci, která musí být zprovozněna nejpozději do čtyř měsíců od oznámení požadavku. U navrhované FVE jsou požadovány tyto měření:

- měření venkovní teploty,
- měření rychlosti větru,
- měření osvitů.

7.1.3 Signalizace

Signalizace slouží dispečinku k udržování informací o stavu spínacích prvků, provedení povelů, působení ochran a poruch. Požadovaný signalizovaný stav je vždy představován logickou jedničkou. Všechny signalizované události musí být do komunikačního protokolu uvedeny s časem vzniku události. V případě navrhované trafostanice se bude jednat o tyto signalizace:

- stavy spínacích prvků v přírodním poli VN
 - signalizace VYP vypínače
 - signalizace ZAP vypínače
 - signalizace VYP uzemňovače
 - signalizace ZAP uzemňovače
- stavová signalizace rozpadového místa
- signalizace působení ochran
 - působení nadproudové ochrany v rozvaděči VN
 - působení ochran v rozpadových bodech
- poruchová signalizace
 - porucha komunikace
 - suma poruch řízení činného i jalového výkonu
 - poruchy dálkového ovládání vypínače vstupního VN pole
 - * ztráta ovládacího napětí pole
 - * vypnutí jističe pro pohon vypínače
 - * pohon nepřipraven (pokud je signalizace k dispozici)
 - * přepínač pole dálkově/místně, signalizuje se místně
- signalizace nastavení omezení svorkového činného výkonu
 - P1 signalizace nastavení 0 % regulačního výkonu zdroje
 - P2 signalizace nastavení 30 % regulačního výkonu zdroje
 - P3 signalizace nastavení 60 % regulačního výkonu zdroje
 - P4 signalizace nastavení 100 % regulačního výkonu zdroje – základní provozní stav

- signalizace nastavení jalového výkonu P1-P23.

7.1.4 Skříň dispečerského řízení AXY01

Sběr požadovaných dat, předávání povelů a komunikace s dispečinkem EG.D bude zabezpečovat RTU (remote terminal unit – vzdálená terminálová jednotka), která bude umístěna do rozvaděče AXY01. Do skříně AXY01 bude přivedena signalizace stavu spínacích prvků ze vstupního pole R22.1 rozvaděče VN a signalizace působení nadproudové ochrany. A naopak z rozvaděče AXY01 budou do vstupního pole R22.1 rozvaděče VN vyvedeny ovládací povely pro ovládání vypínače tohoto pole. Dále budou přivedeny kabely měření z pole VN R22.2 (měření proudu a napětí), signalizace vypnutí, zapnutí rozpadových bodů. Po sběrnici RS485 bude povelovat střídače pro řízení činného a jalového výkonu. Signalizaci nastavení činného a jalového výkonu bude odesílat RTU po přijetí povelu na nastavení daného stupně.

Celý rozvaděč AXY01 včetně RTU bude ve vlastnictví výroby, EG.D dodá pouze SIM kartu pro mobilní komunikaci. Schéma dispečerského řízení a měření včetně všech signálů a povelu je v příloze. RTU bude od firmy ELVAC[15], která splňuje náročné požadavky na kybernetickou bezpečnost dle standardu IEC 62351-3, včetně dalších bezpečnostních funkcí potřebných v moderních komunikačních sítích. Řídící jednotka bude typ RTU7M-8, v konfiguraci:

- COMIO-PC3 GSM LTE – komunikační karta,
- EP-3U/100/120-3I/1-5A/10A-I – měřicí karta 3U3I, 3x100V, 3x5A,
- DI20-UPM – karta digitálních vstupů,
- DO10-U – karta digitálních výstupů,
- GSM/LTE anténa.

RTU bude se SCADA komunikovat přes GSM. Data budou předávána prostřednictvím protokolu IEC60870-5-104. Rozvaděč AXY01 musí mít možnost vyvedení externí antény pro GSM/LTE.

7.1.5 Řízení střídačů

Jednotlivé střídače budou s RTU jednotkou v rozvaděči AXY01 a mezi sebou navzájem komunikovat po sériové lince RS485. Pomocí této linky budou přenášeny veškeré informace o výrobě, jako aktuální proud, činný a jalový výkon. Dále budou pomocí sériové linky RS485 předávány povely z dispečinku EG.D skrze RTU na regulaci činného a jalového výkonu.

7.2 Obchodní měření

Jak již bylo v této diplomové práci několikrát zmíněno obchodní měření bude nepřímé na straně VN. Odběrné a předávací místo (OPM) bude v rozvaděči VN v poli R22.2. V předchozí kapitole v části dispečerské měření bylo popsáno, že v předávacím místě budou instalovány vícejádrové měřicí transformátory, aby bylo možné připojit jak dispečerské, tak obchodní měření. Převod MTP stanovuje provozovatel DS smlouvou o připojení. Měřicí transformátory proudu musí být s třídou přesnosti 0,5S a minimálním výkonem 10VA, a měřicí transformátory napětí s převodem 22/0,1 kV s třídou přesnosti 0,5. Všechny měřicí transformátory musí být úředně ověřené. Schéma zapojení obchodního měření v rozvaděči RE je v příloze.

Rozvaděč s elektroměrem musí být umístěn tak, aby byl přístupný z veřejného prostranství, aby k němu měli přístup pracovníci provádějící odečet. To může být dosaženo například umístěním elektroměrového rozvaděče na hranici pozemku. V navrhované trafostanici to bude vyřešeno tak, že skříň elektroměrového rozvaděče bude osazena do otvoru ve stěně betonového skeletu.

Závěr

Cílem této diplomové práce byl návrh transformační stanice pro vyvedení výkonu z fotovoltaické elektrárny a diesel-generátoru ve funkci podpůrné služby. První část práce byla zaměřena na koncepci, popsání požadavků na navrhovanou trafostanici a popsání místa připojení v distribuční soustavě provozovatele EG.D.

Nejprve byla provedena specifikace připojované výrobní, fotovoltaické elektrárny a diesel-generátoru, a místo připojení v distribuční síti. Dále byla věnována pozornost koncepci trafostanice, zahrnující rozvodnu VN, stanoviště transformátorů, rozvodnu NN a samotné transformátory.

Dále byl proveden návrh transformátorů pro optimální vyvedení výkonu. Došlo ke stanovení počtu a výkonu transformátorů a k výběru konkrétního typu. Byly zvoleny čtyři transformátory o výkonu 1600 kVA pro vyvedení výkonu z FVE a jeden o výkonu u 1250 kVA pro připojení diesel-generátoru. S využitím daných parametrů připojované výrobní a zvolených transformátorů bylo přistoupeno k výpočtu zkratových poměrů, a to jak na straně vysokého, tak na straně nízkého napětí. Tyto výsledky následně posloužili k dimenzování rozvaděčů.

Po výpočtu zkratových proudů už následoval samotný návrh trafostanice. Zde byl popsán návrh řešení s dvěma kioskovými prefabrikovanými betonovými trafostanicemi. Popsáno je provedení těchto objektů včetně ochranného pospojování, uzemnění a vybavení trafostanice zálohovaným napájením. Dále návrh rozvaděčů vysokého napětí v každé trafostanici a zvolení a popsání konkrétního modelu SafePlus od výrobce ABB. Následuje obdobným způsobem popis návrhu rozvaděčů pro nízké napětí. Popsány jsou navržené rozvaděče pro FVE a pro diesel-generátor. Dále je zde pamatováno na případné umístění hradících členů do hlavních rozvaděčů NN a také na rozvaděč vlastní spotřeby. Kapitola uzavírá popis a dimenzováním kabelů pro VN, pro propojky na transformátor, připojení jednotlivých střídačů a diesel-generátoru do trafostanice. Uvedeno je zde také uložení kabelů v zemi dle příslušné normy.

Chránění se věnuje následující kapitola, jejímž výstupem je návrh ochrany v trafostanici. Nejprve je definováno umístění rozpadových bodů. Poté jsou navrženy ochrany dle požadavků PDS a PPDS v těchto rozpadových bodech. Další částí kapitoly je také návrh nadproudové ochrany v přívodním poli rozvaděče VN. Díky těmto ochranám by měl být provoz navržené trafostanice bezpečný a bezporuchový a neměl by ohrožovat stabilitu elektrické sítě.

Poslední kapitola se věnuje návrhu dispečerského řízení, který umožňuje monitorování a regulaci provozu výrobní. Popsány jsou zde požadavky PDS na měření, řízení, ovládání a signalizaci. v rámci řízení činného a jalového výkonu jsou stanoveny jednotlivé stupně podle podmínek PDS EG.D. Součástí kapitoly je popis

způsobu řízení střídačů a také vlastní návrh rozvaděče dispečerského měření AXY01 se specifikací jednotky RTU pro komunikaci s dispečinkem EG.D. Na konci kapitoly je popis obchodního měření a jeho návrh, nakolik to absence smlouvy o připojení dovoluje.

Výsledkem práce je komplexní návrh transformační stanice, která splňuje nejen požadavky na efektivní a spolehlivé vyvedení výkonu z fotovoltaické elektrárny a diesel-generátoru ve funkci podpůrné služby, ale také všechny požadavky PDS a požadavky vycházející z PPDS. Tento návrh poskytuje úplný a podrobný přehled o tom, jak postupovat v případě návrhu transformační stanice připojené k distribuční síti, včetně dispečerského řízení.

Literatura

- [1] Energetický regulační úřad: *Zprávy o provozu*. Online. Energetický regulační úřad. 2023. Dostupné z: <https://www.eru.cz/zpravy-o-provozu-elektrizacni-soustavy>. [cit. 2023-11-07].
- [2] Federální úřad pro normalizaci a měření: ČSN EN 60529, *Stupně ochrany krytem (krytí - IP kód)*. 11/1993. 1993.
- [3] EG.D, a.s.: *Požadavky na provedení trafostanic ve vlastnictví žadatele připojované kabelovým vedením VN včetně požadavků na umístění, provedení a zapojení měřících souprav u zákazníků a výroben připojených k elektrické síti vysokého a velmi vysokého napětí*. Online. EG.D, a.s. 2023. Dostupné z: https://www.egd.cz/sites/default/files/2023-03/egd_2023_techicke_podminky_provedeni_trafostanic_01.pdf. [cit. 2023-11-17].
- [4] Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví: ČSN EN 60909-0 ed. 2: *Zkratové proudy v trojfázových střídavých soustavách - Část 0, Výpočet proudů*. Praha, 2016, 68 s.
- [5] Elpro Energo: *Technická data a podklady pro projektanty*. Online. Dostupné Z: <https://www.elpro-energo.cz/olejove-transformatory/tabulky-ekodesign/>. [cit. 2023-12-27]
- [6] Evropská komise: *Nařízení Komise (EU) 2019/1783 ze dne 1. října 2019, kterým se mění nařízení (EU) č. 548/2014, kterým se provádí směrnice Evropského parlamentu a Rady 2009/125/ES, pokud jde o malé, střední a velké výkonové transformátory*. Online. 2019. Dostupné z: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/CS/TXT/PDF/?uri=CELEX:32019R1783>. [cit. 2023-11-29].
- [7] ABB s.r.o.: *SafePlus 12/25 kV 630A - Leták*. Online. new.abb.com. 2020. Dostupné z: <https://search.abb.com/library/Download.aspx?DocumentID=9AKK107680A3059&LanguageCode=cs&DocumentPartId=&Action=Launch>. [cit. 2023-11-29].
- [8] ABB s.r.o.: *IED pro chránění a ovládání vývodu REF615*. Popis a technická data výrobku. Verze 5.0. 10.04.2014.
- [9] NKT A/S.: *NYN 0,6/1 kV*. Online. nkt.cz. Dostupné z: <https://www.nkt.cz/nase-vyroby/nn-kabely-do-1-kv/silove-kabely-do-1-kv/nyy-0-6-1-kv> [cit. 2024-3-21].
- [10] Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví: ČSN 73 6005: *Prostorové uspořádání vedení technického vybavení*. Praha, 10/2020, 36 s.

- [11] Evropská komise: *Narižení Evropské komise 2016/631 ze dne 14. dubna 2016, kterým se stanoví kodex sítě pro požadavky na připojení výroben k elektrizační soustavě*. Online. [2016-04-27]. Dostupné z: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/CS/TXT/?uri=CELEX:32016R0631>. [Cit. 2024-02-25].
- [12] Provozovatelé distribučních soustav: *Pravidla provozování distribučních soustav: Příloha 4*. Energetický regulační úřad., Online. 2022. Dostupné z: https://www.egd.cz/sites/default/files/2022-09/priloha_4_pravidla_pro_paralelni_provoz_vyroben_a_akumulacnich_zarizeni_09_2022.pdf. [Cit. 2024-02-25].
- [13] EG.D, a.s.: *Podklady pro Dispečerské řízení a Chránění decentralních zdrojů (od 1000kW) připojovaných do distribučních sítí EG.D*. [2023-01-01].
- [14] GRITEC s.r.o.: *Pochozí trafostanice*. Online. 2024. Dostupné z: <https://www.gritec.com/cz/technicke-budovy/produkty/elektrotechnika/pochozi-trafostanice/> [Cit. 2024-03-25].
- [15] ELVAC a.s.: *Modulární RTU*. Online. 2024. Dostupné z: <https://www.rtu.cz/produkty/modularni-rtu/> [Cit. 2024-04-25].

Seznam symbolů a zkratek

PDS	Provozovatel distribuční sítě
DS	Distribuční síť
PPDS	Pravidla provozování distribučních soustav
VN	Vysoké napětí
NN	Nízké napětí
FVE	Fotovoltaická elektrárna
RTU	Remote terminal unit – Vzdálená terminálová jednotka
GSM	Groupe Spécial Mobile – Globální systém pro mobilní komunikaci
LTE	Long Term Evolution – standart pro vysokorychlostní přenos dat v mobilních sítích

Přílohy

Tab. 1: Maximální ztráty pod zatížením a při chodu naprázdno (W) v případě tří-fázových středních výkonových transformátorů ponořených do kapaliny s jedním vinutím o $U_m \leq 24$ kV a druhým vinutím o $U_m \leq 3,6$ kV [6]

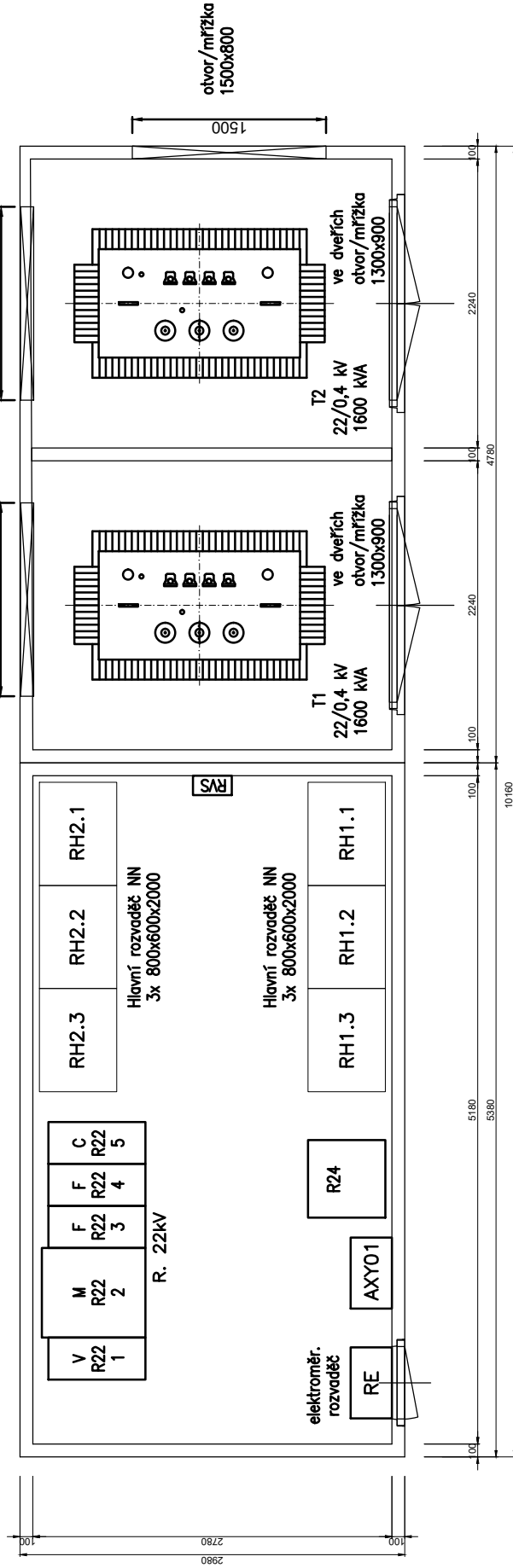
Stupeň 2 (od 1. července 2021)		
Jmenovitý výkon	Maximální ztráty pod zatížením P_k	Maximální ztráty při chodu naprázdno P_0
(kVA)	(W)	(W)
≤ 25	Ak (600)	Ao – 10 % (63)
50	Ak (750)	Ao – 10 % (81)
100	Ak (1 250)	Ao – 10 % (130)
160	Ak (1 750)	Ao – 10 % (189)
250	Ak (2 350)	Ao – 10 % (270)
315	Ak (2 800)	Ao – 10 % (324)
400	Ak (3 250)	Ao – 10 % (387)
500	Ak (3 900)	Ao – 10 % (459)
630	Ak (4 600)	Ao – 10 % (540)
800	Ak (6 000)	Ao – 10 % (585)
1 000	Ak (7 600)	Ao – 10 % (693)
1 250	Ak (9 500)	Ao – 10 % (855)
1 600	Ak (12 000)	Ao – 10 % (1 080)
2 000	Ak (15 000)	Ao – 10 % (1 305)
2 500	Ak (18 500)	Ao – 10 % (1 575)
3 150	Ak (23 000)	Ao – 10 % (1 980)

Tab. 2: Maximální ztráty pod zatížením a při chodu naprázdno (W) v případě třířá-
zových středních výkonových transformátorů suchého typu s jedním vinutím o $U_m \leq$
24 kV a druhým vinutím o $U_m \leq 3,6$ kV[6]

Stupeň 2 (od 1. července 2021)		
Jmenovitý výkon	Maximální ztráty pod zatížením P_k	Maximální ztráty při chodu naprázdno P_0
(kVA)	(W)	(W)
≤ 50	Ak (1 500)	Ao – 10 % (180)
100	Ak (1 800)	Ao – 10 % (252)
160	Ak (2 600)	Ao – 10 % (360)
250	Ak (3 400)	Ao – 10 % (468)
400	Ak (4 500)	Ao – 10 % (675)
630	Ak (7 100)	Ao – 10 % (990)
800	Ak (8 000)	Ao – 10 % (1 170)
1 000	Ak (9 000)	Ao – 10 % (1 395)
1 250	Ak (11 000)	Ao – 10 % (1 620)
1 600	Ak (13 000)	Ao – 10 % (1 980)
2 000	Ak (16 000)	Ao – 10 % (2 340)
2 500	Ak (19 000)	Ao – 10 % (2 790)
3 150	Ak (22 000)	Ao – 10 % (3 420)

TS1

UF 3054 + UF 3048

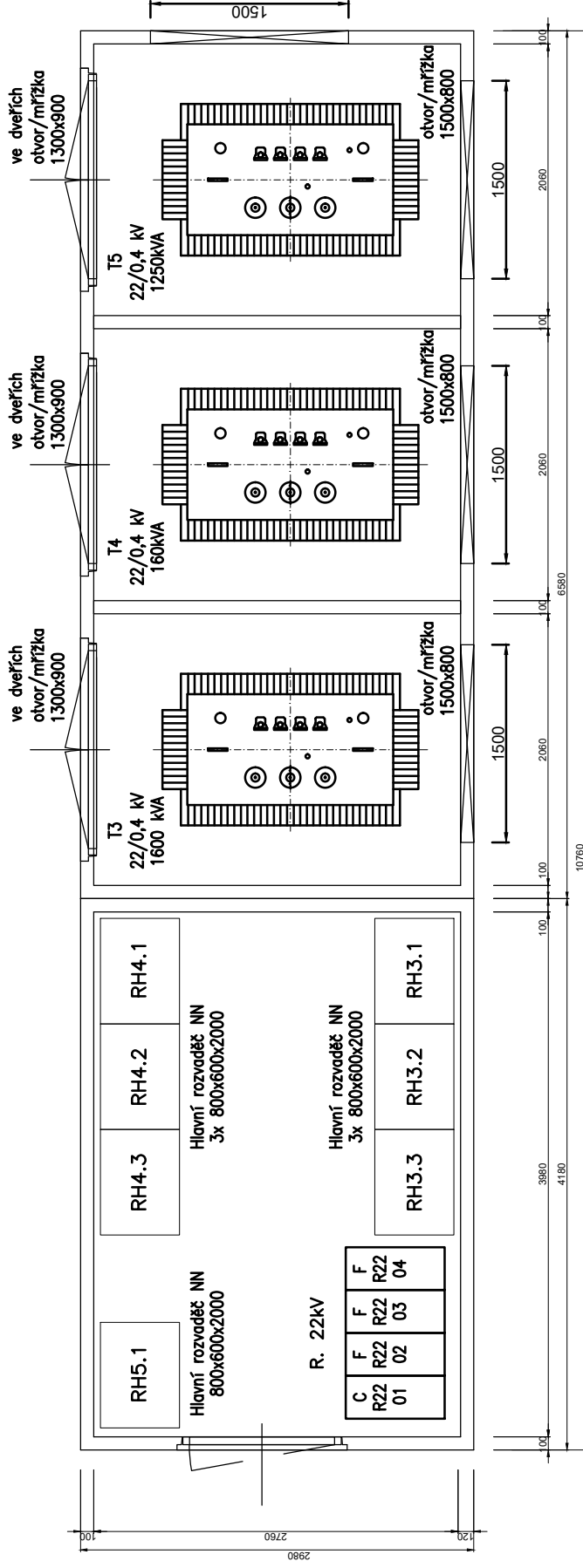


TS1 – DISPOZIČNÍ USPOŘÁDÁNÍ

M 1:50

TS2

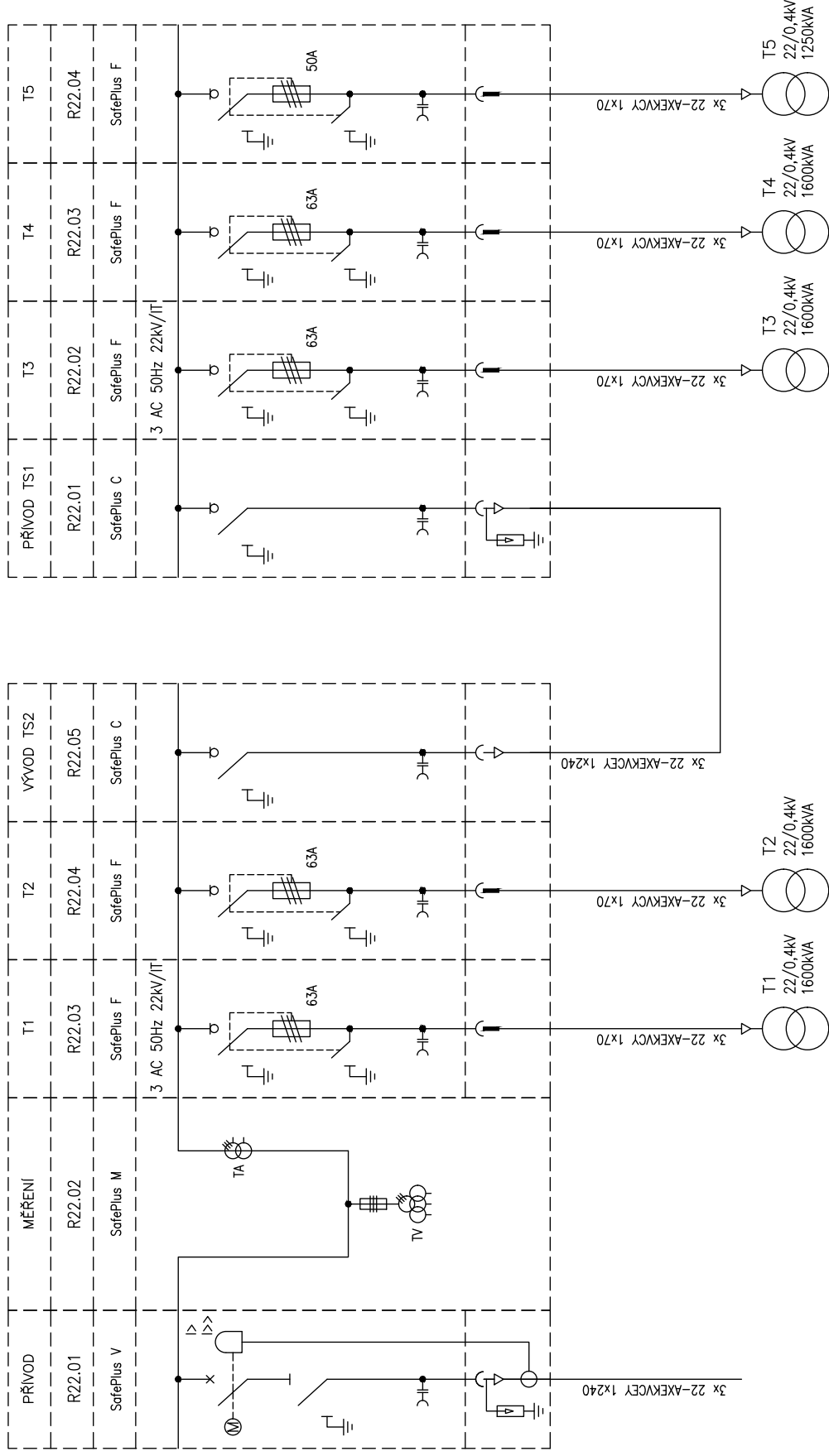
UF 3042 + UF 3066



TS2 – DISPOZIČNÍ USPOŘADÁNÍ

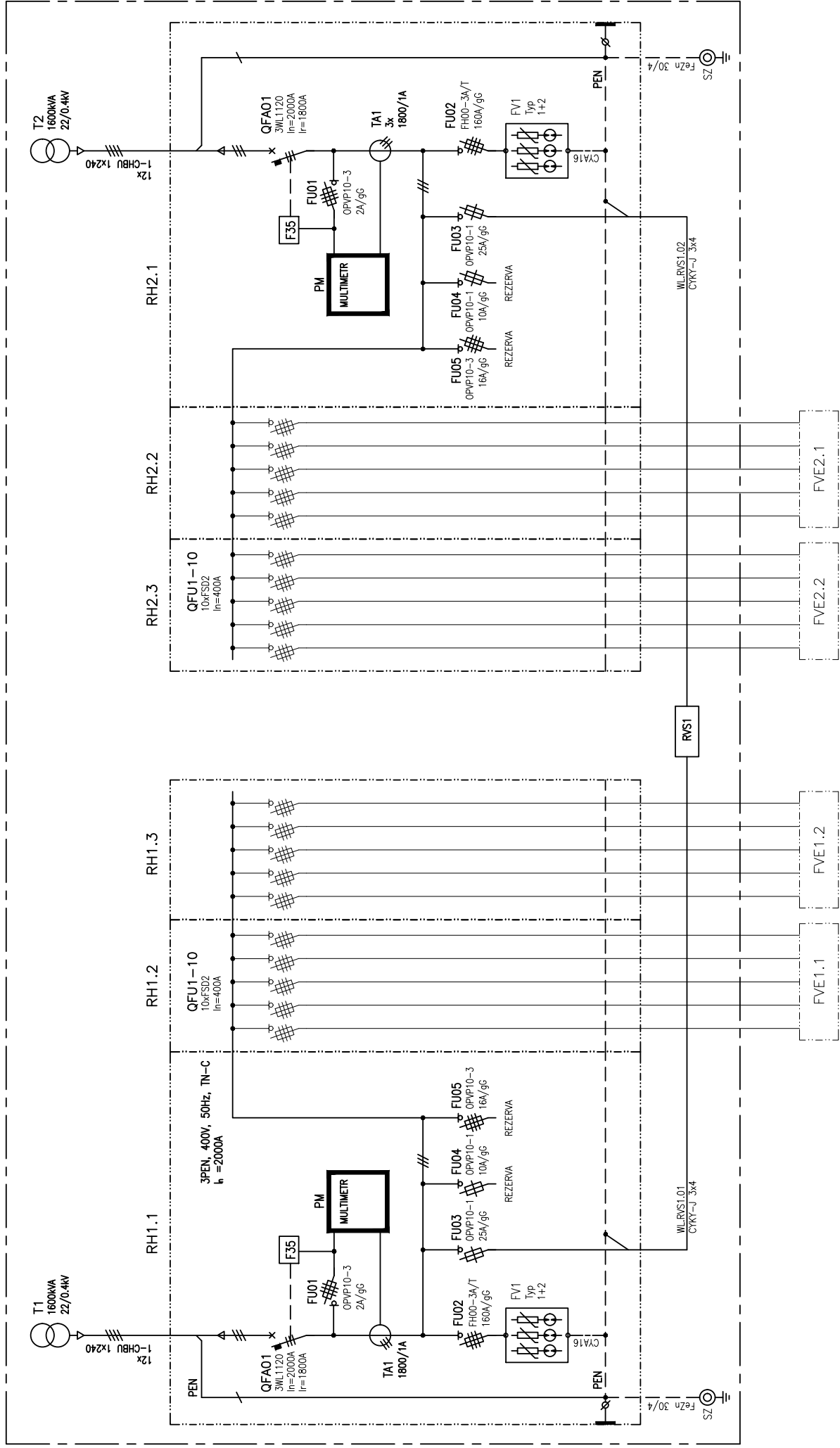
M 1:50

JEDNOPÓLOVÉ SCHEMA VN



JEDNOPÓLOVÉ SCHÉMA ROZVADĚČŮ NN V TS1

TS1



JEDNOPÓLOVÉ SCHÉMA ROZVADĚČŮ NN V TS2

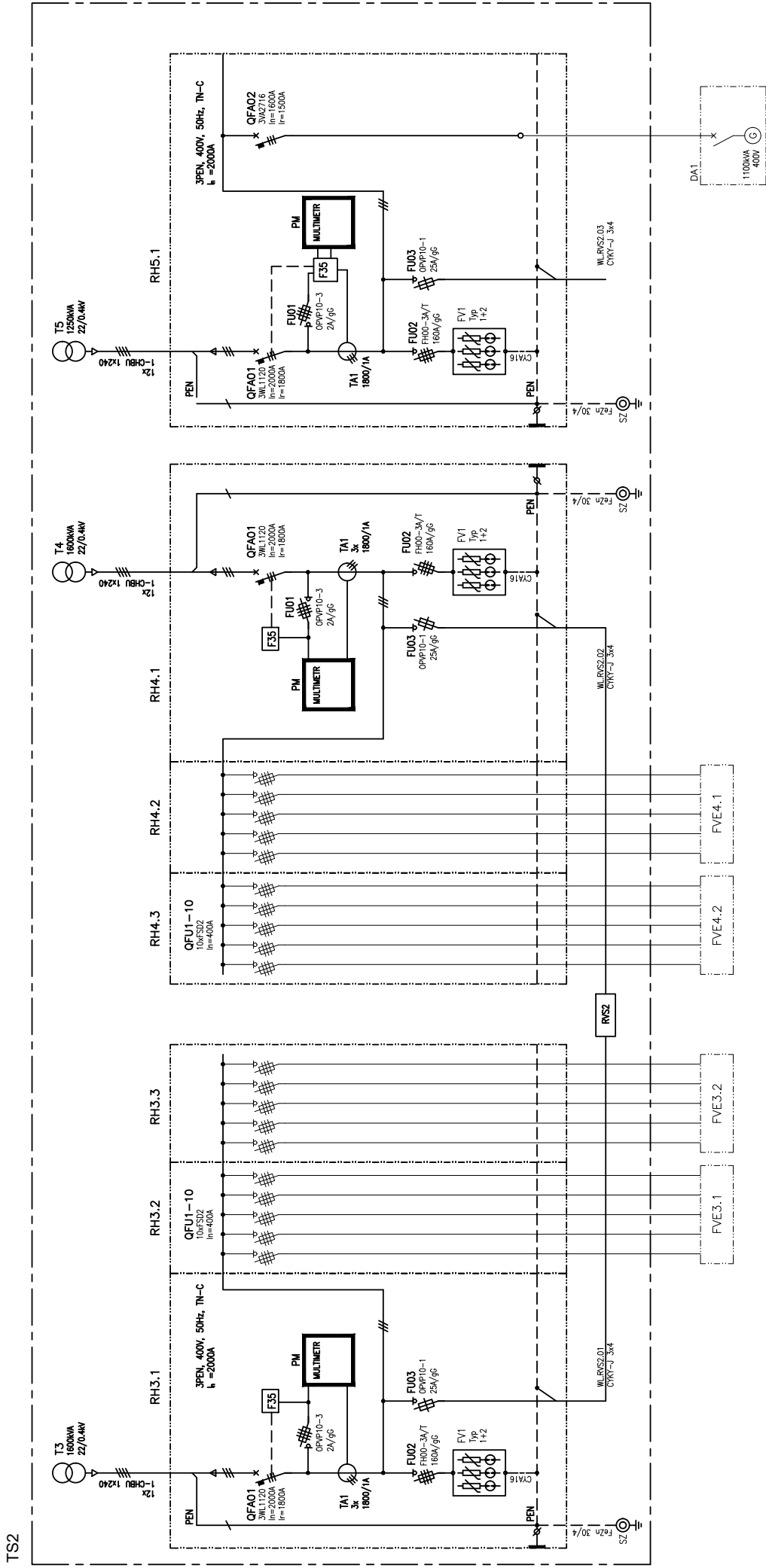


SCHÉMA DISPEČERSKÉHO ŘÍZENÍ A MĚŘENÍ

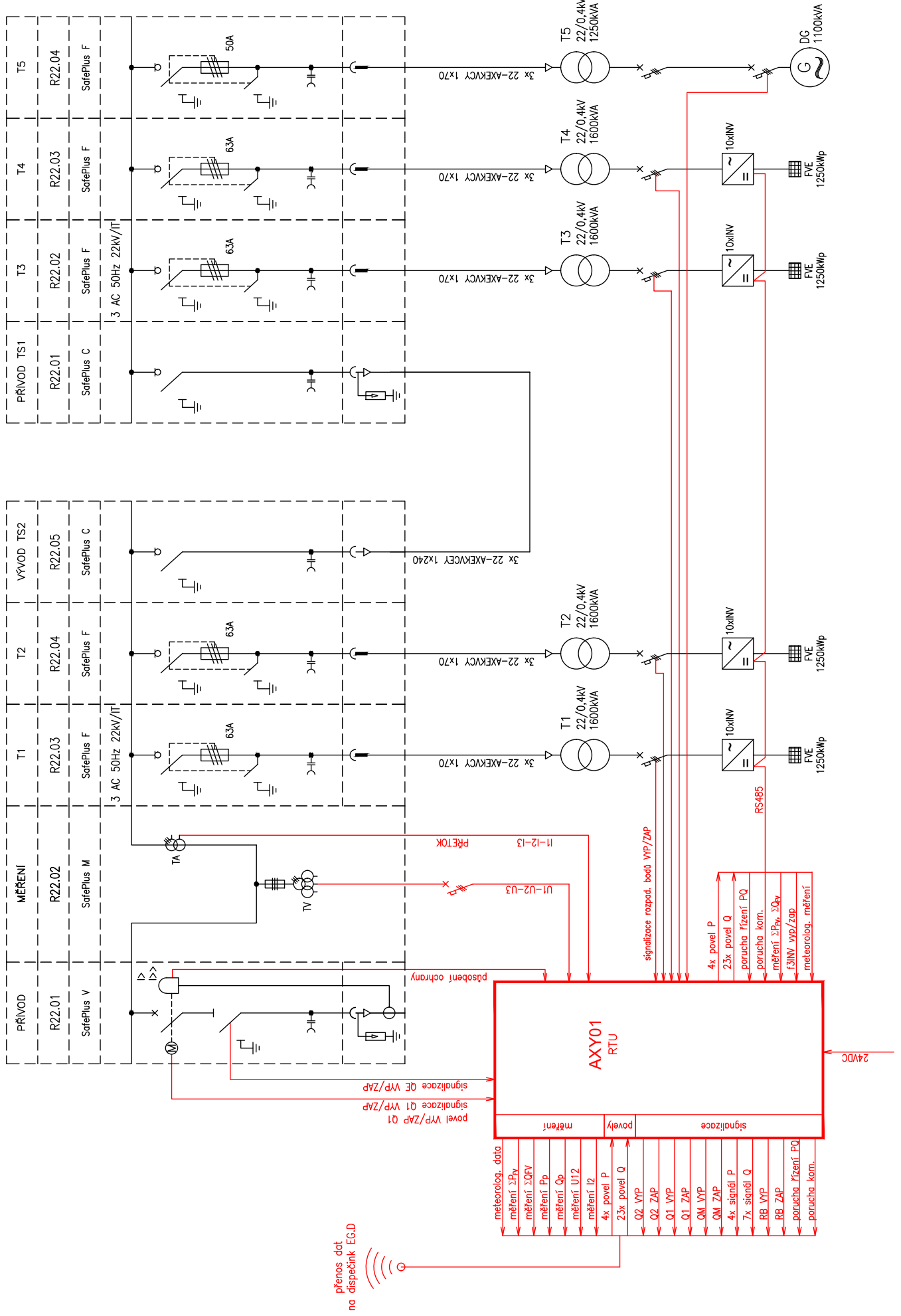
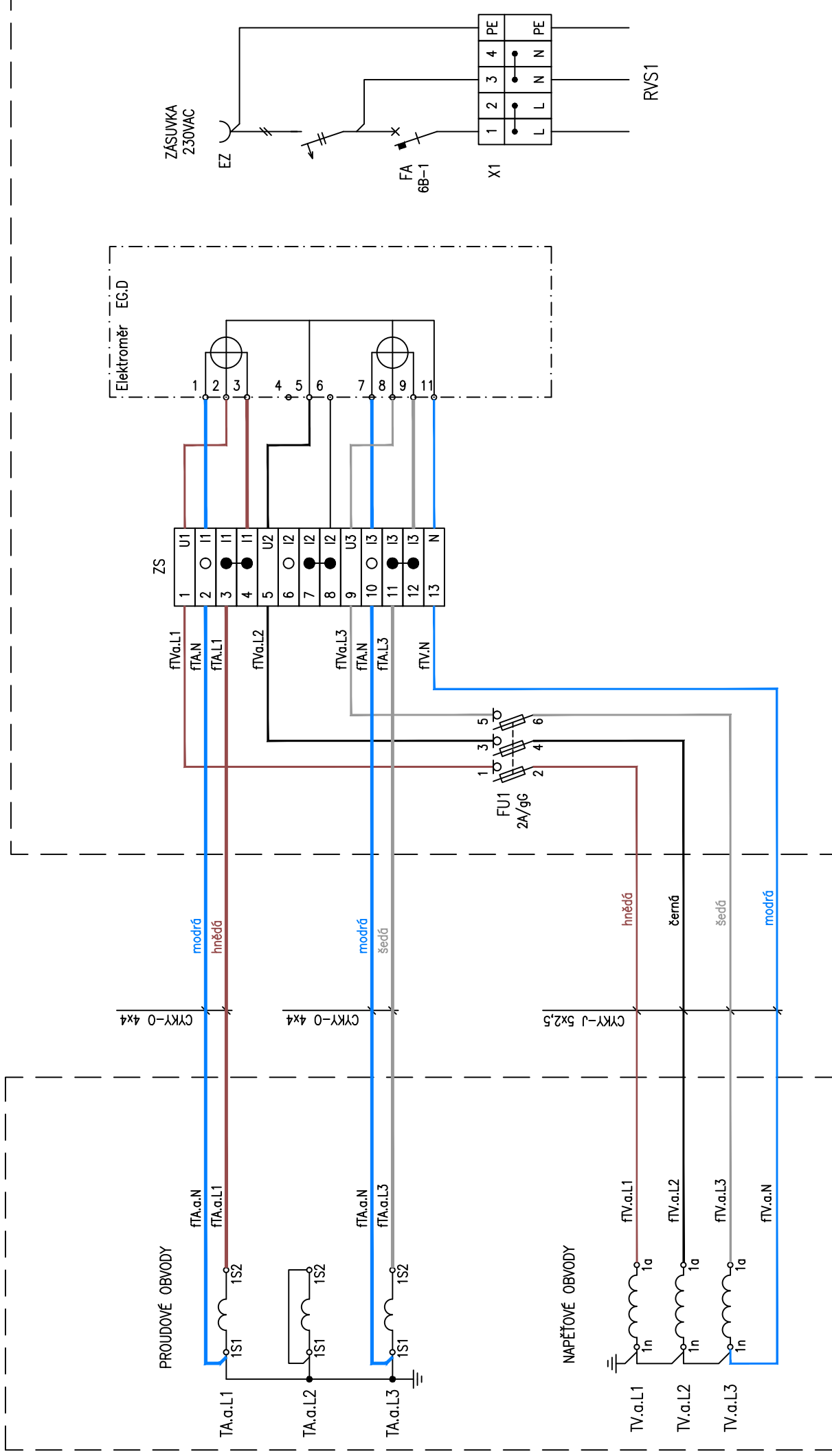


SCHÉMA ZAPOJENÍ OBCHODNÍHO MĚŘENÍ

R22.02 v TS1

RE – SKŘÍŇ OBCHODNÍHO MĚŘENÍ



Seznam příloh

- Tab. 1: Maximální ztráty pod zatížením a při chodu naprázdno transformátorů olejových
- Tab. 2: Maximální ztráty pod zatížením a při chodu naprázdno transformátorů suchých
- Dispozice TS1
- Dispozice TS2
- Jednólové schéma VN
- Jednólové schéma NN v TS1
- Jednólové schéma NN v TS2
- Schéma dispečerského řízení a měření
- Schéma obchodního měření