

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI

Fakulta elektrotechnická
Katedra elektromechaniky a výkonové elektroniky

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

Problematika spolupráce trakčních napájecích stanic 25 kV / 50 Hz
a třífázové elektrizační soustavy

Autor práce: **Kamil Janoch**
Vedoucí práce: **Doc. Ing. Martin Pittermann, Ph.D.**

2022

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI

Fakulta elektrotechnická
Akademický rok: 2021/2022

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE (projektu, uměleckého díla, uměleckého výkonu)

Jméno a příjmení: **Kamil JANOCH**
Osobní číslo: **E19B0136P**
Studijní program: **B2612 Elektrotechnika a informatika**
Studijní obor: **Elektrotechnika a energetika**
Téma práce: **Problematika spolupráce trakčních napájecích stanic 25 kV / 50 Hz a třífázové elektrizační soustavy**
Zadávající katedra: **Katedra výkonové elektroniky a strojů**

Zásady pro vypracování

Popište reálné aspekty spolupráce trakčních napájecích stanic TNS 25 kV / 50 Hz s třífázovou elektrizační soustavou. Práce bude obsahovat tyto body:

1. Popis stávajícího řešení TNS, který bude zohledňovat typické provedení TNS v ČR (zde zohledněte zejména aspekty polohy TNS a připojení k elektrizační soustavě, aspekty příslušného traťového úseku a jejího provozního zatížení, uspořádání TNS).
2. Popište aspekty spolupráce TNS z pohledu distributora el.energie.
3. Popište požadavky na TNS z hlediska provozovatele infrastruktury drážní dopravy (Správa Železnic).
4. Proveďte analýzu a vyhodnocení problematiky spolupráce TNS s elektrizační soustavou.
5. Uveďte přibližný výhled řešení těchto problémů s výhledem do blízké budoucnosti.

Rozsah bakalářské práce: **30 – 40**
Rozsah grafických prací: **dle doporučení vedoucího**
Forma zpracování bakalářské práce: **elektronická**


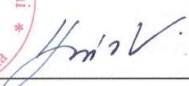
Seznam doporučené literatury:

- [1] BULÍN Martin: Ochrany pro trakční napájecí stanice pro systém 25 kV, 50 Hz, BP ZČU Plzeň 2019.
- [2] MASAŘ Patrik: Rekuperace u trakčních napájecích stanic pro systém 25 kV, 50 Hz, BP ZČU Plzeň 2019.
- [3] MÍKA Matěj: Symetrizace a kompenzace odběru trakčních napájecích stanic pro systém 25kV, 50Hz, BP ZČU Plzeň 2019.

Vedoucí bakalářské práce: **Doc. Ing. Martin Pittermann, Ph.D.**
Katedra výkonové elektroniky a strojů

Datum zadání bakalářské práce: **8. října 2021**
Termín odevzdání bakalářské práce: **26. května 2022**


Prof. Ing. Zdeněk Peroutka, Ph.D.
děkan



Prof. Ing. Václav Kús, CSc.
vedoucí katedry

V Plzni dne 8. října 2021

Abstrakt

Předkládaná bakalářská práce se zaměřuje na problematiku spolupráce trakčních napájecích stanic a distribuční soustavy zejména z pohledu jejího nesymetrického zatížení právě distribuční soustavy. V první části se práce věnuje trakčním napájecím soustavám v České republice a distribuční soustavě. V druhé části je popsáno několik jednotlivých částí trakčních napájecích stanic. Ve třetí a čtvrté části se práce na danou problematiku zaměřuje jak z pohledu provozovatele, tak i z pohledu distributora elektrické energie. V páté části se práce zabývá výpočty nesymetrií. A v šesté části jsou pak popsány možná výhledová řešení, která se již jinde ve světě uplatňují, ale do České republiky si tato řešení v takové míře, jako jsou v provozu v jiných zemích, cestu ještě nenašla.

Klíčová slova

Železnice, elektrická trakční napájecí soustava, nesymetrie, trakční napájecí stanice, Správa železnic, měnič frekvence

Abstract

Presented bachelor thesis focuses on the issue of cooperation between railway power substations and distribution network that is powering it. Main topic is the issue of unsymmetrical loads connected to the distribution network in the context of railway power substations. In the first part, this thesis deals with railway power networks and their history as well as the distribution network. In the second part there are descriptions of the main parts of railway power substations. Third and fourth part focuses on the issue from the perspective of user of the railway power substations and electrical energy distributor. Fifth part contains numerical examples of the most currently used connections of transformers in railway power substations in the Czech Republic. Sixth section represents possible future in railway network powering through converters and other semiconductor technologies.

Key Words

Railway, electrical railway network, unsymmetrical loads, railway power substations, Správa železnic, frequency converter

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem tuto bakalářskou práci vypracoval samostatně, s použitím odborné literatury a odborných pramenů uvedených v seznamu, který je součástí této bakalářské práce.

Dále prohlašuji, že software použitý pro vypracování této bakalářské práce je legální.

Kamil Janoch

V Nepomuku dne 25. května 2022

Poděkování

Velice děkuji vedoucímu bakalářské práce doc. Ing. Martinu Pittermannovi, Ph. D. za jeho cenné a profesionální rady a připomínky a za příkladné a metodické vedení práce.

Obsah

Úvod.....	- 1 -
1 Historie a použití trakčních napájecích soustav a distribuční soustava.....	- 2 -
1.1 Historie a použití trakčních napájecích soustav	- 2 -
1.2 Rozdělení trakčních napájecích soustav v České republice	- 3 -
1.3 Jednotlivé součásti trakční soustavy 25 kV / 50 Hz.....	- 4 -
1.3.1 Trakční napájecí stanice.....	- 4 -
1.3.2 Spínací stanice	- 5 -
1.3.3 Trakční vedení a zpětné vedení	- 5 -
1.4 Charakteristika distribuční soustavy	- 5 -
2 Uspořádání trakční napájecí stanice pro systém 25 kV / 50 Hz	- 7 -
2.1 Nesymetrie	- 7 -
2.2 Trakční transformátor.....	- 8 -
2.3 Symetrizační zapojení transformátorů	- 8 -
2.3.1 Zapojení do „V“	- 8 -
2.3.2 Zapojení do „T“	- 9 -
2.3.3 Použití obou zapojení v ČR	- 10 -
2.3.4 Scottovo zapojení transformátorů.....	- 10 -
2.4 Statický VAR kompenzátor (SVC)	- 11 -
2.5 Filtračně kompenzační zařízení (FKZ)	- 12 -
3 Požadavky na TNS ze strany provozovatele Správy železnic.....	- 15 -
3.1 Oboustranné napájení.....	- 15 -
3.1.1 Výstavba nového vedení	- 15 -
3.1.2 SFC	- 15 -
3.2 Rekuperace.....	- 16 -
3.3 Různí provozovatelé distribuční soustavy.....	- 16 -
4 Aspekty spolupráce TNS s distribuční soustavou	- 17 -
4.1 Charakteristické hodnoty napětí pro systém 25 kV / 50 Hz.....	- 17 -
4.2 Frekvence	- 17 -
4.3 Účinník.....	- 17 -

4.4	Proudy	- 18 -
4.5	Požadavky ze strany distributora.....	- 18 -
4.5.1	Frekvence a napětí	- 18 -
4.5.2	Rychlé změny napětí.....	- 18 -
4.5.3	Nesymetrie napětí a účinník	- 18 -
4.5.4	Harmonická napětí.....	- 19 -
5	Analýza a vyhodnocení problematiky spolupráce TNS s distribuční soustavou. -	20 -
5.1	Odvození pro „T“ zapojení	- 20 -
5.2	Odvození pro „V“ zapojení	- 24 -
5.3	Výpočet nesymetrií pro konkrétní případy.....	- 26 -
5.3.1	„T“ zapojení	- 26 -
5.3.2	„V“ zapojení	- 28 -
6	Možná řešení s výhledem do budoucna.....	- 29 -
6.1	Aktivní balancér	- 29 -
6.1.1	Steinmetzův obvod	- 30 -
6.1.2	Sitras RAB plus	- 30 -
6.2	Statický synchronní kompenzátor	- 32 -
6.2.1	SVC light	- 33 -
6.3	Měničové napájecí stanice	- 35 -
6.3.1	SFC a jeho princip	- 35 -
6.3.2	RPC a jeho princip.....	- 37 -
6.3.3	Použití měničových napájecích stanic	- 38 -
	Závěr	- 39 -
7	Seznam obrázků.....	- 40 -
8	Literatura	- 41 -
	Přílohy.....	I
	Příloha A1 Železniční síť České republiky.....	I
	Příloha A2 Komplexní zapojení TNS, poskytnuto vedoucím práce.....	II

Seznam hlavních symbolů a zkratek

Značka	Popisek	Jednotka
f	frekvence	(Hz)
FKZ	Filtračně kompenzační zařízení	
I	Proud	(A)
$I_{(1)}$	Postupná složka proudu	(A)
$I_{(2)}$	Zpětná složka proudu	(A)
$IGBT$	Insulated gate bipolar tranzistor	
MHD	Městská hromadná doprava	
NN	Nízké napětí	
PWM	Pulse width modulation (pulzně šířková modulace)	
Q	Jalový výkon	(VAr)
RPC	Rail power conditioner	
S	Zdánlivý výkon	(VA)
S_k	Zkratový výkon	(VA)
SFC	Static frequency convertor	
SpS	Spínací stanice	
$STATCOM$	Statický synchronní kompenzátor	
SVC	Statický Var kompenzátor	
TCR	Thyristor-controlled reactor (tyristorově řízená tlumivka)	
TNS	Trakční napájecí stanice	
TSC	Thyristor-switched condensator (tyristorově spínaný kondenzátor)	
TSR	Thyristor-switched reactor (tyristorově spínaná tlumivka)	
TT	Trakční transformovna	
U	Napětí	(V)
$U_{(1)}$	Postupná složka napětí	(V)
$U_{(2)}$	Zpětná složka napětí	(V)
VN	Vysoké napětí	
VVN	Velmi vysoké napětí	
ρ_i	Činitel proudové nesymetrie	(-)
ρ_u	Činitel napěťové nesymetrie	(-)

Úvod

Předkládaná práce se zaměřuje formou rešerše na problematiku trakčních napájecích stanic trakční napájecí soustavy 25 kV / 50 Hz a jejich spolupráci s distribuční sítí. Tato trakční napájecí soustava patří mezi nejvíce využívané trakční soustavy na světě. Oproti jiným soustavám má svoje výhody, kdy alespoň část z nich je v práci zmíněna. Samozřejmě má tato soustava i své nevýhody. Je jí hlavně nesymetrické zatížení třífázové soustavy provozem stávajících zapojení transformátorů v trakčních napájecích stanicích, kterým se tato práce také věnuje. Dalším problémem je pak nesinusový odběr u starších lokomotiv a nutnost filtrace vyšších harmonických a kompenzace účinníku. Zejména v této době se hlavně již zmíněná nesymetrie začíná řešit stále více, a to má za následek vývoj a využití nových technologií v oblasti elektrické trakce. V této práci jsou tak popsány nejen stručné historické milníky, současný stav trakčních napájecích stanic s jejich částmi, ale také spolupráce s distribuční soustavou a hlavně pak právě nové technologie zejména realizované polovodičovými měniči. Ty jsou již používány v různých částech světa, nicméně do elektrické trakce v České republice si ještě cestu ve velké míře nenašly.

1 Historie a použití trakčních napájecích soustav a distribuční soustava

1.1 Historie a použití trakčních napájecích soustav

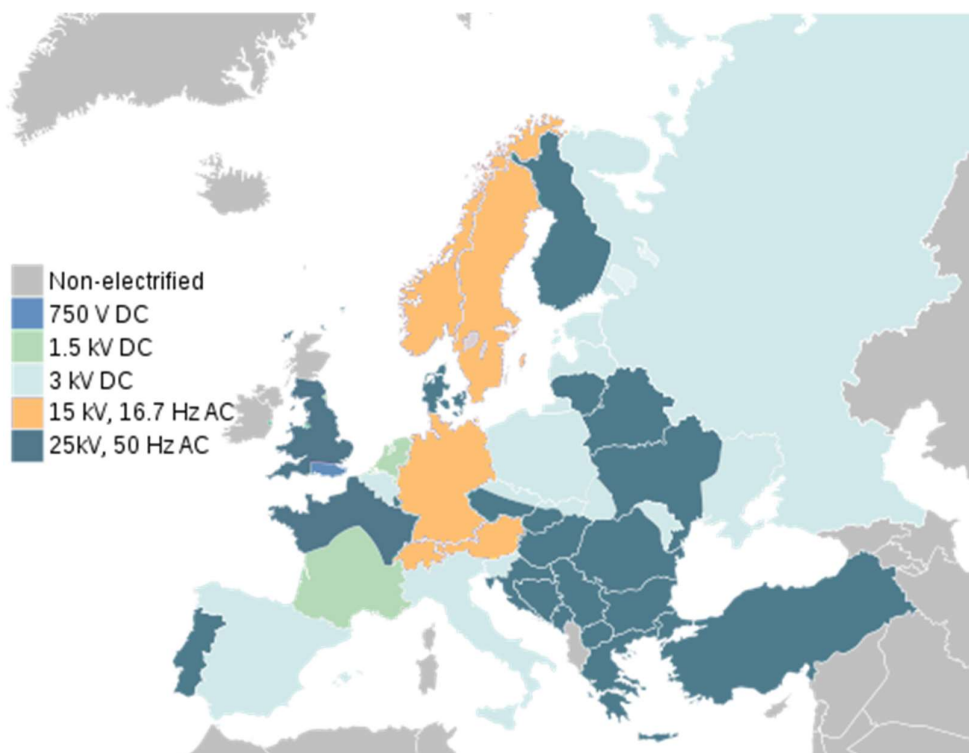
Počátek elektrizace železnice se datuje až do 19. století, kdy Werner von Siemens navrhl systém, u kterého lokomotiva získávala elektrickou energii z trakčního vedení. Tato trakční napájecí soustava byla stejnosměrná, a ačkoliv má oproti střídavé trakční soustavě určité nevýhody, udržela se ve službě až dodnes, přestože už probíhají snahy o její postupný útlum ve prospěch právě střídavé trakční soustavy. [4]

S touto trakční soustavou se také začalo experimentovat již na konci 19. století, ale až zlepšení parametrů polovodičových výkonových součástí v druhé polovině 20. století umožnilo její rozmach. [4]

V Evropě se můžeme setkat s následujícími trakčními napájecími soustavami:

- Do 1 kV DC (napájení MHD, např. Plzeň používá 600 V)
- 1,5 kV DC (např. jih Francie, Nizozemsko, v ČR je takto elektrifikována trať z Tábora do Bechyně)
- 3 kV DC (např. Belgie, Polsko, v ČR je takto elektrifikována zejména severní část republiky)
- 15 kV / 16,7 Hz (např. Německo, Rakousko, v ČR je takto elektrifikována trať ze Znojma do rakouského města Retz)
- 25 kV / 50 Hz (např. sever Francie, Maďarsko, v ČR je takto elektrifikována zejména jižní část republiky)

[4] [9]



Obrázek 1 Mapa rozdělení trakčních napájecích soustav v Evropě, převzato z [4]

1.2 Rozdělení trakčních napájecích soustav v České republice

Jak již bylo zmíněno v předchozí kapitole, naše republika je rozdělena na severní a jižní část, kdy v severní části se nachází trakční napájecí soustava 3 kV DC a v jižní naopak 25 kV / 50 Hz (jsou zde ale i výjimky v použití dalších soustav, viz kapitola 1.1). Toto rozdělení je historicky dáno právě rozmachem střídavé trakční soustavy až od 50. let 20. století. Soustavou 3 kV DC se začala elektrifikovat trať z Děčína přes Prahu, Českou Třebovou, Olomouc, Ostravu, Žilinu do Košic. Elektrifikace započala uzlem Praha. [4]

Na konci 50. let 20. století došlo k rozhodnutí, zavést v tehdejším Československu střídavou trakční soustavu. Vzhledem k již probíhající elektrifikaci výše zmíněné trati z Děčína do Košic, padlo rozhodnutí elektrifikovat soustavou 25 kV / 50 Hz právě jižní část našeho území. Díky tomuto rozhodnutí zůstává i dnes Česká, ale i Slovenská republika rozdělena na části s různými trakčními napájecími soustavami. V současné době se začíná pracovat na přepnutí z trakční napájecí soustavy 3 kV DC na 25 kV / 50 Hz a postupném útlumu stejnosměrné napájecí soustavy. Prvním úsek se nachází na trati 330 a jedná se o úsek Nedakonice – Říkovice.

Rozdělení trakčních napájecích soustav je v příloze A1 (Příloha A1 Železniční síť České republiky). Kde zeleně je trakční stejnosměrná soustava 3 kV, tučně světle modře

stejnosemnná trakční soustava 1,5 kV, červeně střídavá trakční soustava 25 kV / 50 Hz a žlutě střídavá trakční soustava 15 kV / 16,7 Hz. [1] [4] [25]

Toto rozhodnutí je motivováno celostátní koncepcí přechodu na jednotnou trakční soustavu. Přestože střídavá trakční soustava má také své nevýhody, jednou z nich je nutnost instalace transformátoru do trakčních vozidel, čímž roste jejich hmotnost a cena. Další z jejich nevýhod je nesouměrné zatížení distribuční sítě, kterému se bude tato práce věnovat později, má ale také oproti stejnosměrné trakční soustavě určité stěžejní výhody:

- Větší vzdálenosti mezi jednotlivými trakčními napájecími stanicemi (TNS)
- Menší proudové namáhání při stejném výkonu a s tím související nižší ztráty
- Použití menších průřezů trakčního vedení

Další výhodou TNS oproti trakčním měničům (obdobu trakčních transformoven pro napájení stejnosměrné trakční soustavy) je absence usměrňovače, neboť dochází pouze k transformaci napětí na 25 kV a frekvence zůstává 50 Hz, tedy je stejná jako v distribuční síti. Díky tomu jsou TNS jednodušší. [6]

1.3 Jednotlivé součásti trakční soustavy 25 kV / 50 Hz

Jak již vyplývá z názvu tato práce se bude věnovat zejména trakční napájecí soustavě 25 kV / 50 Hz. Tato soustava se skládá z trakčních napájecích stanic (TNS) takzvaně trakčních transformoven (TT), spínacích stanic (SpS) a dále také z trakčního vedení a vedení pro zpětné proudy

1.3.1 Trakční napájecí stanice

Jedná se o stanice, ve kterých probíhá transformace napětí a následně napájení trakční soustavy. Jádrem TNS jsou trakční transformátory. V ČR je napájení TNS realizováno z distribuční sítě na hladině VVN 110 kV, zatímco v jiných zemích může být TNS napájena z jiných hladin.

Dalšími částmi těchto stanic jsou rozvodna vysokého napětí, rozvodna trakčního napětí, zařízení vlastní spotřeby a kompenzační zařízení, jako je například filtračně kompenzační zařízení (FKZ). Těmito částmi se bude práce zabývat v následujících kapitolách. [3][5]

1.3.2 Spínací stanice

Tyto stanice jsou zřizovány za účelem zvýšení propustnosti tratí, zvýšení výkonosti pevných elektrických trakčních zařízení a zvýšení spolehlivosti napájení úseků elektrizovaných tratí při mimořádnostech vyžadující propojení sousedních úseků. Dělí se na vícevypínačové a jednovypínačové.

Vícevypínačové slouží na dvojkolejných tratích k propojení obou úseků oddělených za normálního stavu spínací stanicí. Takto se děje v případě přerušení napájení z jedné TNS. Dále také umožňují jednostranné napájení z přilehlé TNS a dvoustranné napájení v případě paralelní spolupráce přilehlých TNS.

Jednovypínačové stanice umožňují příčné propojení obou stop trakčního vedení, nebo podélné propojení jedné stopy děleného vedení. Ve druhém případě musí stanice znemožnit propojení sousedních TNS. [5][8]

1.3.3 Trakční vedení a zpětné vedení

Trakční vedení je určeno k rozvodu elektrické energie k drážním trakčním vozidlům. Na železnici se využívá tzv. řetězovkové vedení, kdy trolejový vodič tvoří řetězovku a její výška je pak nastavena pomocí laníček zavěšených na laně nosném. Trolejové vodiče se nejčastěji vyrábí z čisté mědi, nebo mědi s příměsí stříbra, nebo kadmia. Po zvážení předpokládaného proudového zatížení je pak určen průřez vodiče, který se nejčastěji pohybuje mezi 50 a 150 mm². [2]

Zpětné vedení je používáno k vedení trakčního proudu zpět k napájecí stanici. Toto se provádí skrze kolejnice a zpětné kabely. [2]

1.4 Charakteristika distribuční soustavy

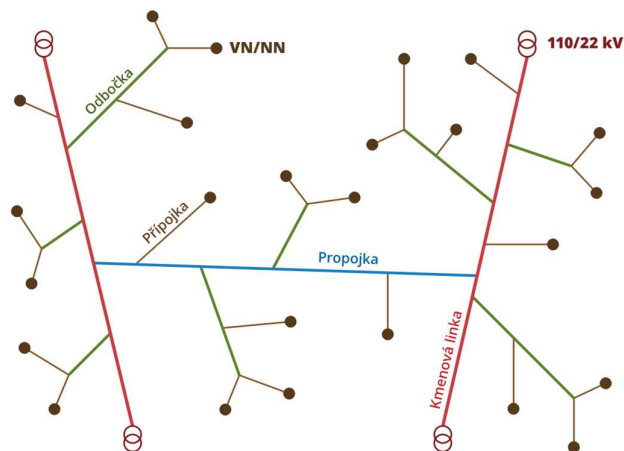
Distribuční soustava je spojnice mezi přenosovou soustavou (400, 220 a výjimečně i 110 kV) a koncovým zákazníkem. V distribuční soustavě ČR se používají následující hladiny napětí:

- VVN (110 kV)
- VN (3, 6, 10, 22, 35 kV)
- NN (400/230 V)

Vedení na hladině 110 kV je většinou venkovního typu, kdy lana všech tří fází jsou zavěšena na stožárech a k nim je přidáno zemnicí lano, které chrání fázové vodiče před úderem blesků a je umístěné úplně na špičku stožárů. Jsou zde samozřejmě i výjimky a

můžeme se setkat i s kabelizovanými úseky, ale vzhledem k vysoké ceně se k tomuto kroku přistupuje zřídka. Vzhledem k okružnímu uspořádání je zásobování elektrickou energií stabilní. Zejména tato hladina je používána k napájení TNS.

U vedení na hladině VN se již setkáme s daleko vyšší mírou kabelizace než u VVN. Vedení na těchto hladinách je uspořádáno paprskově s propojkami mezi sítěmi, které jsou v provozu v případě výpadku jednoho vedení nebo jeho revize. V případě venkovního vedení se již nepoužívají zemní lana.[14]



Obrázek 2 Schéma uspořádání na hladinách VN, převzato z [14]

Vedení na hladině NN je ve velké míře kabelizováno. V současné době je velkým trendem kabelizovat venkovní vedení, a to zejména v zastavěných oblastech. Toto vedení slouží k připojení koncových zákazníků zejména domácností a maloodběratelů, zatímco velkoodběratelé jsou připojeni zejména na VN. [14]

2 Uspořádání trakční napájecí stanice pro systém 25 kV / 50 Hz

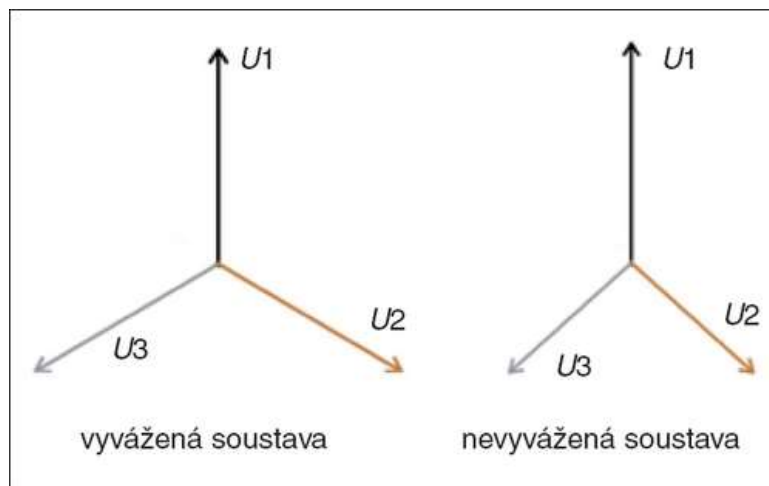
2.1 Nesymetrie

Nesymetrické zatížení vzniká při jednofázovém zatížení a narušuje tak rovnováhu třífázové sítě. V každé fázi naměříme jiné proudy. Toto se nazývá proudová nesymetrie a tyto různé proudy jsou příčinou různých úbytků napětí, což se nazývá napěťová nesymetrie. To může mít za následek až nevyužití přenosové kapacity třífázové soustavy, neboť u některých fází se díky tepelným účinkům proudu dostaneme až na teplotní limit vodiče, zatímco tam kde je proud nižší, tomu tak nebude. To, že jsou maximálně využity pouze určité fáze, znamená také menší přenesený výkon oproti standardnímu stavu, kdy je třífázová soustava v rovnováze. [13]

Například asynchronní motory reagují negativně na nesymetrii vytvořením zpětného napětí, které vyvolá ve vzduchové mezeře tok otáčející se na druhou stranu, než je otáčení stroje. To vede k větším proudům ve vinutí a tím pádem k většímu oteplení stroje a také ke snížení výstupního momentu. [13]

Velké nesymetrické zatížení způsobují například jednofázové pece a také právě TNS. [5][13]

V dalších kapitolách budou popsána zapojení transformátorů v rámci TNS, která se používají k odstranění nesymetrického odběru. A v kapitole 5 se pak tato práce bude věnovat nesymetrii z hlediska výpočtů.



Obrázek 3 Porovnání fázového diagramu symetricky a nesymetricky zatížené soustavy, převzato z [10]

2.2 Trakční transformátor

Pomocí trakčních transformátorů se realizuje transformace napětí ze 110 kV na 27 kV (transformace se realizuje na 27 kV místo 25 kV, kvůli úbytkům na vedení, aby se napětí v celém napájeném úseku udrželo v požadovaných mezích). Nejnovější typy trakčních transformátorů se vyrábí v plzeňském ETD a jedná se o transformátor s možností regulace napětí $110 \pm 8.2\%/27$ kV se jmenovitým výkonem 12,5 MVA. Můžeme se ale setkat i se staršími typy s trvalým výkonem 6,5 MVA a 10 MVA. Všechny tyto transformátory jsou olejového typu a pracují s frekvencí sítě v ČR, která činí 50 Hz. [3][8]

2.3 Symetrizační zapojení transformátorů

2.3.1 Zapojení do „V“

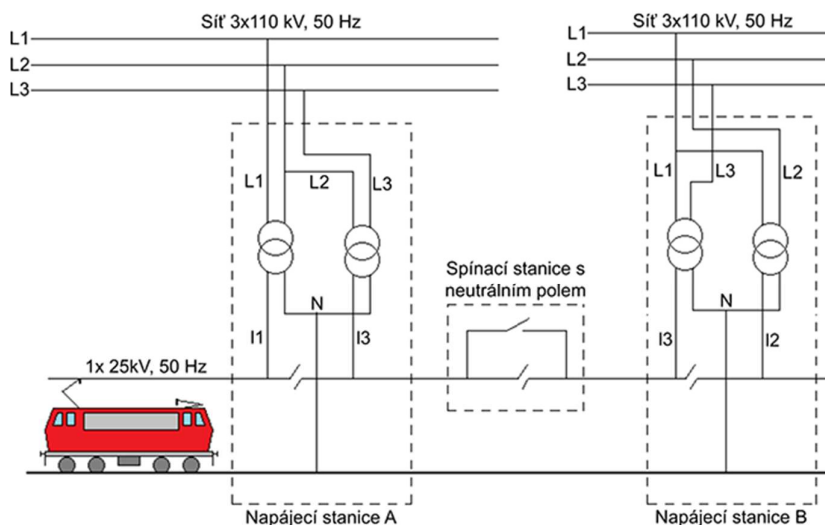
Ve snaze o symetrizaci odběru z distribuční soustavy jsou součástí TNS obvykle dva transformátory, každý připojený na jiné sdružené napětí. Toto zapojení se jmenuje zapojení do „V“, nebo zapojení do otevřeného trojúhelníka, neboť se u tohoto zapojení objevují dva fázory napětí, zatímco třetí, který by tyto dva spojil do trojúhelníka, chybí. Každý transformátor pak napájí svůj příslušný úsek trati.

Tyto úseky jsou odděleny neutrálním polem, protože je každý úsek napájen z jiného sdruženého napětí s jiným fázovým posuvem. Kvůli tomu nelze projet pod neutrálním polem se zvednutým sběračem a je nutné jej stáhnout a po projetí úseku opět zvednout, aby se zamezilo mezifázovému zkratu.

Toto je samozřejmě nežádoucí, neboť trakční elektrické vozidlo jede chvilkově bez napájení. Dalším problémem je pouze částečná symetrizace, protože oba úseky jsou ve velké míře nerovnoměrně zatíženy. Nejlepší varianta by nastala až v případě stejného zatížení obou napájených úseků, kdy by se stále objevovala nesymetrie, ale byla by na své nejnižší hodnotě.

Neutrální pole se nenachází jen u TNS, ale také na předělu napájení mezi sousedními TNS, kde se nachází spínací stanice (SpS). Důvod je oddělení dvou sdružených napětí z různých TNS, neboť sousední dvě TNS mohou být na jiném potenciálu na straně distribuční soustavy. Je třeba také stáhnout sběrač.

Zapojení do „V“ v případě výpadku jedné TNS může být napájeno ze sousedních TNS sepnutím ve spínací stanici (neutrální pole u spínací stanice bude překlenuto, ale u TNS neutrální pole bude v činnosti stále). [2] [3]



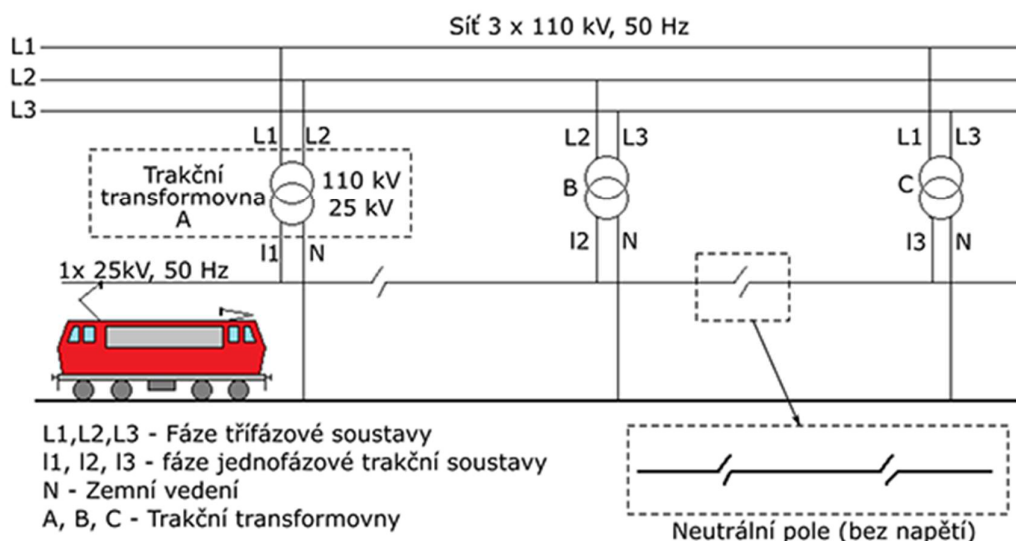
Obrázek 4 Schéma zapojení transformátorů do „V“, převzato z [2]

Obrázek 4 není úplně správně podle aktuálních zapojení v provozu, protože úsek rozdělený spínací stanicí by měl být napájen sdruženým napětím vytvořených ze stejných fází z obou přilehlých trakčních napájecích stanic. Tedy napájecí stanice B na obrázku 4 by měla napájet úsek nalevo od ní sdruženým napětím U_{L23} , nikoli U_{L13} . Úsek napravo napájený z napájecí stanice B by měl být napájený sdruženým napětím U_{L31} , aby v další stanici byly úseky napájené ze sdružených napětí U_{L31} pro levý úsek a U_{L12} pro úsek pravý.

2.3.2 Zapojení do „T“

U zapojení do „T“ je jeden úsek napájen z jednoho sdruženého napětí, a tedy je potřeba jeden transformátor, odpadá tak nutnost neutrálního pole u TNS. Stále se ale neutrální pole užívá, a to pro případ výpadku TNS, kdy je třeba daný úsek rozdělit a každou část tohoto úseku napájet z jiné TNS jiným sdruženým napětím. Mezi sousedními napájecími stanicemi se neutrální pole také objeví.

Je nutno vzít ale v potaz větší nesymetrii systému. Symetrizovat takto zapojené TNS lze pouze zapojením sousedních TNS na různá sdružená napětí. Spínací stanice se u tohoto zapojení také objevují. [2] [3]



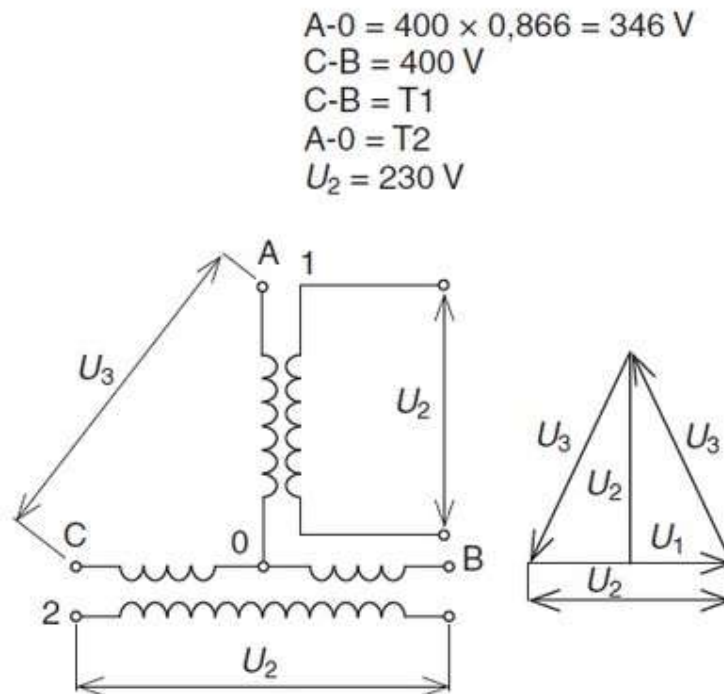
Obrázek 5 Schéma zapojení transformátorů do „T“, převzato z [2]

2.3.3 Použití obou zapojení v ČR

Zapojení do „V“ se používá častěji oproti zapojení do „T“, které se využívá jen na koncových úsecích tratí nebo na málo využívaných úsecích. Posledně zmíněné zapojení by potřebovalo ještě jeden záložní transformátor kvůli zálohování, aby se mohlo použít na více frekventovaných úsecích tratí. [2] [3]

2.3.4 Scottovo zapojení transformátorů

Scottovo zapojení získalo své jméno po americkém inženýrovi Charlesi Feltonu Scottovi. V tomto zapojení se vyskytují dva jednofázové transformátory hlavní a pomocný, jejichž spojením se vytvoří symetrický trojúhelník. Scottovo zapojení převádí trojfázovou soustavu na dvoufázovou a tu pak lze použít na napájení sousedních traťových úseků. I u tohoto zapojení se setkáme s neutrálními poli, protože výsledná napětí jsou vůči sobě posunuta o úhel 90°. Proudová nesymetrie se pohybuje od 0 až do 100 % a to pro symetrický odběr na obou stranách stanice (0 %) až po pouze jeden vývod zatížený (100 %). [5][7]



Obrázek 6 Schéma Scottova zapojení, převzato z [7]

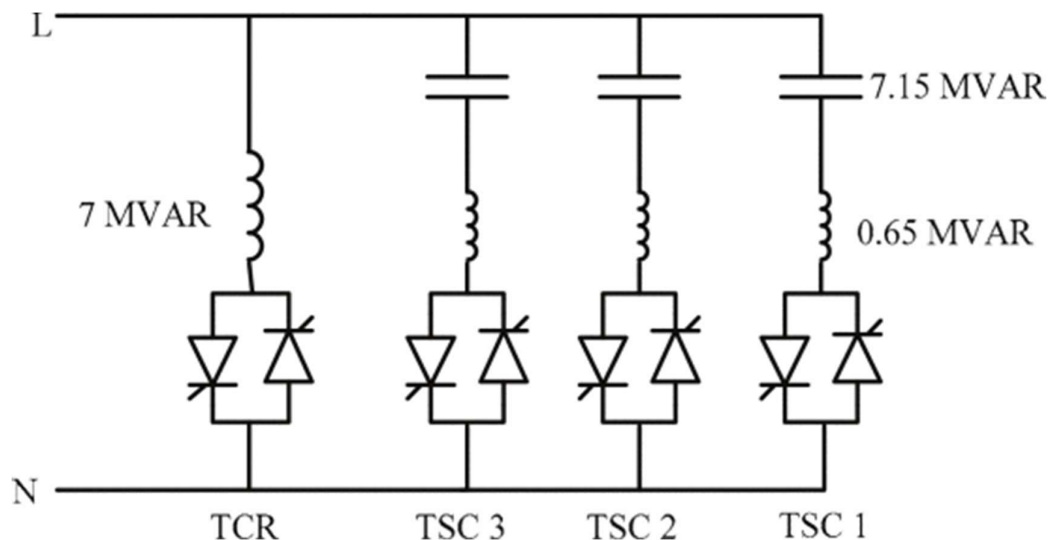
2.4 Statický VAR kompenzátor (SVC)

Statický Var kompenzátor je zařízení, které mění jalový výkon spínáním indukčností a kapacit a tím pádem umožňuje kompenzovat účinník a také filtrovat harmonické. Kapacity a indukčnosti jsou spínány pomocí tyristorů. SVC se používají jako náhrada synchronních rotačních kompenzátorů. [5]

Rozlišujeme několik typů větví, ve kterých se objevují indukčnosti, kapacity nebo jejich kombinace.

První z nich je TCR tedy thyristor-controlled reactor, což znamená thyristorově řízená tlumivka. Další je TSR tedy thyristor-switched reactor, což můžeme přeložit jako thyristorově spínaná tlumivka. Rozdíl mezi těmito dvěma typy je absence vyšších harmonických pro typ TSR. [5][12]

Třetím typem je pak TSC tedy thyristor-switched condensator, thyristorově spínaný kondenzátor. Tyristory zde slouží pouze k připojení kondenzátoru a jeho parametry pak určují proud a frekvenci. [5][12]



Obrázek 7 Schéma zapojení SVC, převzato z [12]

Z obrázku výše je patrné, že dané zapojení SVC se skládá z jedné větve TCR a ze tří větví TSC. Do větví TSC je zapojena tlumivka, která má však menší impedanci při napájecí frekvenci 50 Hz než kondenzátor. Tato tlumivka pak snižuje strmost nárůstu proudu při připojení či odpojení větve a také pokud jsou parametry její a kondenzátoru správně nastaveny, dojde k filtraci vyšších harmonických. [12]

Abych uvedl příklad, tak konkrétní zapojení SVC na obrázku 7 umí měnit jalový výkon od 7 MVar induktivního charakteru až do 19,5 MVar kapacitního charakteru (v každé větvi vychází celkový jalový výkon 6,5 MVar kvůli přidané tlumivce). [12]

2.5 Filtračně kompenzační zařízení (FKZ)

Jak již samotný název napovídá, FKZ umožňuje filtraci vyšších harmonických a kompenzaci účinníku. Jedná se o nejpoužívanější zařízení typu SVC v ČR a klasicky je již umístěno v rámci TNS.

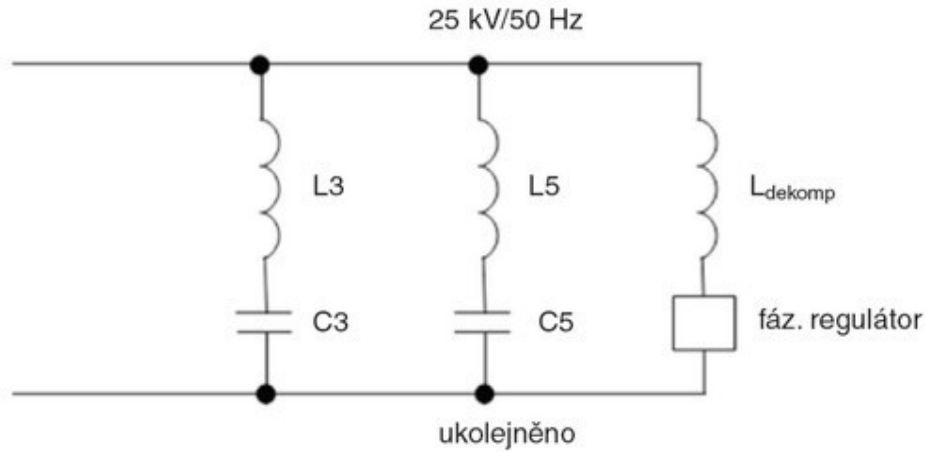
Starší lokomotivy jsou tvořeny trakčními transformátory a, které mají induktivní charakter a díky tomu se proud zpožďuje za napětím. Dále také tyristorovými usměrňovači, které také zhoršují účinník. Aktuální účinník se také mění v závislosti na zařazené odbočce vozidla na primární straně transformátoru. Díky těmto jevům se účinník základní harmonické u starších lokomotiv pohybuje okolo 0,8, což je opět nevhodné a musí se kompenzovat, aby se dosáhlo účinníku alespoň 0,95, nejlépe však až 1. [3]

Moderní lokomotivy jsou však vybaveny krom motorů a transformátorů ještě pulzními usměrňovači, které umožňují odběr proudu s malým posunem za napětím a tento proud je téměř harmonický, tedy s minimálním zastoupením vyšších harmonických. Starší lokomotivy odebírají nesinusový proud, ve kterém jsou mimo 1. harmonické složky také složky 3. a 5. harmonické. Tyto dvě harmonické sice nejsou zastoupeny v takové velikosti jako 1. harmonická, ale stále mají negativní účinky na distribuční síť, a proto musejí být filtrovány.

Výše zmíněné problémy jsou řešeny umístěním filtračně kompenzačního zařízení v rámci TNS. Filtrační část obsahuje neřízené LC filtry naladěné přibližně na frekvence 3. a 5. harmonické. Zde je také prostorová rezerva pro LC filtr naladěný na 7. harmonickou, toto však v ČR v současné době nebývá využito. Tyto LC filtry se skládají z indukčností a kapacit.

Kapacity těchto filtrů se také využívají ke kompenzaci horšího účinníku (tedy pod 0,95) s induktivním charakterem. Toto však může vyústit až v překompenzování do kapacitního účinníku v případě malého, nebo žádného zatížení trakční soustavy 25 kV / 50 Hz. Aby se tomuto zabránilo je součástí FKZ také dekompenzační jednotka.

A právě dekompenzační jednotka skládající se z indukčnosti a tyristorového měniče (jedná se tedy o tyristorově řízenou tlumivku TCR) je důvodem zařazení FKZ mezi SVC. Princip dekompenzační jednotky tkví v nárůstu proudu skrze dekompenzační tlumivku v případě zjištění účinníku kapacitního charakteru, tím pádem je pak zajištěna dekompenzace do účinníku 0,95 až 1 induktivního charakteru. [3][5][8]



Obrázek 8 Principální schéma Filtračně kompenzačního zařízení, převzato z [3]

Komplexní zapojení TNS, kde je názorně ukázána většina výše popisovaných zařízení a zapojení je k nalezení v Příloze A2 (Příloha A2 Komplexní zapojení TNS, poskytnuto vedoucím práce).

3 Požadavky na TNS ze strany provozovatele Správy železnic

Požadavky na trakční napájecí stanice se řeší v normě ČSN 33 3505 ed. 2, kde se nachází informace ohledně ochrany jak na straně trakční napájecí soustavy, tak na straně distribuční soustavy. Dále se také zabývá uzemněním, filtračně kompenzačním zařízením, měřením na TNS, uložením kabelů a také „V“ a „T“ zapojením, která byla popsána v druhé kapitole. Nicméně v této normě nalezneme i věci týkající se trakčních měřících spínacích stanic a všeobecných požadavků na pevná trakční zařízení. [19]

Dále se práce bude věnovat provozním požadavkům jako je rekuperace či oboustranné napájení.

3.1 Oboustranné napájení

Prvním požadavkem je zavedení oboustranného napájení a s tím související odstranění neutrálních polí. Odstraněním neutrálních polí by se zamezilo přerušení napájení trakčních vozidel a jednotek. Dále by se oboustranným napájením docílilo snížení úbytků na vedení a zlepšení možností rekuperace. Musel by se ovšem vyřešit problém týkající se různého fázového posunu při napájení ze dvou TNS. Tyto TNS jsou v současné době napájeny většinou z různých linek vedení, díky tomu zde vzniká onen fázový posuv u napětí.

3.1.1 Výstavba nového vedení

Problém by mohla vyřešit výstavba jedné linky podél určitého traťového úseku a z této linky by byly napájeny jednotlivé TNS. Nicméně se jedná o velkou investici, kterou by bylo třeba důkladně technicky i ekonomicky zhodnotit. A právě onen ekonomický faktor může být hlavním problémem neuskutečněné realizace tohoto řešení. [8]

3.1.2 SFC

Dalším řešením by byla instalace zařízení zvaného SFC (static frequency converter). Jedná se o nepřímý frekvenční měnič se stejnosměrným napětíovým meziobvodem. Tento měnič bychom mohli připojit na trojfázovou soustavu a v případě že by se určitý úsek trati napájel přes tyto měniče na více TNS, odpadla by neutrální pole jak u spínacích stanic, tak i u TNS, což znamená kontinuální napájení trakčních vozidel bez přerušení. O tomto zařízení bude dále psáno v kapitole 6.

3.2 Rekuperace

Druhým požadavkem ze strany provozovatele je možnost rekuperace energie vyrobené elektrickými hnacími vozidly při brždění do distribuční soustavy přes TNS.

Problémem, co se rekuperace týče, je opět ekonomický faktor. Jde o situaci, kdy cena jedné kWh odebrané je větší než jedné kWh dodané, nebo za vrácenou energii provozovatel TNS nic nedostane. Technicky je rekuperace proveditelná, protože aktuální zařízení (zejména trakční transformátory) jsou uzpůsobeny k toku výkonů směrem z trakční soustavy 25 kV / 50 Hz do distribuční soustavy, ale motivace k povolení rekuperace ze soustavy 25 kV / 50 Hz již není velká, a to z důvodu možného zvětšování nesymetrie v distribuční soustavě a také kvůli výše zmíněnému ekonomickému faktoru, kdy se Správě železnic nevyplatí rekuperovat kvůli nízkým výkupním cenám. [6]

3.3 Různí provozovatelé distribuční soustavy

V ČR máme dva velké provozovatele distribuční soustavy. Společnost ČEZ distribuce pokrývá většinu území ČR kromě jižních Čech a jižní Moravy, kde funguje společnost E.ON.

Co se dvojstranného napájení týče, vyžadovala by výše zmíněná řešení domluvu obou společností. Došlo by k tomu zejména u tratí, které přecházejí z distribuční soustavy spravované jednou společností do té druhé. Zároveň by tato řešení vyžadovala od obou zmíněných společností nemalou finanční podporu. [6]

Rekuperace je ve velké části železniční sítě elektrifikované soustavou 25 kV / 50 Hz technicky proveditelná. Problémem jsou však důvody zmíněné v kapitole 3.2. V rámci TNS jsou navíc ještě instalovány zpětné wattové ochrany, které danou TNS odpojí, pokud by se objevil tok výkonů směrem do distribuční soustavy. [6][19]

4 Aspekty spolupráce TNS s distribuční soustavou

4.1 Charakteristické hodnoty napětí pro systém 25 kV / 50 Hz

- Jmenovité napětí (kV) 25
- Nejnižší trvalé napětí (kV) 19
- Nejvyšší trvalé napětí (kV) 27,5
- Nejnižší krátkodobé napětí (kV) 17,5
- Nejvyšší krátkodobé napětí (kV) 29

Výše uvedené hodnoty mají však ještě další podmínky. Například doba, kdy je napětí mezi nejnižším trvalým a krátkodobým nesmí přesáhnout 2 minuty a podobně je tomu mezi nejvyšším trvalým a nejvyšším krátkodobým, kdy je tato doba ale 5 minut a mezi těmito hodnotami se napětí může pohybovat při rekuperačním brzdění, nebo pokud dochází k přepínání odboček pro regulaci napětí u mechanického přepínače odboček. [21]

4.2 Frekvence

Frekvence elektrické trakční soustavy 25 kV / 50 Hz je dána frekvencí na straně distribuční soustavy, kde je také 50 Hz. V České republice je požadavek na udržení frekvence mezi 47 Hz a 52 Hz neustále, tedy frekvence nesmí být mimo tento interval. Dalším kritériem je rozmezí 49,5 Hz až 50,5 Hz, které musí trakční soustava splňovat v 99,5 % doby v provozu. V jiných střídavých trakčních napájecích soustavách (ostrovní, nebo s jinými frekvencemi) se samozřejmě v tolerancích liší. [21]

Pro všechny případy však platí, že frekvence je měřena jako střední hodnota frekvence první harmonické v intervalu 10 sekund. [20]

4.3 Účinník

Účinník první harmonické by se měl pohybovat co nejbližší jedné, nicméně není tomu tak vždy, například u starších lokomotiv, a v tomto případě je potřeba využívat FKZ. Účinník první harmonické by se měl pohybovat nad 0,95 induktivního charakteru, avšak při rekuperační brzdě je možné nechat účinník poklesnout až do doby, kdy se napětí v síti dostane až pod nominální hodnotu.

Pak je žádoucí udržet účinník nad 0,95 induktivního charakteru. [20]

4.4 Proudý

V České republice jsou odebírané proudy vlakem také limitovány a pro soustavu 25 kV / 50 Hz je tento proud omezen na 800 A pro jedoucí vlak a pro stojící vlak je to maximálně 80 A. Jedná se o celkový proud odebíraný jedním vlakem. [20]

4.5 Požadavky ze strany distributora

Výše jsou zmíněné dovolené limity pro trakční soustavu 25 kV / 50 Hz, nyní se práce bude věnovat požadavkům ze strany distributora ČEZ distribuce na připojení na hladinu 110 kV.

4.5.1 Frekvence a napětí

Požadavky na frekvenci jsou stejné jako pro trakční soustavu 25 kV / 50 Hz a jsou popsány v kapitole 4.2.

Napětí se může pohybovat v rozmezí 99 kV až 121 kV, tedy tolerance je 10 % z jmenovité hodnoty 110 kV.[22]

4.5.2 Rychlé změny napětí

Tabulka 1 Možné změny napětí na hladině 110 kV v závislosti na četnosti změn, převzato z [22]

Četnost změn n	$\Delta U/U_N$ [%]	
	vn	vvn
$n \leq 4$ za den	5- 6	3 - 5
$n \leq 2$ za hodinu a > 4 za den	4	3
$2 < n \leq 10$ za hodinu	3	2,5

Tabulka 1 nám udává maximální možnou rychlou změnu napětí ΔU v porovnání se jmenovitou hodnotou napětí v závislosti na počtu rychlých změn za konkrétní časový úsek.

4.5.3 Nesymetrie napětí a účiník

Velkoodběratelé elektrické energie by měli odebírat účiník první harmonické v rozmezí od 0,95 induktivního charakteru až do 1. Za nedodržení tohoto intervalu jsou pak velkoodběratelům nastaveny pokuty, které musí zaplatit. [22]

Nesymetrie napětí v síti se určuje jako podíl zpětné ku sousledné točivé složce napětí a musí se pohybovat mezi 0 a 2 %. [22]

4.5.4 Harmonická napětí

Celkový činitel harmonického zkreslení (THD), který zahrnuje všechny vyšší harmonické až do 40. harmonické, musí být roven 8 %, nebo nižší. Řád 40. harmonické je pouze dohodnutý, harmonická analýza při skutečném měření se odvíjí od použitých měřicích transformátorů. [22]

5 Analýza a vyhodnocení problematiky spolupráce TNS s distribuční soustavou

V této kapitole se blíže podíváme na téma nesymetrií vznikající provozováním elektrifikovaných železnic napájených z TNS, kde je zapojení transformátorů do „T“ a „V“.

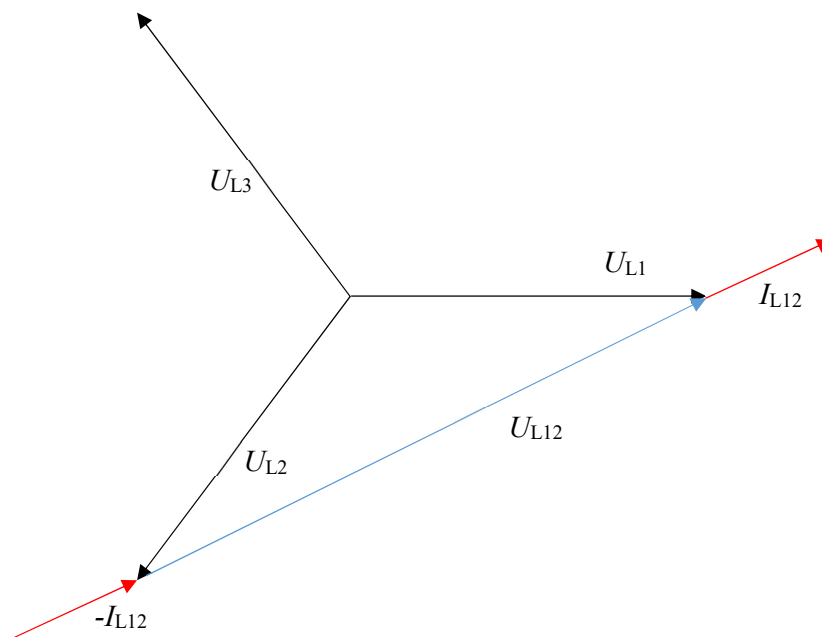
Nesymetrie soustavy se vyjadřuje pomocí součinitele proudové, respektive napěťové nesymetrie, který je vyjádřen jako poměr zpětné točivé složky ku sousledné točivé složce dané veličiny a udává se v procentech. [10]

$$\rho_i = \frac{|\bar{I}_{(2)}|}{|\bar{I}_{(1)}|} \cdot 100 (\%) \quad (5.1)$$

$$\rho_u = \frac{U_{(2)}}{U_{(1)}} \cdot 100 (\%) \quad (5.2)$$

Ve vztahu (5.1) je vyjádřen součinitel proudové nesymetrie a ve vztahu (5.2) je vyjádřen součinitel napěťové nesymetrie jako podíl efektivních hodnot napětí. Veličiny s indexem (2) jsou zpětné složky dané veličiny a veličiny s indexem (1) reprezentují souslednou složku. [23]

5.1 Odvození pro „T“ zapojení



Obrázek 9 Fázorový diagram pro „T“ zapojení

Pokud bychom si vzali nejprve „T“ zapojení, kdy transformátor je zapojen na sdružené napětí mezi fázemi L1 a L2 a teče přes něj proud I_{L12} , tak zjistíme následující:

$$\bar{I}_{L1} = \bar{I}_{L12} \quad \bar{I}_{L2} = -\bar{I}_{L12} \quad \bar{I}_{L3} = 0 \quad (5.3)$$

Vidíme tedy, že fáze L2 je zatížena stejným proudem jako L1, jen má tento proud opačný směr. Proud třetí fáze je pak nulový, neboť na něj není připojena žádná zátěž.

Vyjádríme-li si pro toto zapojení zpětnou a souslednou složku proudu, dostaneme následující tvar:

$$\bar{I}_{(1)} = \frac{1}{3} \cdot (\bar{I}_{L1} + \bar{a} \cdot \bar{I}_{L2} + \bar{a}^2 \cdot \bar{I}_{L3}) \quad (5.4)$$

$$\bar{I}_{(2)} = \frac{1}{3} \cdot (\bar{I}_{L1} + \bar{a}^2 \cdot \bar{I}_{L2} + \bar{a} \cdot \bar{I}_{L3}) \quad (5.5)$$

Ve výše zmíněných vzorcích se objevila proměnná \bar{a} . Tato proměnná se nazývá koeficient natočení a nabývá následujících hodnot:

$$\bar{a} = -\frac{1}{2} + j\frac{\sqrt{3}}{2} \quad (5.6)$$

$$\bar{a}^2 = -\frac{1}{2} - j\frac{\sqrt{3}}{2} \quad (5.7)$$

Dosadíme-li za tyto parametry do rovnic (5.4) a (5.5) a vyjádříme proudy jednotlivými fázemi proudem přes transformátor, dostaneme následující tvar:

$$\bar{I}_{(1)} = \frac{1}{3} \cdot \left[\bar{I}_{L12} + \left(-\frac{1}{2} + j\frac{\sqrt{3}}{2} \right) \cdot (-\bar{I}_{L12}) + \left(-\frac{1}{2} - j\frac{\sqrt{3}}{2} \right) \cdot 0 \right] \quad (5.8)$$

$$\bar{I}_{(2)} = \frac{1}{3} \cdot \left[\bar{I}_{L12} + \left(-\frac{1}{2} - j\frac{\sqrt{3}}{2} \right) \cdot (-\bar{I}_{L12}) + \left(-\frac{1}{2} + j\frac{\sqrt{3}}{2} \right) \cdot 0 \right] \quad (5.9)$$

Vytkneme-li proud \bar{I}_{L12} z rovnice (5.8) a (5.9) dostáváme:

$$\bar{I}_{(1)} = \frac{1}{3} \cdot \bar{I}_{L12} \cdot \left[1 - \frac{1}{2} + j\frac{\sqrt{3}}{2} \right] \quad (5.10)$$

$$\bar{I}_{(2)} = \frac{1}{3} \cdot \bar{I}_{L12} \cdot \left[1 - \frac{1}{2} - j\frac{\sqrt{3}}{2} \right] \quad (5.11)$$

Pokud však chceme vypočítat součinitel proudové nesymetrie, potřebujeme absolutní hodnoty proudů.

$$|\bar{I}_{(1)}| = \frac{1}{3} \cdot I_{L12} \cdot \left| 1 - \frac{1}{2} + j \frac{\sqrt{3}}{2} \right| = \frac{I_{L12}}{\sqrt{3}} \quad (5.12)$$

$$|\bar{I}_{(2)}| = \frac{1}{3} \cdot I_{L12} \cdot \left| 1 - \frac{1}{2} - j \frac{\sqrt{3}}{2} \right| = \frac{I_{L12}}{\sqrt{3}} \quad (5.13)$$

Ze vztahů (5.12) a (5.13) je patrné, že se sobě rovnají tudíž toto dosadíme do vzorce (5.1) a po rychlé úpravě dostaneme:

$$\rho_i = 1 \cdot 100 = 100 (\%) \quad (5.14)$$

Ze vztahu (5.14) vyplývá, že součinitel proudové nesymetrie je málo vypovídající, neboť je roven při jakémkoli zatížení 100 %. Zde se nám hodí právě vztah (5.2) pro součinitel napěťové nesymetrie.

Vyjádříme-li si zpětnou složku napětí jako součin proudu a impedance, dostaneme následující vztah:

$$\rho_u = \frac{U_{(2)}}{U_{(1)}} \cdot 100 = \frac{I_{(2)} \cdot Z_{(2)}}{U_{(1)}} \cdot 100 \quad (5.15)$$

Následně si tento výraz upravíme dosazením za zpětnou složku proudu ze vztahu (5.13). Nyní již nepočítáme s fázory, ale pouze s velikostmi, a proto se za všechny veličiny dosazují pouze jejich velikosti.

$$\rho_u = \frac{I_{L12} \cdot Z_{(2)}}{\sqrt{3} \cdot U_{(1)}} \cdot 100 \quad (5.16)$$

Následně rozšíříme zlomek:

$$\rho_u = \frac{I_{L12} \cdot Z_{(2)}}{\sqrt{3} \cdot U_{(1)}} \cdot \frac{\sqrt{3} \cdot U_{(1)}}{\sqrt{3} \cdot U_{(1)}} \cdot 100 \quad (5.17)$$

$$\rho_u = \frac{I_{L12} \cdot Z_{(2)} \cdot \sqrt{3} \cdot U_{(1)}}{3 \cdot U_{(1)}^2} \cdot 100 \quad (5.18)$$

Z veličin v čitateli zlomku ve vztahu (5.18) si vyjádříme jednofázový zdánlivý výkon:

$$S_1 = U_{L12} \cdot I_{L12} = \sqrt{3} \cdot U_{(1)} \cdot I_{L12} \quad (5.19)$$

$$\rho_u = \frac{S_1 \cdot Z_{(2)}}{3 \cdot U_{(1)}^2} \cdot 100 \quad (5.20)$$

Zkratový třífázový výkon v síti se vypočte jako:

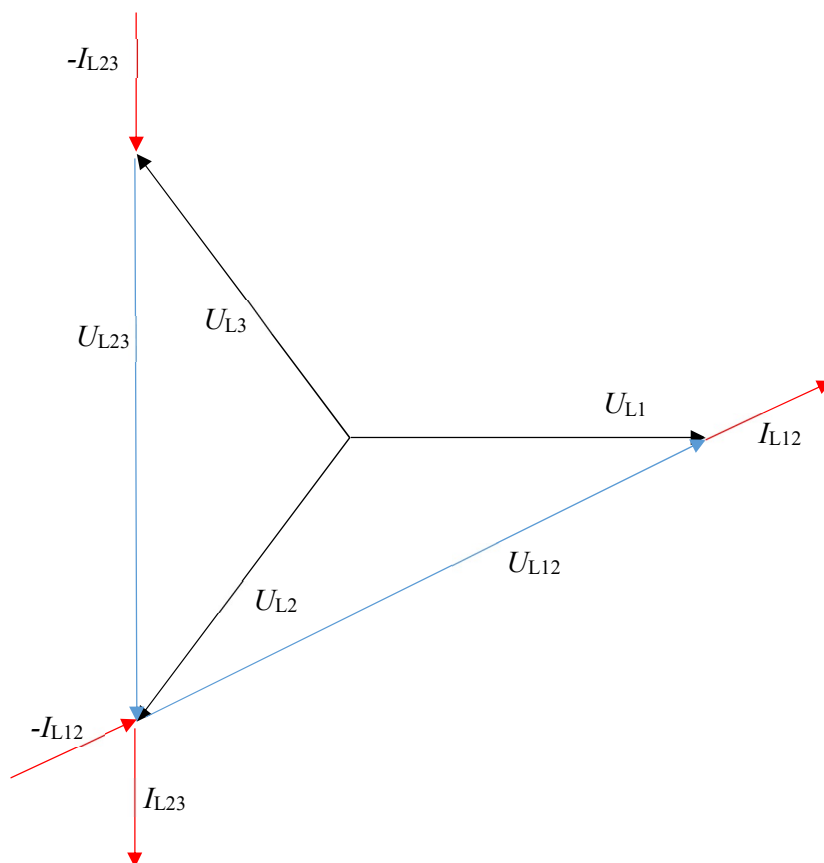
$$S_k'' = \sqrt{3} \cdot U_N \cdot I_k'' = \frac{\sqrt{3} \cdot U_N^2 \cdot c}{\sqrt{3} \cdot X_C} = \frac{(\sqrt{3} \cdot U_{(1)})^2 \cdot c}{Z_{(2)}} = \frac{3 \cdot U_{(1)}^2 \cdot 1}{Z_{(2)}} \quad (5.21)$$

Pokud bychom za reaktanci X_C vzali celkovou impedanci $Z_{(2)}$, jako sdružené napětí U_N bychom brali souslednou složku napětí $U_{(1)}$ vynásobenou odmocninou ze tří k získání právě sdružené hodnoty a napěťový součinitel c bychom položili roven 1, dostaneme po dosazení do vztahu (5.20) následující vztah:

$$\rho_u \cong \frac{S_1}{S_k''} \cdot 100 (\%) \quad (5.22)$$

Tento vztah je tedy pouze přibližný, nepřesnosti vznikají zjednodušeními, které byly popsány v odstavci výše. Avšak oproti součiniteli proudové nesymetrie se jedná o vztah, který má větší vypovídající hodnotu.

5.2 Odvození pro „V“ zapojení



Obrázek 10 Fázorový diagram pro „V“ zapojení

Pro „V“ zapojení je odvození činitele proudové nesymetrie o něco složitější, což je dáno hlavně tím, že na každou fázi je připojena zátěž. Vzorec pro výpočet činitele proudové nesymetrie je samozřejmě stejný a je k nalezení ve vztahu (5.1). Nicméně vyjádření jednotlivých fázových proudů je jiné na rozdíl od „T“ zapojení.

$$\bar{I}_{L1} = \bar{I}_{L12} \quad \bar{I}_{L2} = -\bar{I}_{L12} + \bar{I}_{L23} \quad \bar{I}_{L3} = -\bar{I}_{L23} \quad (5.23)$$

Vztahy pro zpětnou a souslednou složku jsou stejné jako v případě „T“ zapojení, nicméně další úpravy se budou odlišovat.

$$\bar{I}_{(1)} = \frac{1}{3}(\bar{I}_{L1} + \bar{a} \cdot \bar{I}_{L2} + \bar{a}^2 \cdot \bar{I}_{L3}) = \frac{1}{3}[\bar{I}_{L12} + \bar{a} \cdot (\bar{I}_{L23} - \bar{I}_{L12}) + \bar{a}^2 \cdot (-\bar{I}_{L23})] \quad (5.24)$$

$$\bar{I}_{(1)} = \frac{1}{3}(\bar{I}_{L12} + \bar{a} \cdot \bar{I}_{L23} - \bar{a} \cdot \bar{I}_{L12} - \bar{a}^2 \cdot \bar{I}_{L23}) \quad (5.25)$$

$$\bar{I}_{(1)} = \frac{1}{3} [\bar{I}_{L12} \cdot (1 - \bar{a}) + \bar{I}_{L23} \cdot (\bar{a} - \bar{a}^2)] \quad (5.26)$$

$$\bar{I}_{(1)} = \frac{1}{3} [\bar{I}_{L12} \cdot (1 - \bar{a}) + \bar{I}_{L23} \cdot \bar{a} \cdot (1 - \bar{a})] \quad (5.27)$$

$$\bar{I}_{(1)} = \frac{1}{3} \cdot (1 - \bar{a}) \cdot (\bar{I}_{L12} + \bar{I}_{L23} \cdot \bar{a}) \quad (5.28)$$

Takto vypadá sousledná složka proudu, v dalších vztazích budou rozebrány úpravy zpětné složky proudu.

$$\bar{I}_{(2)} = \frac{1}{3} (\bar{I}_{L1} + \bar{a}^2 \cdot \bar{I}_{L2} + \bar{a} \cdot \bar{I}_{L3}) = \frac{1}{3} [\bar{I}_{L12} + \bar{a}^2 \cdot (\bar{I}_{L23} - \bar{I}_{L12}) + \bar{a} \cdot (-\bar{I}_{L23})] \quad (5.29)$$

$$\bar{I}_{(2)} = \frac{1}{3} (\bar{I}_{L12} + \bar{a}^2 \cdot \bar{I}_{L23} - \bar{a}^2 \cdot \bar{I}_{L12} - \bar{a} \cdot \bar{I}_{L23}) \quad (5.30)$$

$$\bar{I}_{(2)} = \frac{1}{3} [\bar{I}_{L12} \cdot (1 - \bar{a}^2) + \bar{I}_{L23} \cdot (\bar{a}^2 - \bar{a})] \quad (5.31)$$

$$\bar{I}_{(2)} = \frac{1}{3} [\bar{I}_{L12} \cdot (1 - \bar{a}^2) + \bar{I}_{L23} \cdot \bar{a} \cdot (\bar{a} - 1)] \quad (5.32)$$

$$\bar{I}_{(2)} = \frac{1}{3} \cdot (1 - \bar{a}) \cdot [\bar{I}_{L12} \cdot (1 + \bar{a}) - \bar{I}_{L23} \cdot \bar{a}] \quad (5.33)$$

A takto vypadá zpětná složka proudu. Teď si upravené výrazy ve vztazích (5.28) a (5.33) dosadíme do vztahu (5.1) a budeme dále upravovat.

$$\rho_i = \frac{|\bar{I}_{(2)}|}{|\bar{I}_{(1)}|} \cdot 100 = \frac{\left| \frac{1}{3} \cdot (1 - \bar{a}) \cdot [\bar{I}_{L12} \cdot (1 + \bar{a}) - \bar{I}_{L23} \cdot \bar{a}] \right|}{\left| \frac{1}{3} \cdot (1 - \bar{a}) \cdot (\bar{I}_{L12} + \bar{I}_{L23} \cdot \bar{a}) \right|} \cdot 100 \quad (5.34)$$

Následně si z tohoto výrazu můžeme odstranit i zlomek $\frac{1}{3}$, protože se jedná o konstantní číslo, a to nám nebude ovlivňovat hodnotu výrazu v absolutní hodnotě.

$$\rho_i = \frac{|(1 - \bar{a}) \cdot [\bar{I}_{L12} \cdot (1 + \bar{a}) - \bar{I}_{L23} \cdot \bar{a}]|}{|(1 - \bar{a}) \cdot (\bar{I}_{L12} + \bar{I}_{L23} \cdot \bar{a})|} \cdot 100 \quad (5.35)$$

Vztah (5.35) se následně upraví do tvaru:

$$\rho_i = \sqrt{\frac{1 + k^2 - 2 \cdot k \cdot \cos(\delta + 60^\circ)}{1 + k^2 + 2 \cdot k \cdot \cos(\delta)}} \cdot 100 (\%) \quad (5.36)$$

Kde k je poměr výkonů v obou větvích „V“ zapojení a δ nám pak zobrazuje rozdíl mezi fázovými posuny (my ale počítáme, že oba proudy jsou ve fázi se svými sdruženými napětími, a proto budeme dosazovat za δ hodnotu 0).

5.3 Výpočet nesymetrií pro konkrétní případy

V této kapitole se budeme věnovat konkrétním případům, respektive konkrétním TNS a jak vypadají nesymetrie při různých hodnotách zatížení.

Nyní jsou v provozu TNS jak v konfiguraci do „V“, tak i do „T“. Tudíž se podíváme na pět příkladů TNS, jako kdyby měly transformátory zapojené jak do „T“, tak i do „V“, i když ve skutečnosti jsou provozovány jen v jednom zapojení.

5.3.1 „T“ zapojení

K výpočtu budou použity data ohledně pěti TNS, které se nacházejí ve Vranově, v Mýtě, v Nezvěsticích, v Zátíši a v Plané a všechny tyto TNS jsou připojeny na hladinu 110 kV. V následující tabulce budou zkratové výkony pro těchto pět TNS, které jsou potřeba k výpočtu činitele napěťové nesymetrie pro „T“ zapojení transformátorů.

Tabulka 2 Zkratové výkony konkrétních TNS

TNS	S''_{kmax} (MVA)	S''_{kmin} (MVA)
Mýto	1397,6	754,8
Nezvěstice	2153,5	706,3
Planá	1192,1	368
Vranov	1638,6	991,5
Zátíši	1794	1166,3

Minimální a maximální zkratové výkony závisí na aktuálním zapojení napájecí sítě, je však vidět, že u TNS Nezvěstice a TNS Planá je propad mezi maximální a minimální hodnotou je velký.

Vezmeme-li v potaz například 3 hodnoty zatížení a to 12 MW, 18 MW a 30 MW, což odpovídá 4, 6, respektive 10 lokomotivám řady 362 při takřka plném trakčním výkonu a budeme brát, že výsledný účinník je roven 1¹ (tedy, že činný výkon se rovná zdánlivému výkonu, tudíž proud tekoucí jednofázovým odběrem je ve fázi se sdruženým napětím, na které je tento odběr připojen). Nicméně musíme započítat i to, že chceme jednofázový zdánlivý výkon, tím pádem si budeme muset tyto hodnoty ještě upravit (viz vztah 5.37)

¹ Účinník roven jedné není moc reálný, nicméně se jedná o zjednodušení pro výpočet. Zároveň je brán odebraný trakční výkon lokomotiv jako 3 MW. Zde se jedná také o zjednodušení, neboť nebereme v potaz topení ani odběr pomocných pohonů.

$$S_1 = \frac{P_v}{2 \cdot \cos 30^\circ} = \frac{P_v}{2 \cdot \frac{\sqrt{3}}{2}} = \frac{P_v}{\sqrt{3}} \quad (5.37)$$

Ve vztahu (5.37) je P_v činný příkon jednofázového odběru, který je podělen dvěma a kosinem úhlu 30° , což vychází z fázového diagramu.

Tabulka 3 Napěťové nesymetrie pro T zapojení jednotlivých TNS pro maximální zkratový výkon

TNS	Mýto	Nezvěstice	Planá	Vranov	Zátiší
ρ_u (%) při 12 MW	0,50	0,32	0,58	0,42	0,39
ρ_u (%) při 18 MW	0,74	0,48	0,87	0,63	0,58
ρ_u (%) při 30 MW	1,24	0,80	1,45	1,06	0,97

Zde příklad výpočtu (bude stejný i pro minimální zkratové výkony) pro TNS Planá při zatížení 10 lokomotivami řady 362. Pro výpočet jednofázového výkonu byl využit vzorec (5.37) a pro výpočet činitele napěťové nesymetrie byl použit vzorec (5.22).

$$S_1 = \frac{P_v}{\sqrt{3}}$$

$$S_1 = \frac{30 \cdot 10^6}{\sqrt{3}}$$

$$S_1 = 17,32 \text{ MVA}$$

$$\rho_u \cong \frac{S_1}{S_k''} \cdot 100$$

$$\rho_u \cong \frac{17,32 \cdot 10^6}{1192,1 \cdot 10^6} \cdot 100$$

$$\rho_u \cong 1,45 \%$$

Tabulka 4 Napěťové nesymetrie pro T zapojení jednotlivých TNS pro minimální zkratový výkon

TNS	Mýto	Nezvěstice	Planá	Vranov	Zátiší
ρ_u (%) při 12 MW	0,92	0,98	1,88	0,70	0,59
ρ_u (%) při 18 MW	1,38	1,47	2,82	1,05	0,89
ρ_u (%) při 30 MW	2,29	2,45	4,7	1,75	1,49

V současné době je míra nesymetrie brána ve výši 2 % zkratového výkonu, avšak tento limit se bude snižovat na 0,7 %. [26]

Tudíž například TNS Planá při minimálním zkratovém výkonu už by měla problém i při odběru 12 MW a muselo by se přejít na „V“ zapojení. Stejně tak tomu je u dalších TNS při minimálním zkratovém výkonu, kdy 0,7 % zkratového výkonu splňuje pouze TNS Vranov a TNS Zátíší při odběru opět 12 MW.

Pokud bereme v potaz maximální zkratové výkony, tak podle původního limitu by všechny TNS vyhověly, zatímco nový limit není splněn u většiny TNS a zatížení 30 MW a také pro TNS Planá pro zatížení 18 MW.

5.3.2 „V“ zapojení

Následovat budou příklady pro „V“ zapojení. Výkony v tomhle případě budou ale přerozděleny a budou posouzeny i jiné poměry než jenom poloviční výkony v každém úseku. Budeme brát stejný úsek nicméně obě poloviny daného úseku jsou napájeny z jiného sdruženého napětí a máme v daném úseku maximálně 10 lokomotiv řady 362 a v jednom úseku se pak bude počet lokomotiv postupně snižovat až k nule. Pro výpočet činitele proudové nesymetrie bude použit vzorec (5.36).

Tabulka 5 Proudové nesymetrie pro „V“ zapojení pro různá zatížení úseků

P_1	15	15	15	15	15	15
P_2	15	12	9	6	3	0
$k = P_2/P_1$	1	0,8	0,6	0,4	0,2	0
ρ_i (%)	50	51	55	62	76	100

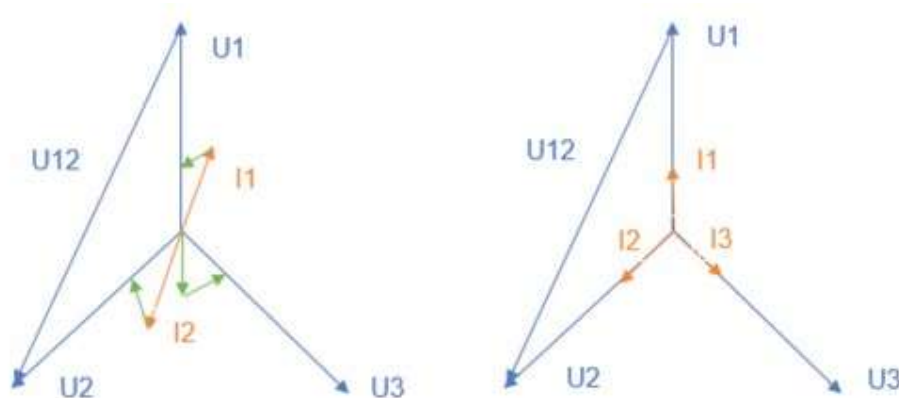
Z tabulky 3 vidíme, že „V“ zapojení je lepší než „T“ zapojení do doby, kdy v obou úsecích je alespoň nějaký odběr. Pak se „V“ zapojení začne chovat jako „T“ zapojení a činitel proudové nesymetrie je 1. Pokud však budou oba úseky alespoň částečně zatíženy, bude činitel proudové nesymetrie klesat až k 50 % pro stejně zatížené úseky.

6 Možná řešení s výhledem do budoucna

6.1 Aktivní balancér

Aktivní balancér je zařízení, které upraví nesymetrickou jednofázovou zátěž na trojfázovou symetrickou. Díky tomu se odstraní nesymetrické zatížení třífázové soustavy a také se nemusí střídat napájecí fáze TNS v průběhu napájeného úseku.

Problémem však zůstává nutnost stále používat neutrální pole k oddělení napájených úseků. Aktivní balancér totiž neřeší různé fázové posuvy na odlišných přípojných místech TNS k distribuční soustavě. V případě oboustranného napájení by tekly trakční soustavou netrakční vyrovnávací proudy a ty by způsobily další zatížení trakční soustavy, které je nežádoucí.



Obrázek 11 Fázorové diagramy popisující činnost balancérů, převzato z [3]

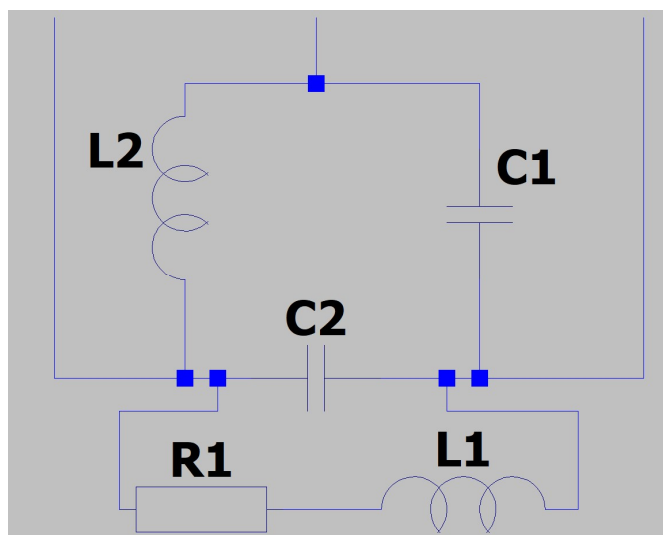
Na levém fázorovém diagramu jsou vidět proudy I_1 a I_2 , které vznikají jednofázovým zatížením. Mají určitý fázový posun vůči napětím (dáno použitím starších lokomotiv s klasickými usměrňovači) a samozřejmě chybí třetí proud, který by zbývající doplňoval. Aktivní balancér umožní jak sfázování obou proudů s fázovými napětími, tak i sníží proud vzniklý jednofázovým odběrem tím, že zatíží i třetí fázi, která by byla normálně nezatížena. Výsledný fázorový diagram je vpravo, kde je vidět nulový posun proudu za napětím a symetrické zatížení soustavy třemi proudy I_1 , I_2 , I_3 . [3]

Vysvětlení konfigurace pak bude v následující kapitole Steinmetzův obvod, neboť zapojení z něj principiálně vychází.

6.1.1 Steinmetzův obvod

Konfigurace aktivního balancéru se skládá z řízené tlumivky a dále ze dvou řízených kapacit. Tyto prvky jsou spojeny do trojúhelníka a k jedné z kapacit (na obrázku níže je to kapacita C_2) je paralelně připojena zátěž, která se skládá z odporu R_1 a indukčnosti L_1 . Parametry této kapacity se nastaví tak, aby společně s parametry indukčnosti byla vytvořena paralelní rezonance.

Díky paralelní rezonanci se indukčnost s kapacitou vykompenzují a dosáhneme na této větvi pouze odporové zátěže. Výsledkem je tedy trojúhelník, ve kterém je kapacita C_1 , indukčnost L_2 a odpor R_1 . Takovémuto zapojení se říká Steinmetzův obvod a tento obvod rozkládá činnou zátěž do všech tří fází. Ve finále se toto zapojení chová jako tři odpory zapojené po jednom do jedné fáze.



Obrázek 12 Schéma zapojení Steinmetzova obvodu, LTSpice

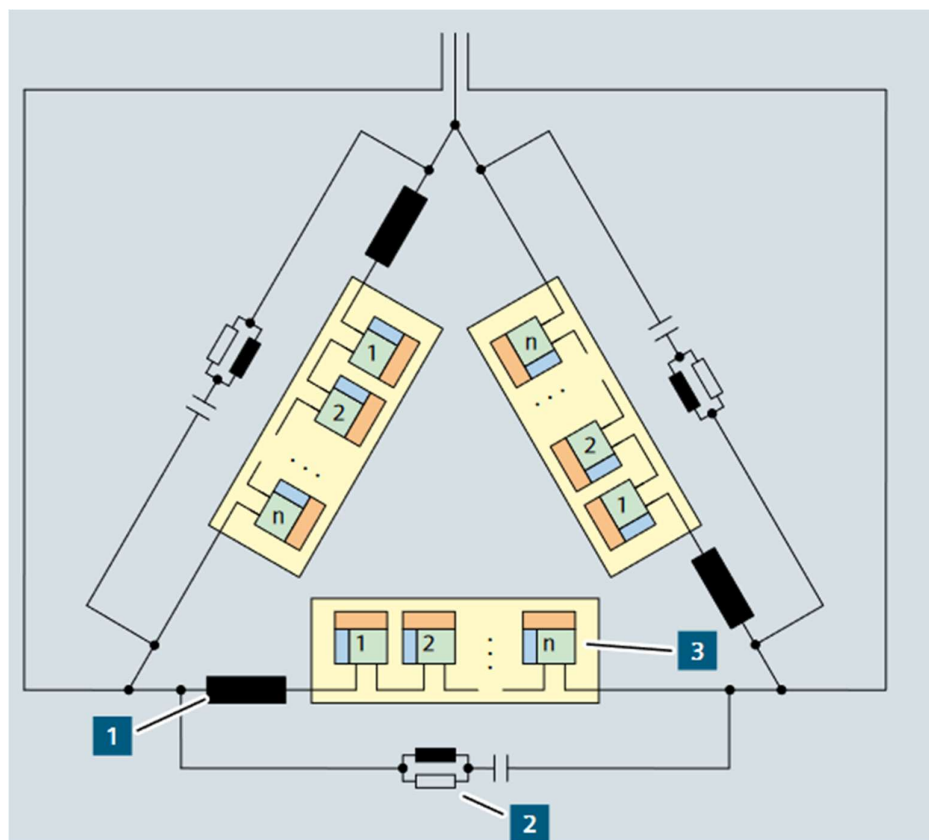
6.1.2 Sítras RAB plus

Jako příklad použití aktivních balancérů lze uvést RAB plus od firmy Siemens (RAB znamená rail active balancer). Tento měničový prvek nejenže zvládá jednofázovou zátěž rozložit do všech tří fází a tím ji symetrizovat, ale také dokáže kompenzovat jalové výkony z trakční napájecí soustavy. [17]

Skládá se z transformátoru, pokud je připojen na třífázovou síť VVN. Lze jej také připojit pomocí autotransformátoru nebo tlumivek. Dále následuje měničová část, která je uspořádána do trojúhelníka. [17]

Ta se skládá ze tří měničů, jeden je umístěn v každé fázi trojúhelníka. Následně se každý měnič se dá rozložit na dílčí části, které jsou tvořeny sériově spojenými výkonovými moduly (na obrázku 13 označeno číslem 3). Počet těchto modulů v sérii pak udává možné napětové zatížení. V každé fázi je k těmto modulům přidána ještě tlumivka (na obrázku 13 označeno číslem 1) a v případě potřeby je paralelně ke každé fázi připojen vysokofrekvenční filtr (na obrázku 13 označen číslem 2) k omezení vyšších harmonických. Řízení probíhá pomocí systémů WinCC a Simatic TDC. [17]

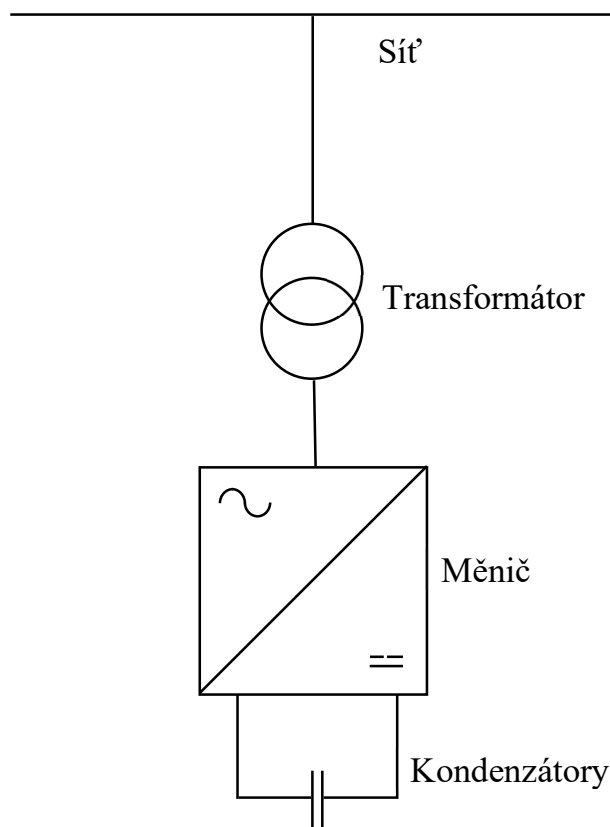
Tento typ aktivního balancéru od firmy Siemens můžeme spatřit například v Austrálii ve městě Adelaide. [17]



Obrázek 13 Schéma zapojení Sitrans RAB plus, převzato z [17]

6.2 Statický synchronní kompenzátor

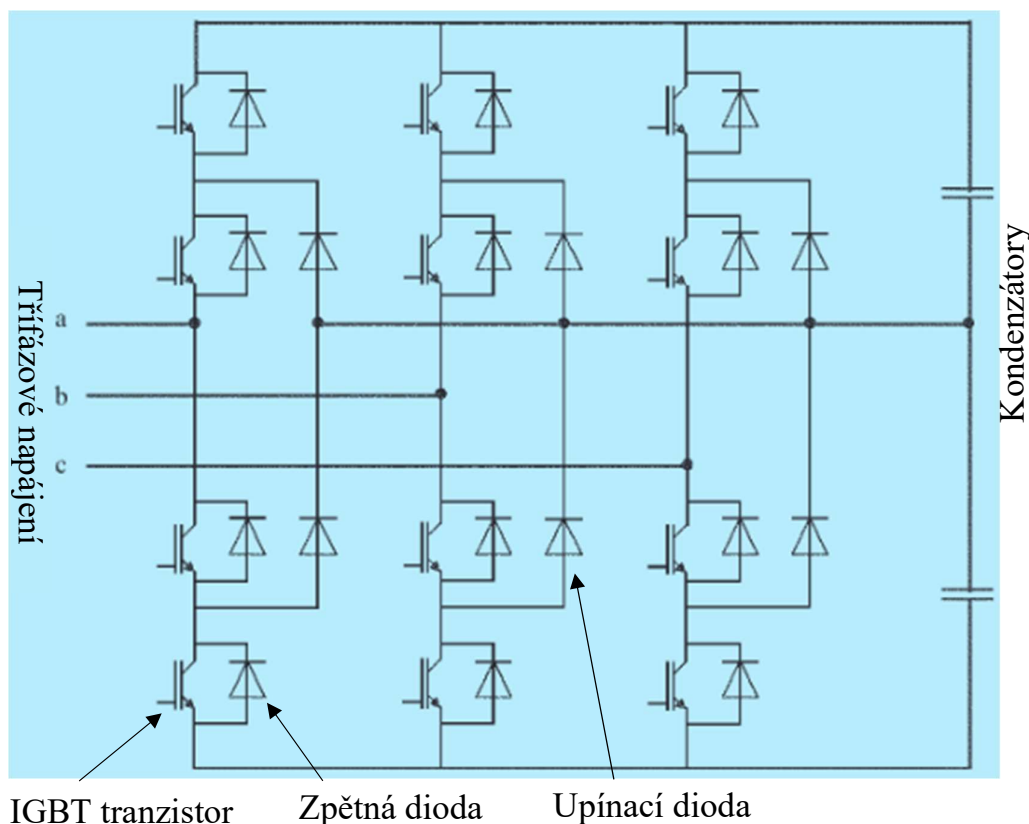
Statický synchronní kompenzátor často označovaný zkratkou STATCOM je zařízení pracující na podobném principu jako SVC, tedy mění jalový výkon, jen má menší časovou odezvu oproti dříve zmíněnému SVC a díky tomu se dá STATCOM řídit lépe. [16]



Obrázek 14 Základní schéma STATCOM

Jak můžeme vyčíst z obrázku, statický synchronní kompenzátor se skládá z transformátoru, skrze který je připojen měnič na napětí soustavy. Samotný měnič je tvořen IGBT tranzistory, zpětnými diodami a upínacími diodami (počet těchto prvků závisí na zatížení, na obrázku 15 je příklad s 12 IGBT tranzistory, 12 diodami a 6 upínacími diodami). Jedná se o třífázový střídač, který může díky zpětným diodám fungovat i v usměrňovačovém chodu. K řízení chodu měniče je používána pulzně šířková modulace (PWM). [5][16]

Tento měnič následně vede na dva kondenzátory.



Obrázek 15 Schéma měniče pracujícího v zapojení STATCOM, převzato z [18], upraveno

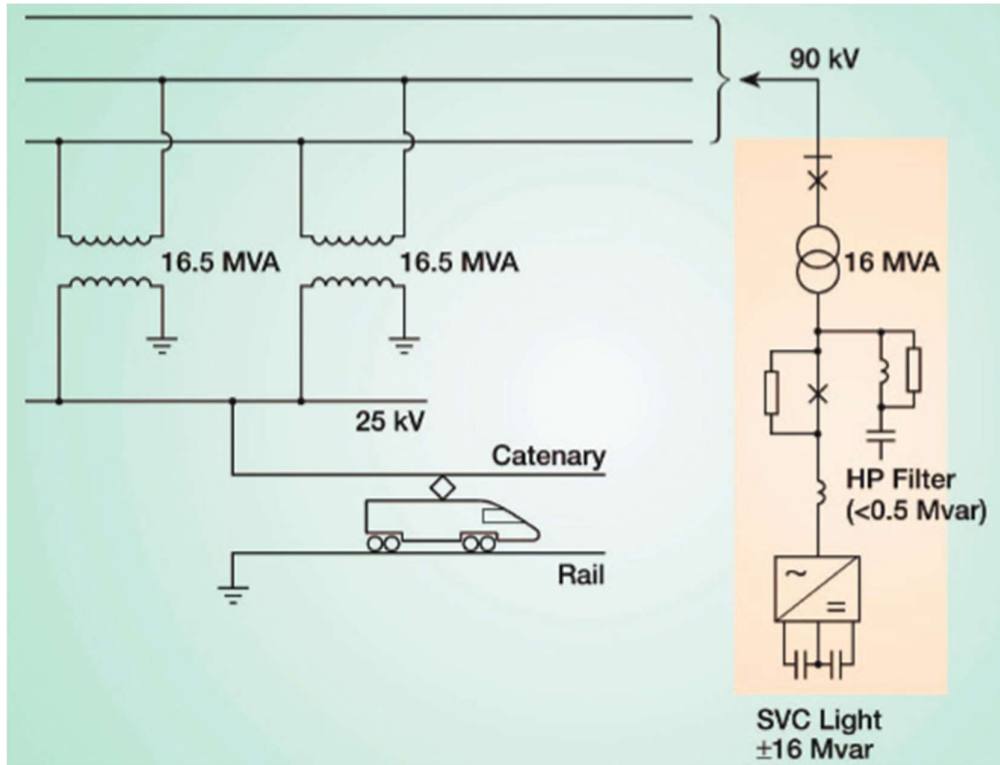
6.2.1 SVC light

Ačkoliv může být název zavádějící, SVC light je marketingové označení pro systém STATCOM od firmy ABB. Jak již bylo popsáno v předchozí kapitole, tak i SVC light dokáže odebírat nebo dodávat jalový výkon a to od 16 MVar induktivního charakteru až do 16 MVar kapacitního charakteru. [18]

Tento systém je aplikován ve Francii na trati Paříž – Rennes ve stanici Evron. Tato stanice je napájena ze sítě 3x90 kV, na kterou je připojen transformátor, ze kterého je následně napájen měnič. Do sekundáru transformátoru je ještě zapojen filtr pro omezení vyšších harmonických. [18]

Tento systém dokáže nejen kompenzovat jalový výkon a tím zlepšovat účinník, dále umí zlepšit situaci s jednofázovou zátěží díky symetrizaci zátěže do všech tří fází, a nakonec dokáže aktivně filtrovat vyšší harmonické. [18]

Aktivní filtrace probíhá vytvořením proudu, který je vůči původnímu v protifázi (tedy je posunutý o 180°) a tyto dva proudy se následně odečtou. Takto lze v této stanici filtrovat až do deváté harmonické. Jediným omezením pro tento typ filtrace je v tomhle případě spínací frekvence střídače. [5]



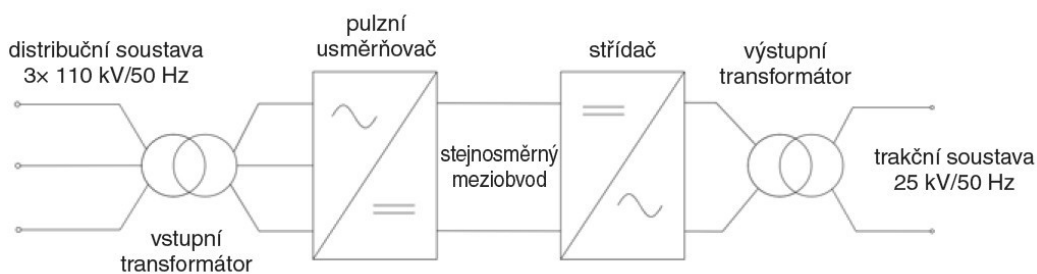
Obrázek 16 Schéma zapojení stanice Evron, převzato z [18]

6.3 Měničové napájecí stanice

6.3.1 SFC a jeho princip

Jak již bylo zmíněno v kapitole 3.1.2 SFC (static frequency converter) je nepřímý frekvenční měnič se stejnosměrným napěťovým meziobvodem. Skládá se ze vstupního třífázového transformátoru, který snižuje napětí z distribuční soustavy na požadované napájecí napětí usměrňovače. Po transformátoru následuje pulzní třífázový usměrňovač, který usměrní střídavý průběh. Tento usměrňovač napájí stejnosměrný napěťový meziobvod s kondenzátorem. Napětí v meziobvodu se nejčastěji pohybuje mezi 5 a 15 kV. [3]

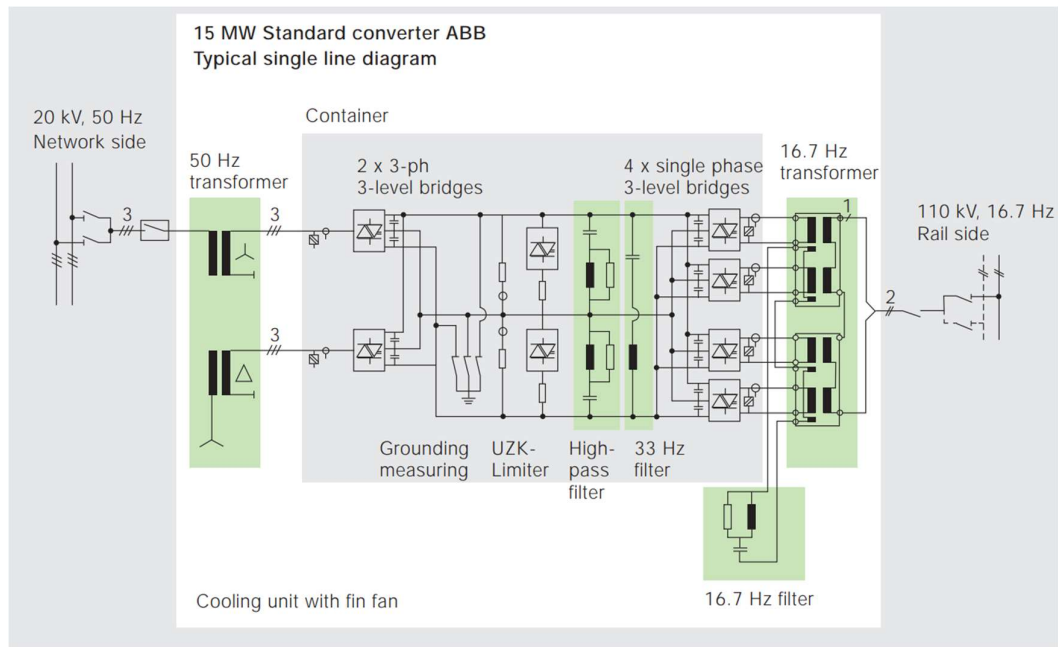
Po stejnosměrném meziobvodu následuje jednofázový střídač, který nám stejnosměrný průběh rozstřídá na požadovanou napájecí frekvenci 50 Hz (v zahraničí, kde je používána frekvence 60 Hz bude střídač vytvářet průběh o frekvenci 60 Hz). Střídač však nedokáže vytvořit potřebné napětí, a proto je za střídačem ještě výstupní jednofázový transformátor, který nám zvýší napětí na požadovanou velikost 25 kV. Dnes se již objevují měniče, které tento krok zvládnou i bez výstupního transformátoru. [3]



Obrázek 17 Základní princip nepřímého frekvenčního měniče, převzato z [3]

Nutno ale dodat, že tento způsob není jediným řešením. Například v Německu, kde mají trakční soustavu 15 kV / 16,7 Hz je používán také přímý frekvenční měnič, kde je vynechán stejnosměrný meziobvod. [3]

Samozřejmě se v Německu používají také nepřímé frekvenční měniče. Jeden příklad celého zapojení je na obrázku 18, kde můžeme na rozdíl od obrázku 17, který je zjednodušený, vidět veškeré komponenty stejnosměrného meziobvodu. [24]

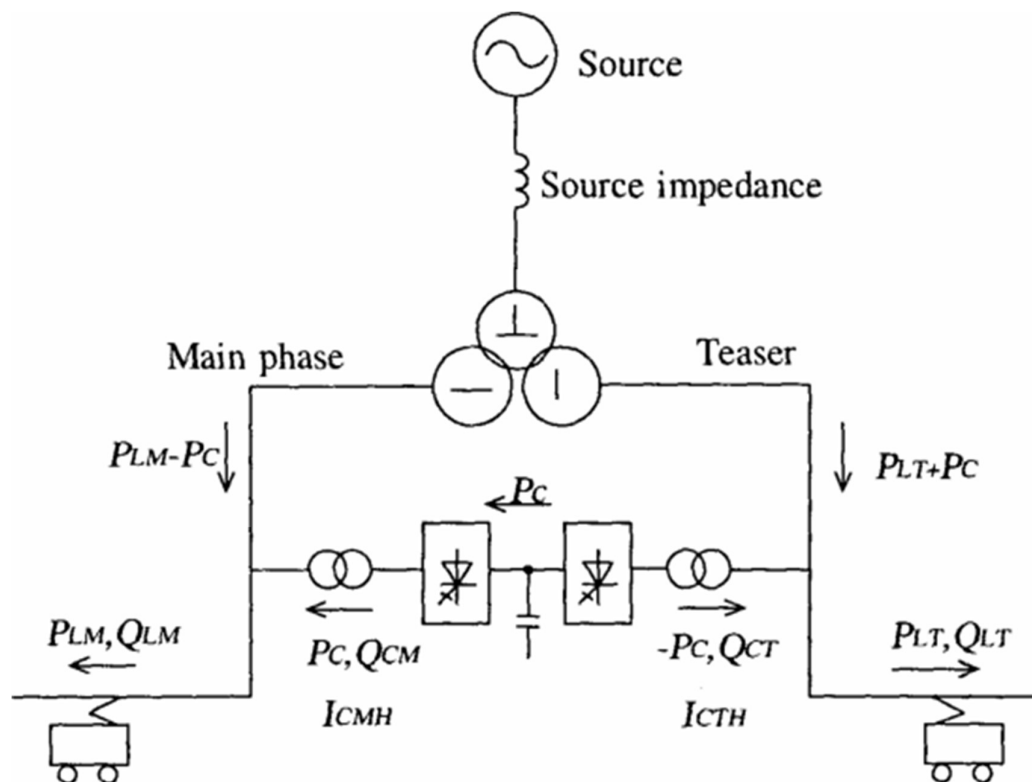


Obrázek 18 Schéma kompletního zapojení nepřímého měniče frekvence od společnosti ABB napájecího střídavou trakční soustavu o frekvenci 16,7 Hz, převzato z [24]

6.3.2 RPC a jeho princip

RPC neboli rail power conditioner je dalším příkladem využití měničů k symetrizaci odběru z třífázové sítě. RPC se používá ve spojení se Scottovým transformátorem. [11]

Skládá se ze stejných transformátorů (jeden je napájen z prvního traťového úseku a druhý z druhého, kdy oba úseky jsou napájeny stejným Scottovým transformátorem). Tyto transformátory snižují napětí z napětí v troleji na napětí pro měniče. Za transformátory následují měniče, které mohou fungovat jak ve střídačovém, tak i v usměrňovačovém režimu. A nakonec mezi měniči je stejnosměrný napěťový meziobvod s kondenzátory. [11]



Obrázek 19 Schéma zapojení RPC se Scottovým transformátorem, převzato z [11]

RPC funguje na principu detekce proudu a napětí v jednotlivých úsecích a následně z těchto hodnot vypočítá hodnoty činného výkonu P . Pokud RPC zjistí, že úseky jsou nestejně zatíženy, a tudíž se objeví rozdíl v činných výkonech, zajistí následně tok výkonu z více zatíženého úseku do méně zatíženého (na obrázku se jedná o výkon P_c procházející přes větev s měniči). Výsledkem pak bude, že výkon v obou úsecích je opět stejný a výsledná nesymetrie pak bude nulová. [11]

6.3.3 Použití měničových napájecích stanic

Tyto stanice nacházejí čím dál větší využití na celém světě. Například SFC od firmy ABB se používají například v Německu, Švýcarsku nebo Švédsku (jedná se zejména o země, kde je napájení realizováno jinou frekvencí, než je frekvence v distribuční síti), ale také se objevují i na jiných kontinentech, jako je Austrálie. [5] [15]

RPC jsou využívány zejména v Japonsku, kde jsou využívány ve spojení se Scottovými transformátory. [11]

Všechny tyto stanice však umožňují symetrické zatížení trojfázové soustavy, což je v dnešní době stále více žádoucí.

Závěr

System 25 kV / 50 Hz má svoje nevýhody, nicméně svými výhodami, ať je to menší hustota TNS na železniční síti a s tím související nižší režijní náklady, nebo menší proudové namáhání při stejném přenášeném výkonu, převažuje nad stejnosměrnými trakčními soustavami, zejména pak napájecí soustavou 3 kV. Je to také potvrzeno snahou o konverzi úseků se stávajícími stejnosměrnými napájecími soustavami na soustavu 25 kV / 50 Hz.

TNS této napájecí soustavy však mají negativní vlivy na síť, co se symetrie týká. Jak je naznačeno ve druhé a páté kapitole jak „T“ zapojení, tak i „V“ zapojení mají tyto negativní vlivy na síť. „V“ zapojení se jeví jako lepší varianta, neboť má lepší parametry týkající se nesymetrie, kdy činitel proudové nesymetrie je u „T“ zapojení vždy na hodnotě 1, což znamená 100 % proudovou nesymetrii. Zatímco u „V“ zapojení tomu tak je pouze v případě jednoho úseku kompletně nezatíženého a pokud budou oba úseky zatížené (i kdyby nesymetricky) klesá činitel proudové nesymetrie až k hodnotě 0,5 tedy 50 % proudové nesymetrii při obou úsecích zatížených stejně.

Ve světě jsou však již řešení, která mohou obě zapojení vytlačit, protože se k třífázové síti jeví jako třífázová zátěž, ačkoliv napájí jednofázovou trakční soustavu. Většina těchto zařízení je založena na měničových technologiích s polovodičovými součástkami. Ať je to rail power conditioner se Scottovým transformátorem, který nejspíše v České republice využití nenajde kvůli absenci právě Scottových transformátorů, nebo aktivní balancéry či statické synchronní kompenzátory až po využití SFC, tedy nepřímých měničů frekvence.

Právě SFC by mohly být favoritem, neboť kromě symetrického zatížení, přináší výhodu v podobě spolupráce několika TNS společně napájející jeden dlouhý úsek, tím by nebyla nutná neutrální pole (kontinuální napájení trakčních vozidel). Dále jsou to výhody oboustranného napájení (nižší úbytky napětí v troleji), větší možnosti výměny rekuperované energie mezi vozidly, možnost vhodnějšího dimenzování TNS s ohledem na možnost spolupráce TNS při nerovnoměrném zatížení troleje.

Všechny tyto technologie již našly využití jinde ve světě, nicméně bude třeba ještě udělat ekonomické a energetické analýzy, abychom zjistili, které z nich jsou pro naši železniční síť nejvhodnější.

7 Seznam obrázků

Obrázek 1 Mapa rozdělení trakčních napájecích soustav v Evropě, převzato z [4]	- 3 -
Obrázek 2 Schéma uspořádání na hladinách VN, převzato z [14]	- 6 -
Obrázek 3 Porovnání fázorového diagramu symetricky a nesymetricky zatížené soustavy, převzato z [10]	- 7 -
Obrázek 4 Schéma zapojení transformátorů do „V“, převzato z [2]	- 9 -
Obrázek 5 Schéma zapojení transformátorů do „T“, převzato z [2]	- 10 -
Obrázek 6 Schéma Scottova zapojení, převzato z [7]	- 11 -
Obrázek 7 Schéma zapojení SVC, převzato z [12]	- 12 -
Obrázek 8 Principální schéma Filtračně kompenzačního zařízení, převzato z [3]	- 14 -
Obrázek 9 Fázorový diagram pro „T“ zapojení	- 20 -
Obrázek 10 Fázorový diagram pro „V“ zapojení	- 24 -
Obrázek 11 Fázorové diagramy popisující činnost balancérů, převzato z [3]	- 29 -
Obrázek 12 Schéma zapojení Steinmeztova obvodu, LTSpice	- 30 -
Obrázek 13 Schéma zapojení Sitras RAB plus, převzato z [17]	- 31 -
Obrázek 14 Základní schéma STATCOM	- 32 -
Obrázek 15 Schéma měniče pracujícího v zapojení STATCOM, převzato z [18], upraveno	- 33 -
Obrázek 16 Schéma zapojení stanice Evron, převzato z [18]	- 34 -
Obrázek 17 Základní princip nepřímého frekvenčního měniče, převzato z [3]	- 35 -
Obrázek 18 Schéma kompletního zapojení nepřímého měniče frekvence od společnosti ABB napájejícího střídavou trakční soustavu o frekvenci 16,7 Hz, převzato z [24]	- 36 -
Obrázek 19 Schéma zapojení RPC se Scottovým transformátorem, převzato z [11]	- 37 -

8 Literatura

- [1] ŠINDELÁŘ, Jan. Posun střídavé soustavy na sever může začít, Drážní úřad vydal stavební povolení. *Zdopravy.cz* [Online]. 24. Leden 2021. [Citace: 12. únor 2022.]. Dostupné z: <https://zdopravy.cz/posun-stridave-soustavy-na-sever-muze-zacit-drazni-urad-vydal-stavebni-povoleni-71861/>
- [2] PAVLÍČEK, Jiří. Pevná trakční zařízení pro vozidla závislé trakce. *EDUCON*. [Online]. 2005. [Citace: 13. únor 2022.]. Dostupné z: <https://www.educon.zcu.cz/view.php?cislomodulu=2015050204>
- [3] NOVÁK, Jaroslav a MLYNÁŘÍK, Ladislav. Nové technologie trakčního napájení 25 kV/50 Hz (1. část). *ELEKTRO Časopis pro elektrotechniku*. [Online]. 2020. [Citace: 13. únor 2022.]. Dostupné z: <http://www.odbornecasopisy.cz/elektro/casopis/tema/nove-technologie-trakcniho-napajeni-25-kv-50-hz-1-cast--17232>
- [4] MOLEK, Tomáš. Elektrifikace českých železnic. *Oenergetice.cz*. [Online]. 9. Listopad 2015. [Citace: 12. únor 2022.]. Dostupné z: <https://oenergetice.cz/slug/elektrifikace-ceskych-zeleznic>
- [5] MÍKA, Matěj. 2019. *Symetrizace a kompenzace odběru trakčních napájecích stanic pro systém 25 kV, 50 Hz*. Plzeň. Bakalářská práce. Západočeská univerzita. Fakulta elektrotechnická.
- [6] MASAR, Patrik. 2019. *Rekuperace u trakčních napájecích stanic pro systém 25 kV, 50 Hz*. Plzeň. Bakalářská práce. Západočeská univerzita. Fakulta elektrotechnická.
- [7] MAJDA, František. Scottovo zapojení. *ELEKTRO Časopis pro elektrotechniku*. [Online]. 2020. [Citace: 17. únor 2022.]. Dostupné z: <http://www.odbornecasopisy.cz/elektro/casopis/tema/scottovo-spojenci--17242>
- [8] DOLEČEK, Radovan a ČERNÝ, Ondřej. *Trakční napájecí soustavy*. Pardubice : Univerzita Pardubice. Fakulta dopravní Jana Pernera., 2015. Dostupné z: https://dk.upce.cz/bitstream/handle/10195/59028/DolecekR_TrakcniNapajeci_2015.pdf?sequence=1&isAllowed=y
- [9] BULÍN, Martin. 2019. *Ochrany pro trakční napájecí stanice pro systém 25 kV, 50 Hz*. Plzeň. Bakalářská práce. Západočeská univerzita. Fakulta elektrotechnická.

- [10] SMETANA, Jaroslav. Měření při údržbě pohonů a motorů (2. část) . *ELEKTRO Časopis pro elektrotechniku*. [Online]. 29. únor 2016. [Citace: 20. únor 2022.]. Dostupné z: <http://www.odbornecasopisy.cz/elektro/clanek/mereni-pri-udrzbe-pohonu-a-motoru-2-cast--1489>
- [11] MORIMOTO, H. Development of railway static power conditioner used at substation for Shinkansen. *IEEE Xplore*. [Online]. 2. Srpen 2002. [Citace: 15. Březen 2022.]. Dostupné z: <https://ieeexplore.ieee.org/document/998127>
- [12] PANFILOV, D., I. Design and assessment of static VAR compensator on railways power grid operation under normal and contingencies conditions. *IEEE Xplore*. [Online]. 1. Září 2016. [Citace: 19. březen 2022.]. Dostupné z: <https://ieeexplore.ieee.org/document/7555525>
- [13] REDAKCE ČASOPISU. Nesymetrie napětí v distribuční soustavě. *Elektroprumysl.cz*. [Online]. 3. květen 2016. [Citace: 19. únor 2022.]. Dostupné z: <https://www.elektroprumysl.cz/energetika/nesymetrie-napeti-v-distribucni-soustave>
- [14] ČEZ. *Distribuční soustava. Svět energie vzdělávací portál ČEZ*. [Online]. 2020. [Citace: 19. únor 2022.]. Dostupné z: <https://www.svetenergie.cz/cz/energetika-zblizka/distribuce-elektřiny/distribuce-elektrické-energie-podrobně/distribucni-soustava/vyklad>
- [15] ABB. *Technology note – Rail SFC light*. [Online]. 15. leden 2018. [Citace: 15. březen 2022.]. Dostupné z: https://library.e.abb.com/public/991e03189b9548c2a423e57fc7dcb230/Rail%20SFC%20Light_tech%20note_RevC_EN.pdf
- [16] PTÁČEK, Ondřej. 2016. *Řízení toku výkonů v síti*. Plzeň. Bakalářská práce. Západočeská univerzita. Fakulta elektrotechnická.
- [17] SIEMENS. *Sitras RAB plus*. [Online]. 2018. [Citace: 22. březen 2022.]. Dostupné z: <https://assets.new.siemens.com/siemens/assets/api/uuid:4c1373d1-898d-48f1-9f8a-a4471820470b/siemens-sitras-rabplus-pi-en.pdf>
- [18] ABB. *SVC light for railway load balancing*. [Online]. Leden 2011. [Citace: 22. březen 2022.]. Dostupné z: https://library.e.abb.com/public/a8eb7d4c84157390c12578780040b3e1/A02-0203%20E_.pdf

- [19] ČSN 33 3505 ed. 2. *Drážní zařízení – Pevná trakční zařízení – Základní požadavky na elektrické napájecí a spínací stanice*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví. 2010.
- [20] HRDLOVICS, Vojtěch. 2017. *Systémové řešení napájení trakčních vozidel*. Praha. Diplomová práce. České vysoké učení technické. Fakulta elektrotechnická.
- [21] ČSN EN 50 160 ed. 3. *Charakteristiky napětí elektrické energie dodávané z veřejných distribučních sítí*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví. 2011.
- [22] ČEZ. *Pravidla provozování distribuční soustavy*. [Online]. 2016. [Citace: 14. květen 2022.]. Dostupné z: https://www.cez.cz/edee/content/file-other/cezes/pro-zakazniky/ppds_2016-vcetne-priloh.pdf
- [23] FUKALA, Bogdan. 2010. *Vliv elektrické vozby na napájecí soustavu*. Ostrava. Diplomová práce. VŠB – technická univerzita Ostrava. Fakulta elektrotechniky a informatiky.
- [24] ABB. *Static converters, dynamic performance*. [Online]. 2010. [Citace 17. květen 2022.]. Dostupné z: https://library.e.abb.com/public/5fde0e77f28f90abc12577750033167b/42-47%202m056_ENG_72dpi.pdf
- [25] Ministerstvo dopravy České republiky. *Železniční síť České republiky. Systémy trakčních proudových soustav*. [Online]. [Citace 17. květen 2022.]. Dostupné z: https://www.mdcr.cz/getattachment/Dokumenty/Drazni-doprava/Zeleznicni-infrastruktura/Koncepce-prechodu-na-jednotnou-napajeci-soustavu-n/mapa_system.pdf.aspx
- [26] Katedra elektromechaniky a výkonové elektroniky fakulty elektrotechnické ZČU. *Studijní text předmětu KEV/VTS*. [Online]. [Citace 17. květen 2022.]. Dostupné z: <https://phix.zcu.cz/moodle/enrol/index.php?id=7123>

Příloha A2 Komplexní zapojení TNS, poskytnuto vedoucím práce

