

ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

Fakulta elektrotechnická

Katedra elektroenergetiky

Diplomová práce

Návrh trakčního zařízení trakční měnirny metra

Bc. Karel Kovařík

2022

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Kovařík** Jméno: **Karel** Osobní číslo: **459936**
Fakulta/ústav: **Fakulta elektrotechnická**
Zadávající katedra/ústav: **Katedra elektroenergetiky**
Studijní program: **Elektrotechnika, energetika a management**
Specializace: **Elektroenergetika**

II. ÚDAJE K DIPLOMOVÉ PRÁCI

Název diplomové práce:

Návrh trakčního zařízení trakční měničny metra

Název diplomové práce anglicky:

Design of Metro Traction Substation Equipment

Pokyny pro vypracování:

1. Seznamte se s problematikou napájení elektrické trakce a trakčních měničů.
2. Popište možná uspořádání trakčního obvodu používaná pro napájení metra v ČR a ve světě.
3. Vysvětlíte podstatné kroky při návrhu a výběru jednotlivých prvků trakčního obvodu.
4. Navrhnete elektrické zařízení trakční měničny a trakční vedení pro zadané parametry, a to včetně ochrany před poruchovými stavy.
5. Nastavení ochrany ověřte výpočtem.

Seznam doporučené literatury:

- [1] Doleček, R., Černý, O.: Trakční napájecí soustavy. Univerzita Pardubice, 2015.
- [2] Danzer, J.: Elektrická trakce. Západočeská univerzita v Plzni, 2009.
- [3] Steimel, A.: Electric traction - motive power and energy supply: basics and practical experience. DIV Deutscher Industrieverlag, Mnichov, 2014.
- [4] Soubor norem ČSN EN 50122 Drážní zařízení – Pevná trakční zařízení – Elektrická bezpečnost, uzemňování a zpětný obvod.
- [5] ČSN 33 3510 Elektrická trakční zařízení metra.

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) diplomové práce:

Ing. Pavel Koblíř, Ph.D., katedra elektrických pohonů a trakce

Jméno a pracoviště druhé(ho) vedoucí(ho) nebo konzultanta(ky) diplomové práce:

Datum zadání diplomové práce: **18.02.2021**

Termín odevzdání diplomové práce: **07.01.2022**

Platnost zadání diplomové práce: **19.02.2023**

Ing. Pavel Koblíř, Ph.D.
podpis vedoucí(ho) práce

_____ podpis vedoucí(ho) ústavu/katedry

prof. Mgr. Petr Páta, Ph.D.
podpis děkana(ky)

III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

Diplomant bere na vědomí, že je povinen vypracovat diplomovou práci samostatně, bez cizí pomoci, s výjimkou poskytnutých konzultací. Seznam použité literatury, jiných pramenů a jmen konzultantů je třeba uvést v diplomové práci.

_____ Datum převzetí zadání

_____ Podpis studenta

Čestné prohlášení

Prohlašuji, že jsem předloženou práci vypracoval samostatně a že jsem uvedl veškeré použité informační zdroje v souladu s Metodickým pokynem o dodržování etických principů při přípravě vysokoškolských závěrečných prací.

V Praze dne 7. 1. 2022

.....

Podpis

Poděkování

Děkuji vedoucímu práce Ing. Pavlu Kobrlemu, Ph.D., za věnovaný čas, ochotu, cenné rady a celkovou podporu, které mi pomohly k vypracování této práce.

Abstrakt

Předkládaná diplomová práce se zabývá návrhem trakčního zařízení měnírny metra. V první části jsou popsány používané drážní soustavy, dále je uvedena problematika napájení trakční napájecí soustavy metra z distribuční sítě vn a popsány způsoby napájení elektrických úseků trakčního vedení. Je nastíněna problematika bludných proudů v DC trakčních soustavách. Stručně je zmíněna problematika EMC drážních soustav. Závěrečná část práce je věnována návrhu parametrů trakčních zařízení měnírny metra a trakčního vedení a nastavení zkratových ochran napáječových rychlovypínačů.

Klíčová slova

Elektrická trakční soustava, napájení elektrické trakce, trakční měnárna, usměrňovací skupina.

Abstract

This diploma thesis deals with the design of metro traction substation equipment. Employed traction systems are described in the first part. Further, the issues concerning the power supply of the metro traction supplying station from the medium voltage distribution power grid are discussed, as well as the ways of how the electric sections of the traction lines are supplied. The problems of the railway stray current in DC traction systems are outlined. The EMC issues in railway systems are also shortly mentioned. The final part of the diploma thesis deals with the design of the parameters of the metro traction substation equipment, traction lines and setting of high speed circuit breaker short-circuit protections.

Key words

Electric traction system, supplying of the electric traction, traction substation, rectifier group.

Obsah

1	Úvod.....	1
2	Elektrické trakční soustavy a jejich součásti	3
2.1	Elektrická trakční zařízení	3
2.2	Charakteristika elektrických trakčních soustav	3
2.3	Součásti elektrických trakčních soustav	7
3	Uspořádání a napájení elektrických trakčních soustav metra.....	8
3.1	Uspořádání elektrických trakčních soustav metra	8
3.2	Funkce napájecí stanice metra.....	8
3.3	Napájení DC trakční soustavy metra ze sítě vn.....	9
3.4	Napájení elektrických úseků DC trakční sítě metra	13
3.5	Zpětný obvod a problematika bludných proudů u DC trakčních soustav	14
4	Elektromagnetická kompatibilita drážních zařízení	18
5	Zařízení trakční měřírny metra	20
5.1	Prvky trakční měřírny metra	20
5.1.1	Transformátory	22
5.1.2	Trakční usměřňovače.....	23
5.1.3	Usměřňovací skupina	25
6	Zásady návrhu trakčních měření metra	27
7	Návrh trakčního zařízení měřírny metra	29
7.1	Požadované vlastnosti	29
7.2	Výchozí předpoklady a zadané hodnoty.....	29
7.3	Dimenzování trakčního transformátoru.....	30
7.4	Výpočet parametrů usměřňovací skupiny	31
7.5	Návrh trakčního vedení	34
7.5.1	Určení typu a počtu kabelů vzhledem k dovolenému oteplení.....	35
7.6	Nastavení ochran rychlovypínačů výpočtem.....	37
7.7	Shrnutí návrhu	40
8	Závěr.....	41
9	Seznam obrázků	42
10	Seznam literatury.....	43

Seznam zkratek

AC	střídavý proud (<i>alternating current</i>)
BART	<i>Bay Area Rapid Transit</i> , systém expresního metra v San Francisku
CENELEC	Evropský výbor pro normalizaci v elektrotechnice
ČSN	česká technická norma
DC	stejnoseměrný proud (<i>direct current</i>)
DS	distribuční soustava
EM	elektromagnetický (<i>electromagnetic</i>)
EMC	elektromagnetická kompatibilita (<i>electromagnetic compatibility</i>)
ETS	elektrická trakční soustava
MHD	městská hromadná doprava
nf	nízkofrekvenční
nn	nízké napětí
PK	proudová přívodní kolejnice
RER	<i>Réseau Express Régional</i> , označení pro regionální příměstskou železnici ve francouzsky mluvících zemích
THD	celkové harmonické zkreslení (<i>total harmonic distortion factor</i>)
TM	trakční měnič
TNS	trakční napájecí stanice
TT	trakční transformovna
VAL	<i>Véhicule Automatique Léger</i> , automatický systém lehkého metra s vlaky na podvozku s pneumatikami
vf	vysokofrekvenční
vn	vysoké napětí

Seznam veličin a značek

d_{rB}	odporový úbytek DC napětí usměrňovací skupiny v procentech U_{di}
d_{xB}	indukční úbytek DC napětí usměrňovací skupiny v procentech U_{di}
e_{rB}	rezistanční složka poměrného napětí nakrátko transformátoru pro měniče
e_{xB}	indukční složka poměrného napětí nakrátko transformátoru pro měniče
I_{Bd}	základní stejnosměrný proud usměrňovací skupiny
I_{kmin}	ustálený zkratový proud v nejbližším místě napájeného úseku
I_n	jmenovitý proud
I_{nast}	proudové nastavení zkratové ochrany napáječe
I_{pmax}	největší provozní proud v obvodu napáječe
I_{secY}	proud sekundárního vinutí zapojeného do hvězdy
I_{secD}	proud sekundárního vinutí zapojeného do trojúhelníku
I_{SS}	trvalý DC zkratový proud
\hat{I}_{SS}	vrcholová hodnota DC zkratového proudu
I_{SSmax}	teoretická maximální hodnota trvalého DC zkratového proudu při $L_d = \infty$
K	činitel vazby trojvinutového transformátoru
L_d	indukčnost na straně zatěžovacího obvodu usměrňovací skupiny
L_S	Indukčnost sekundárních vinutí transformátoru
R_d	odpor na straně zatěžovacího obvodu usměrňovací skupiny
R_{KO}	odpor kolejnicového vedení
R_M	vnitřní odpor měničky
R_{max}	maximální odpor zkratového obvodu
R_{NK}	odpor napájecích kabelů
R_{PK}	odpor přívodní kolejnice
R_{ZK}	odpor zpětných kabelů
T_c	časová konstanta zatěžovacího obvodu usměrňovací skupiny
U_{di}	ideální stejnosměrné napětí naprázdno usměrňovací skupiny

U_0 nejvyšší napětí sítě se stejnosměrným napětím (napětí měničny naprázdno)

U_{Nd} jmenovité DC napětí usměřovací skupiny

U_{sec} sekundární napětí transformátoru

1 Úvod

Metro je městská elektrická rychlodráha určená pro masovou přepravu cestujících. Jeho základním znakem je autonomní provoz, oddělený od ostatních drah (železničních, tramvajových) po celé délce své trasy, která může být vedena pod povrchem i na povrchu. Provozní technologie metra je odvozena od železnice, je však přizpůsobena specifickým urbanistickým, dopravním a technickým požadavkům (např. menší dopravní vzdálenosti, vysoké zrychlení i rychlost jízdy, velká přepravní kapacita, hustý sled vlaků) [15].

Z hlediska dopravně-urbanistického začlenění do území a z hlediska dosažení přepravní kapacity se systémy metra dělí na klasické metro, lehké metro a expresní metro¹. Jejich technické provedení bývá velmi rozmanité, od tratí s klasickým železničním kolejovým svrškem (Londýn, Praha) přes systémy s podvozky s pneumatikami (Lille, Toulouse) až po systémy s indukčním lineárním pohonem (Ósaka, Tokio) [15].

Klasické metro tvoří základní páteřní prvek MHD. Trasy klasického metra se navrhují pro předpokládané zátěže přibližně do 40 000 cestujících za hodinu v jednom směru. Bývají vedeny v hloubených nebo ražených tunelech nebo povrchově na estakádách. Maximální návrhová rychlost tratí bývá až 80 km/h. Trasy klasického metra tvoří největší podíl systémů metra ve světě. Provoz klasického metra bývá poloautomatický nebo zcela automatický. Jako příklad klasického metra lze uvést systémy metra ve městech Paříž, Londýn, Praha, Moskva, New York [15].

Trasy lehkého metra se navrhují pro oblasti s předpokládanou dopravní zátěží nepřesahující 20 000 cestujících za hodinu v jednom směru. Výhodnost lehkého metra spočívá v jeho snadnější integraci do obsluhovaného území a z toho vyplývající mnohem menší investiční náročnost oproti klasickému metru. Trať je nejčastěji tvořena speciální dráhou pro provoz podvozků s pneumatikami, méně často pak klasickým kolejovým svrškem s ocelovými kolejnicemi, který naopak převažuje u tratí klasického metra. Maximální návrhová rychlost bývá zpravidla 60 km/h, výjimečně vyšší. Systémy lehkého metra bývají plně automatizovány, to znamená, že všechny operace, jako např. ovládání dveří, jízda, detekce překážek nebo řešení nebezpečných situací, probíhají zcela automaticky, bez přítomnosti obsluhy vlaku. Příkladem lehkého metra je systém VAL v Lille a Toulouse ve Francii [15].

Expresní metro se vyskytuje pouze výjimečně. Bývá navrhováno pro sídelní aglomerace s předpokládanou zátěží až 80 000 cestujících za hodinu v jednom směru. Navrhuje se v případech, kdy

¹ A. Steimel [21] uvádí jiné členění jednotlivých typů metra. Rozlišuje „Metro“ pro zátěž 50 tis. cestujících / hod. v jednom směru, „Underground“ pro 30 – 40 tis. cestujících / hod. v jednom směru a „Light rapid Transit“ pro 20 – 30 tis. cestujících / hod. v jednom směru. Rovněž připouští spojení drah metra s jinými dráhami.

v uvažované lokalitě neexistuje příměstská nebo regionální železnice potřebných parametrů. Nejvýznamnějším příkladem expresního metra je systém BART v San Franciscu [15].

Z ekonomického hlediska je vybudování klasického metra smysluplné zpravidla v oblastech obsluhovaných MHD s nejméně 1 mil. obyvatel, systémy lehkého metra pak v oblastech s nejméně 300 000 obyvateli [21].

Předkládaná práce se věnuje systémům trakčního napájení klasického metra.

2 Elektrické trakční soustavy a jejich součásti

2.1 Elektrická trakční zařízení

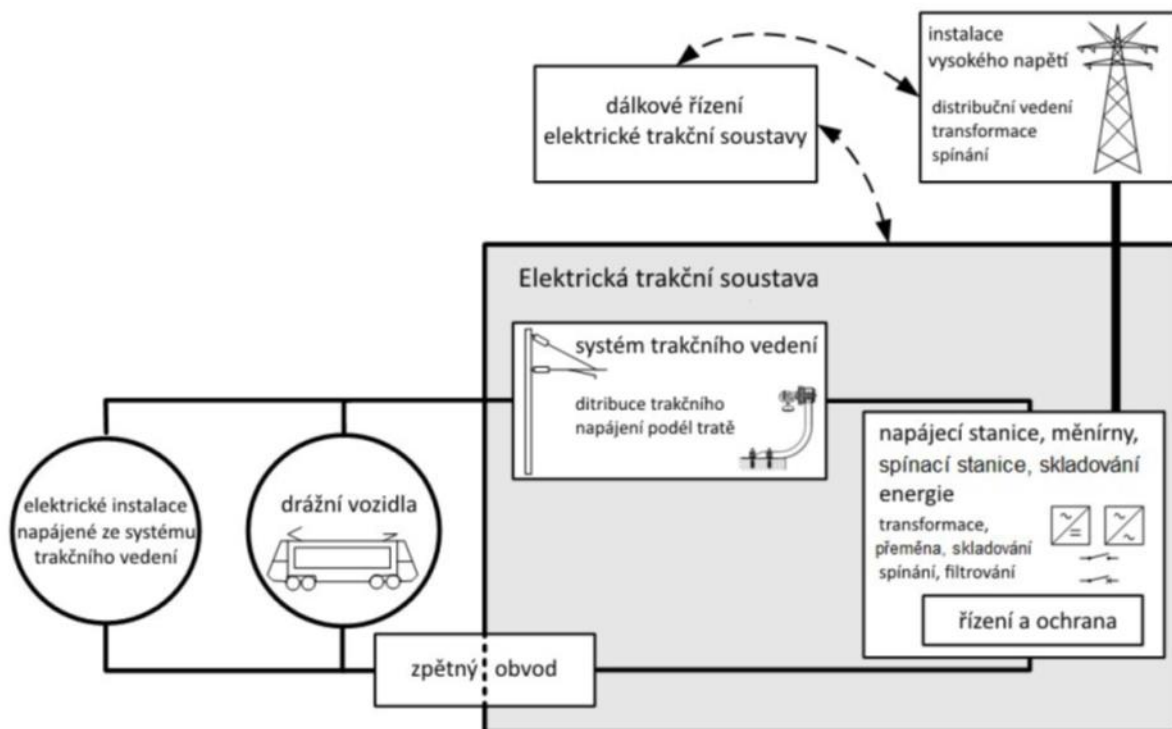
Elektrická trakční zařízení jsou zařízení, která přeměňují, rozvádějí a spotřebovávají elektrickou energii určenou pro trakční účely.

Elektrická trakční zařízení se dělí na [1][2]:

- pohyblivá trakční zařízení, tj. elektrická trakční zařízení hnacích vozidel nebo jednotek
- pevná trakční zařízení, tj. pevně zabudovaná trakční zařízení, která nelze bez jejich demontáže přemísťovat. Patří sem AC i DC napájecí stanice, spínací stanice, trakční vedení, ale i převozná trakční zařízení, jako např. převozná měnirny apod.

2.2 Charakteristika elektrických trakčních soustav

Napájení drážních vozidel a některých elektrických zařízení je zajištěno elektrickou trakční soustavou (ETS). Je to soustava pevných trakčních zařízení, která řídí, převádí a přenáší elektrickou energii do vlaků a dalších zařízení podél trati přes systém trakčního vedení a zpětný obvod. Součásti typické elektrické trakční soustavy a její hlavní rozhraní jsou zobrazeny na obr. 1.



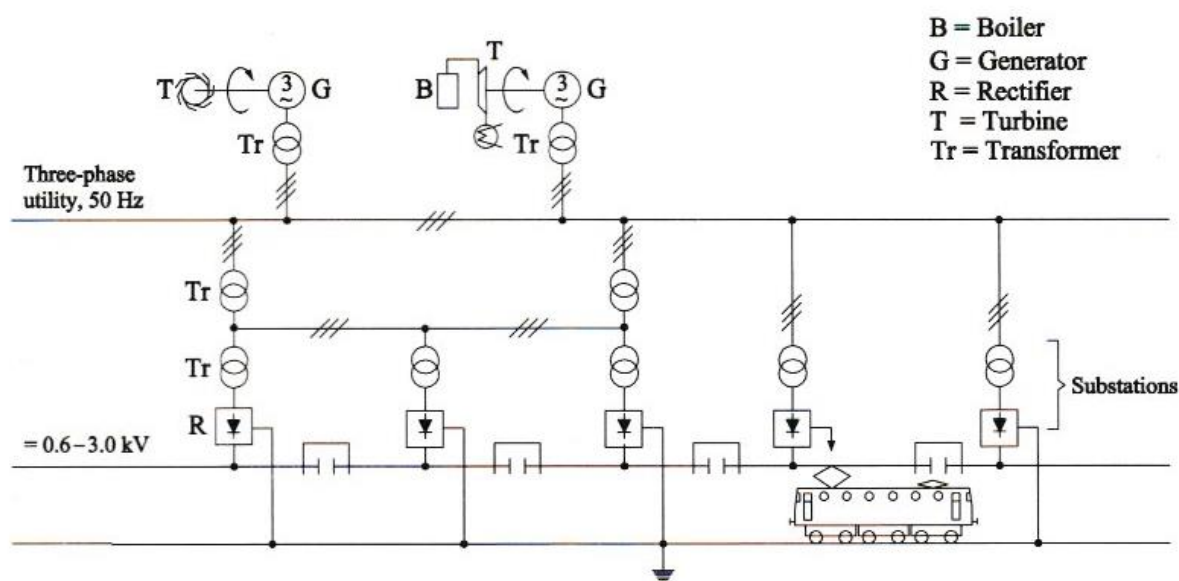
Obr. 1 Součásti typické elektrické trakční soustavy a její hlavní rozhraní. Převzato z [10].

Podle druhu napětí se trakční soustavy dělí na:

- stejnosměrné (DC) trakční soustavy

- střídavé (AC) trakční soustavy

Jmenovitá napětí DC trakčních soustav se postupem času ustálila na hodnotách 600 V, 750 V, 1500 V a 3000 V. DC trakční soustavy o jmenovitém napětí 600 V a 750 V se používají zejména pro napájení tramvajových a trolejbusových tratí a pro napájení tratí metra. Pro napájení pražského metra je použita soustava DC 750 V. Soustavy DC 1500 V jsou využívány ve světě pro napájení železničních drah, lehkou příměstskou a městskou kolejovou dopravu a rovněž pro trati metra (Valencie, Kobe) [19]. Soustavy DC 3000 V se používají pro klasické i vysokorychlostní železniční tratě. Pro nově plánované evropské DC trakční soustavy pro tramvaje a místní dráhy mají jmenovitá napětí soustav odpovídat hodnotám 750 V, 1500 V nebo 3000 V [7]. Kromě těchto napěťových hladin je v Evropě i ve světě používáno mnoho jiných. Jedno z možných uspořádání DC trakční soustavy je uvedeno na obr. 2.



Obr. 2 Možné uspořádání DC trakční soustavy. Převzato z [21].

DC trakční soustavy jsou převážně provozovány se záporným pólem připojeným na jízdní kolejnice. Charakteristickým rysem DC soustav je možnost oboustranného napájení úseku trakčního vedení z přilehlých trakčních měníren (TM). Tím dochází k rozdělení vlakem odebíraného trakčního proudu mezi tyto měnírny a v důsledku toho ke snížení úbytků napětí v trakčním obvodu. Vzhledem k tomu, že zpětný trakční proud je veden jízdními kolejnicemi, dochází vlivem poměrně nízkého odporu mezi jízdními kolejnicemi a zemí ke vzniku nežádoucích bludných proudů, které mohou způsobovat elektrochemickou korozi kovových úložných zařízení, armatur, potrubí apod.

Mezi hlavní výhody DC trakčních soustav patří [11]:

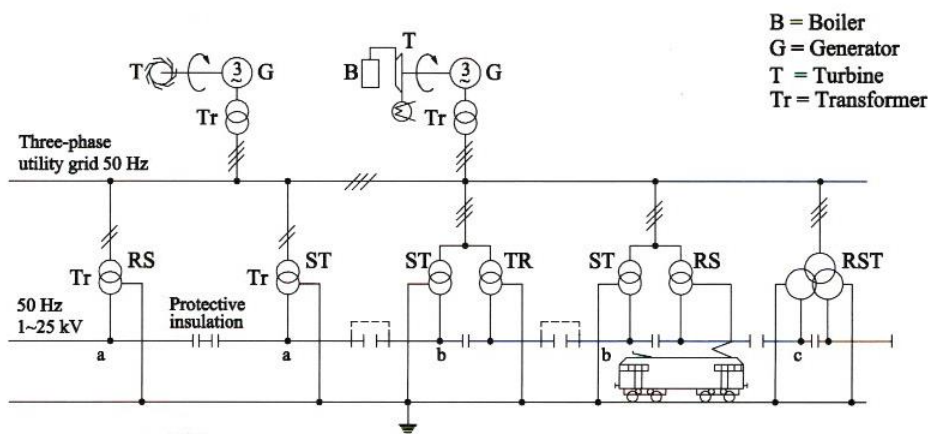
- téměř symetrické zatížení třífázové distribuční soustavy (DS),
- možnost oboustranného napájení elektrického úseku,

- jednoduchá regulace sériového trakčního motoru, jednodušší hnací vozidla,
- snadná rekuperace trakční energie,
- nižší izolační hladiny,
- minimální vliv na souběžná vedení,
- snadná kompenzace jalového výkonu trakční měřírny.

Naopak hlavní nevýhody DC trakčních soustav jsou [11]:

- vysoké proudové hodnoty dané nižšími jmenovitými napětími,
- složitější napájecí stanice,
- nutnost hustší sítě napájecích stanic s ohledem na úbytky napětí a proudovou zatížitelnost vedení,
- zhášení oblouku při přechodových jevech (zejména u soustavy DC 3 kV),
- existence bludných proudů s nežádoucími účinky.

AC trakční soustavy bývají zpravidla jednofázové, v Evropě se používají zejména soustavy 25 kV, 50 Hz, 25/50 kV, 50 Hz a 15 kV, $16\frac{2}{3}$ Hz. Kmitočet 50 Hz je dán kmitočtem distribuční soustavy. Kmitočet $16\frac{2}{3}$ Hz pochází ze začátku 20. století. Byl zvolen pro zlepšení komutace tehdy používaných trakčních komutátorových motorů. Jedná se o 1/3 frekvence 50 Hz, která byla realizována pomocí rotačních měničů na bázi šestipólového synchronního motoru a dvoupólového alternátoru. Tento kmitočet se používá dodnes, např. v Německu, Rakousku, Švýcarsku a ve skandinávských zemích. Trakční soustava 15 kV, $16\frac{2}{3}$ Hz má zpravidla vlastní jednofázové přenosové vedení vysokého napětí, které je nezávislé na třífázové distribuční soustavě. AC napájecí trakční soustavy se využívají především pro napájení vysokorychlostních a klasických železničních tratí, ale v současné době roste využití soustavy 25 kV AC, 50 Hz i pro napájení metra, a to především v asijských velkoměstech (Peking, Čcheng-tu). Také u AC soustav se ve světě vyskytují i jiná jmenovitá napětí a kmitočty [11] [18]. Na obr. 3 je vyobrazeno možné uspořádání AC trakční soustavy 25 kV, 50 Hz.



Obr. 3 Možné uspořádání AC trakční soustavy 25 kV, 50 Hz. Převzato z [21].

Trakční soustava 15 kV, 16 $\frac{2}{3}$ Hz umožňuje oboustranné napájení trakčního vedení, stejně jako u DC soustav. Oproti tomu oboustranné napájení trakčního vedení u soustavy 25 kV, 50 Hz není možné, napájení musí být řešeno jednostranně. Důvodem je, že napájení jednotlivých trakčních transformátorů této soustavy je zpravidla provedeno z různých fází třífázové distribuční soustavy 110 kV.

Hlavní výhody AC trakčních soustav jsou [11]:

- vyšší napětí umožňují přenášet větší výkon,
- relativně nízké ztráty ve vedení, a tedy možnost použití menších průřezů vodičů,
- větší vzdálenost mezi napájecími stanicemi (vzdálenost mezi transformovnyami 40 až 60 km),
- jednodušší provedení napájecích stanic oproti DC soustavám,
- možnost dvoustranného napájení (pouze u ETS 15 kV, Hz),
- bezproblémová rekuperace (pouze u ETS 15 kV, 16 $\frac{2}{3}$ Hz),
- nezávislost na celostátní energetické DS (pouze u ETS 15 kV, 16 $\frac{2}{3}$ Hz).

Mezi hlavní nevýhody patří [11]:

- u ETS 15 kV, 16 $\frac{2}{3}$ Hz nutnost budovat samostatnou vn soustavu nebo TT s měniči frekvence,
- u ETS 25 kV, 50 Hz nesymetrické zatížení třífázové DS dodavatele energie,
- nutnost řešit zpětné vlivy na DS u ETS 25 kV, 50 Hz (požadavky na dodržení hodnoty účinníku, omezení harmonických odebíraného proudu).

Trakční napětí kolísá v čase v závislosti na mnoha faktorech, např. vlivem kolísání napětí napájecí distribuční sítě, zvýšením napětí při rekuperaci trakční energie do trakční sítě při brzdění vlaků, nebo vlivem současně odebíraného výkonu vlaky a odpovídajícími úbytky napětí. Jmenovitá napětí DC a AC elektrických trakčních soustav standardizovaná organizací CENELEC a jejich přípustné mezní hodnoty jsou uvedena v tab. 1.

Tab. 1 Jmenovitá napětí trakčních soustav a jejich přípustné mezní hodnoty [7]

Elektrizační soustava	Nejnižší krátkodobé napětí $U_{\min 2}$ (V)	Nejnižší trvalé napětí $U_{\min 1}$ (V)	Jmenovité napětí U_n (V)	Nejvyšší trvalé napětí $U_{\max 1}$ (V)	Nejvyšší krátkodobé napětí $U_{\max 2}$ (V)
DC (stř.hodn.)	400	400	600	720	800
	500	500	750	900	1 000
	1 000	1 000	1 500	1 800	1 950
	2 000	2 000	3 000	3 600	3 900
AC (ef. hodn.)	11 000	12 000	15 000	17 250	18 000
	17 500	19 000	25 000	27 500	29 000

Volba proudové soustavy a velikosti napětí trakční soustavy úzce souvisí s požadovanou přepravní kapacitou trati. Přibližné limity přepravní kapacity pro jednotlivé proudové soustavy a trakční napětí jsou uvedeny v tab. 2. Limitujícím faktorem nižších napěťových hladin jsou zejména úbytky napětí ve vedeních trakčního proudu.

Tab. 2 Použití trakčních soustav v závislosti na přepravní kapacitě trati [19]

Trakční soustava	Přepravní kapacita v jednom směru (osob / hod.)
750 V DC	< 50 000
1 500 V DC	< 80 000
25 000 V AC	> 80 000

2.3 Součásti elektrických trakčních soustav

Elektrické trakční soustavy se skládají zpravidla z těchto subsystémů:

- trakčních napájecích stanic (souborů zařízení pro napájení trakčního vedení, ve kterých je napětí primární napájecí sítě, v některých případech i kmitočet, transformováno na napětí a kmitočet trakčního vedení),
- spínacích stanic (souborů zařízení, ze kterých mohou být jednotlivé úseky napájeny elektrickou energií, zapínány nebo vypínány nebo podle potřeby vzájemně propojovány),
- systému trakčního vedení (soustava zařízení zajišťující dodávku elektrické energie z TNS do elektrických hnacích vozidel, zahrnuje systémy trolejového vedení a systémy přívodní kolejnice),
- zpětného obvodu (veškerých vodičů, které tvoří cestu pro zpětný trakční proud, jako např. jízdnic kolejnic, zpětných kolejnic, zpětných vodičů a kabelů) [10].

3 Uspořádání a napájení elektrických trakčních soustav metra

3.1 Uspořádání elektrických trakčních soustav metra

Nejčastěji používaná uspořádání elektrických trakčních soustav metra jsou

- AC systém s trolejovým vedením,
- DC systém s trolejovým vedením,
- DC systém s přívodní kolejnicí a zpětným obvodem tvořeným jízdnicí a kolejkami,
- DC systém s přívodní a zpětnou kolejnicí.

Trakční soustavy s vrchním trolejovým vedením se používají pro soustavy s vyššími napětíovými hladinami (>1500 V DC, >15 kV AC), které nemohou být kvůli předepsaným vzdušným vzdálenostem umístěny ve spodní části průjezdného profilu. Proto bývají prostorově, a tím i investičně náročnější. Zpravidla vyžadují větší průměry tunelů než soustavy s proudovou přívodní kolejnicí. Vzhledem k horší přístupnosti trolejového vedení pro provádění údržby jsou i nákladnější na údržbu.

DC systémy s přívodní proudovou kolejnicí mohou být v závislosti na použitém trakčním napětí realizovány jak s přívodní kolejnicí ve spodní části průjezdného profilu, tak s vysoko zavěšenou přívodní kolejnicí na způsob trolejového vedení. Významným faktorem může být i estetické hledisko. Systémy s přívodní kolejnicí ve spodní části působí méně rušivě než systémy s trolejovým vedením nebo s vysoko zavěšenou přívodní kolejnicí a mohou být z tohoto důvodu v některých lokalitách upřednostňovány [19].

DC systémy se samostatnými přívodní a zpětnou kolejnicí se používají především u systémů s vozidly na pryžových kolech, kde nemůže být trakční proud veden jízdnicí a kolejkami, případně se tyto soustavy používají pro zamezení šíření bludných proudů (Londýn).

Ze všech ve světě používaných trakčních soustav metra tvořily v r. 2013 téměř 75 % trakční soustavy s přívodní kolejnicí, z toho cca $\frac{2}{3}$ s trakčním napětím 750 V DC, proto je v této práci dále pojednáno pouze o stejnosměrných trakčních soustavách s přívodní kolejnicí.

3.2 Funkce napájecí stanice metra

Funkcí napájecí stanice metra je přeměna, spínání, řízení, ochrana a blokování elektrického trakčního napájení, jmenovitě:

- elektricky propojit napájecí hladiny,
- zajistit dostatečné galvanické oddělení napájecích hladin, je-li to nutné,
- transformovat úroveň napětí nebo hodnoty frekvence,
- zajistit, aby úseky systému trakčního vedení mohly být podle potřeby připojeny nebo odpojeny,
- vyvolat akci, např. vypnutí, výstrahu, jestliže provozní veličiny, např. napětí nebo proudy jsou mimo přípustný rozsah,

- umožnit přenos energie rekuperačního brzdění do napájecí sítě tam, kde je to možné,
- ukládat trakční výkon do zařízení pro skladování energie tam, kde je to možné,
- spínáním řídit elektrickou konfiguraci elektrické trakční soustavy podle potřeb drážního provozu [10].

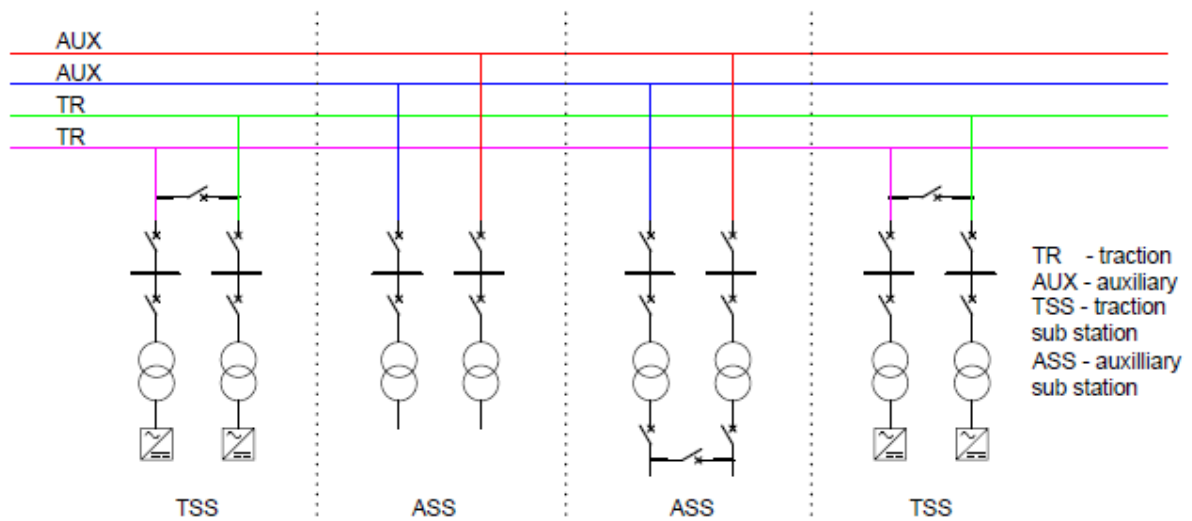
3.3 Napájení DC trakční soustavy metra ze sítě vn

Uspořádání nadřazené napájecí sítě vn má významný vliv na spolehlivost trakčního napájení metra. Pro dosažení vysoké pohotovosti a spolehlivosti tohoto napájení je nutné zřizovat okružní, nebo zdvojené paprskové napájecí vedení, přičemž tato vedení musí být napájena z nezávislých zdrojů. Volba způsobu napájení TNS vychází z následujících kritérií [19]:

- požadavek na oddělení napájení trakce od napájení netrakčních zařízení (tj. obvykle vlastní spotřeby stanic – osvětlení, větrání, pohony eskalátorů apod.), a to jak v normálních, tak v poruchových stavech
- umístění napájecích TNS (z obou konců úseku, nebo z jednoho místa někde uprostřed)
- požadavek na zálohování jednotlivých prvků TNS (např. transformátorů, usměrňovačů apod.)
- požadovaná spolehlivost systému trakčního napájení a vlastní spotřeby
- požadovaná kvalita energie v síti vlastní spotřeby
- investiční a provozní náklady

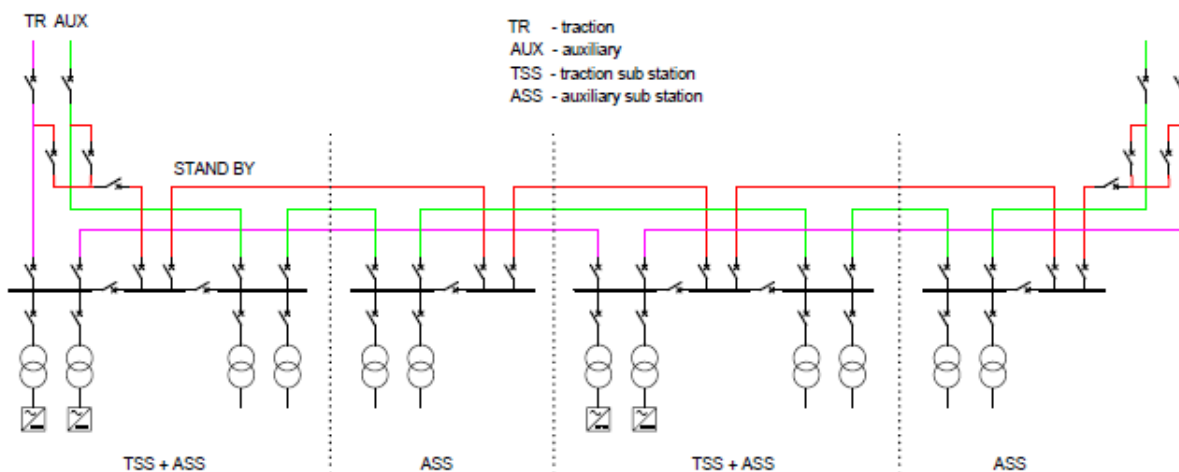
Na základě výše uvedených kritérií se používá ve světě několik různých způsobů napájení TNS ze sítě vn. Odlišnosti lze najít v počtu redundantních napájecích kabelových vedení, v počtu TNS napájených z jednoho přívodního kabelového vedení, typu použité vn napájecí sítě (okružní, paprsková). Příklady schémat napájení elektrických stanic ze sítě vn jsou:

- čtyřkabelové schéma (Bangalore, Bangkok, Kalkata) – trakční měnírny jsou napájeny dvěma nezávislými přívody, rozvodny netrakčních odběrů (vlastní spotřeby) jsou napájeny odděleně dalšími dvěma nezávislými přívody. Toto schéma reprezentuje vysokou míru spolehlivosti a flexibility při napájení trakční a netrakční zátěže, napájení těchto zátěží je odděleno jak v případě normálního provozu, tak v případě poruchy. Dimenzování kabelových vedení a nastavení ochran pro trakční a netrakční odběry je jednoznačně dáno velikostí těchto odběrů a je možno dosáhnout vysoké selektivity vypínání při všech poruchových stavech. Příklad čtyřkabelového schématu je zobrazen na obr. 4.



Obr. 4 Příklad čtyřkabelového schématu vn napájení [20], upraveno

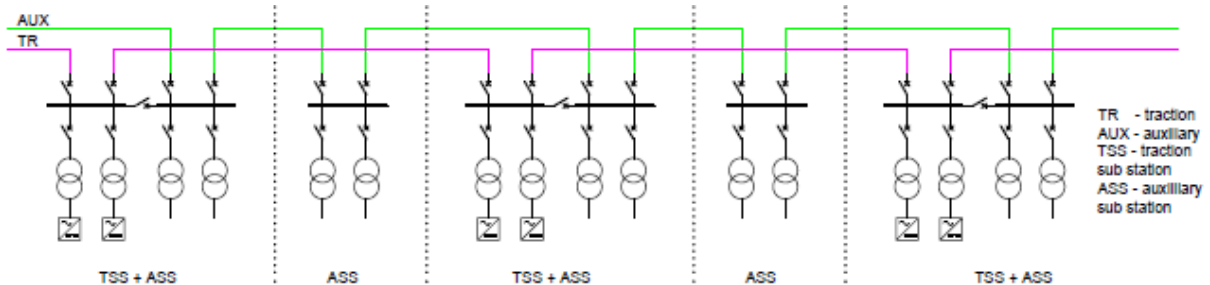
- tříkabelové schéma – jedno kabelové vedení napájí TNS, druhé kabelové vedení napájí distribuční stanice vlastní spotřeby, třetí kabelové vedení zálohuje první nebo druhé vedení v případě poruchy, přičemž jeho dimenzování musí odpovídat zatíženějšímu z obou těchto vedení. Nastavení ochran třetího vedení se zpravidla liší podle toho, které vedení v případě konkrétní poruchy zálohuje. Tříkabelové schéma vyžaduje větší množství vn vypínačů v elektrických stanicích a složitější řídicí algoritmy, obvykle bývá investičně náročnější oproti čtyřkabelovému schématu, kdy náklady na větší počet vn vypínačů mohou být vyšší, než je úspora z menšího počtu vn vedení. Příklad tříkabelového schématu je vyobrazen na obr. 5.



Obr. 5 Příklad tříkabelového schématu vn napájení [20], upraveno

- dvoukabelové schéma s oddělenou trakční a netrakční částí – trakční i netrakční části jsou napájeny každá samostatným nezávislým kabelovým vedením. Obě kabelová vedení musí být dimenzována na součet zatížení trakční i netrakční části. V případě výpadku jednoho z přívodů

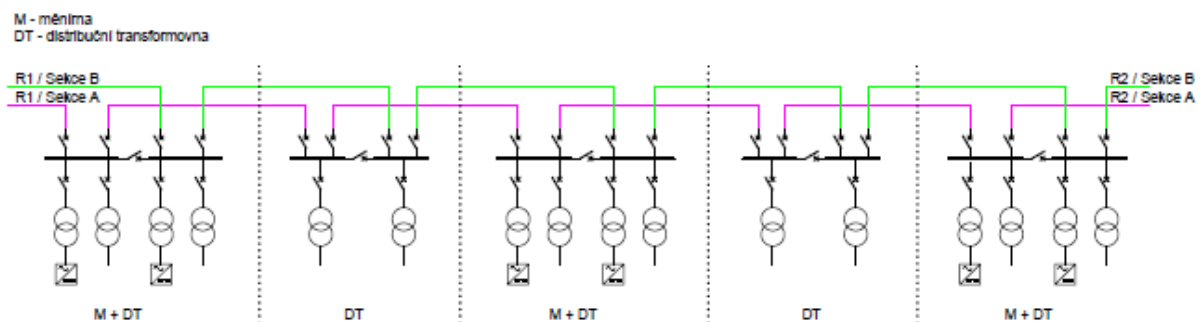
je možné pomocí podélné spojky tyto části propojit, to ale neplatí ve stanicích bez trakčních měření, kde je pouze vlastní spotřeba stanice. V takových místech hrozí při poruše na hlavních přípojnicích úplný výpadek napájení. Řešením může být podélné rozdělení přípojnic podélnou spojkou v těchto stanicích. Příklad uvedeného schématu je vyobrazen na obr. 6.



Obr. 6 Příklad dvoukabelového schématu vn napájení [20], upraveno

- dvoukabelové schéma se společnou trakční a netrakční částí (Praha) – vždy jedním kabelovým vedením je napájena polovina společné trakční i netrakční spotřeby. Obě kabelová vedení jsou dimenzována každé na plnou dodávku trakčního i netrakčního výkonu, tak aby v případě výpadku jednoho vedení bylo druhé vedení schopno přenést celý požadovaný výkon.

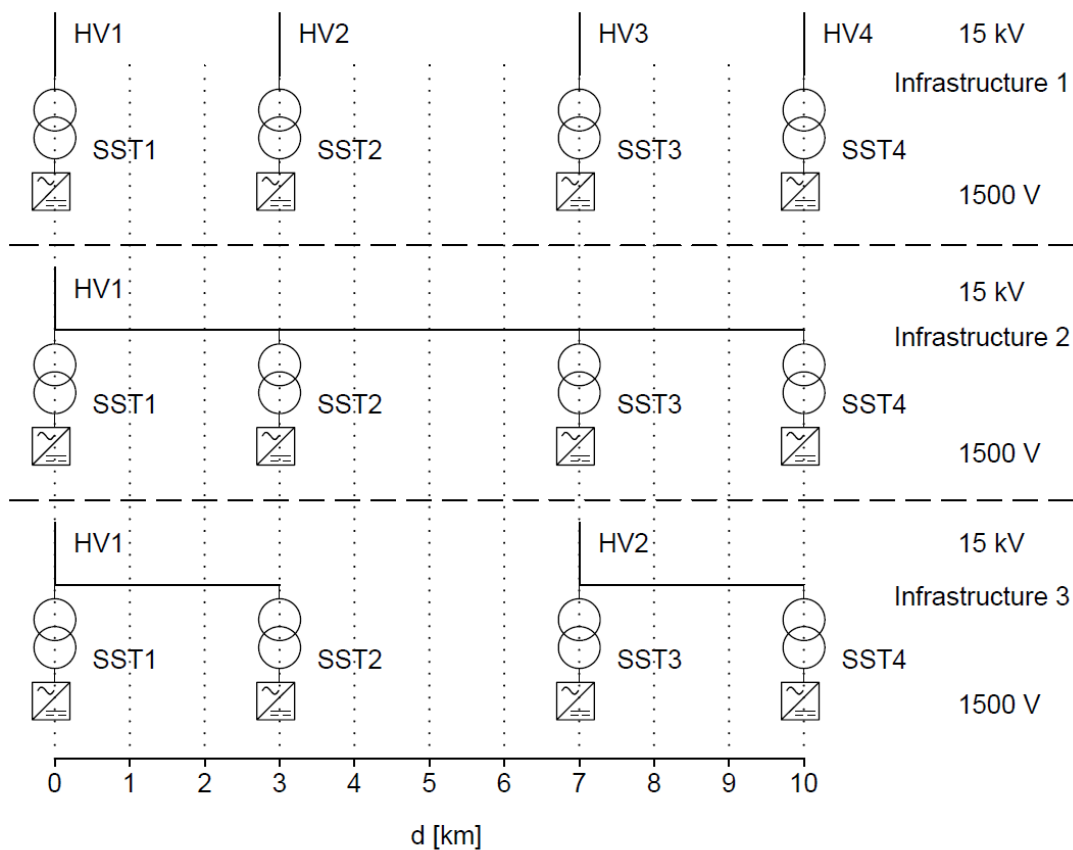
Schématické zobrazení varianty dvoukabelového uspořádání se společnou trakční a netrakční částí používané v pražském metru je uvedeno na obr. 7. Úsek je napájen ze dvou stran dvěma samostatnými přívodními vedeními (označenými sekce A, sekce B) z nezávislých rozvodů PRE, zde označených R1 a R2, v každé rozvodně PRE napájenými vždy ze dvou samostatných transformátorů 110 / 22 kV. Aby nedošlo k paralelnímu propojení rozvodů R1 a R2, je v úseku provedeno dělení, při běžném provozu tak, aby napájecí rozvodny R1 a R2 byly zatíženy přibližně rovnoměrně. V případě potřeby je možné zvolit jinou konfiguraci napájení, např. napájení sekce A celého úseku z jedné rozvodny, např. R1, a celé sekce B z druhé rozvodny R2.



Obr. 7 Příklad dvoukabelového schématu napájení vn používaný v pražském metru [14], upraveno

Uspořádání vn AC napájecí sítě má vliv i na velikost trakčního napětí v kterémkoliv místě tratě a na toky výkonu jednotlivými TNS. V praxi je zpravidla jedním vn přívodem napájeno více TNS, protože napájecích vn distribučních transformoven bývá méně, než je počet TNS. Lze uvažovat následující případy, viz obr. 8 [20]:

- každá DC TNS (SST1 až SST4) má samostatný přívod z AC sítě vn (HV1 až HV4) – v tomto případě je každá TNS na úrovni AC napájení nezávislá,
- větší počet DC TNS je napájen zasmyčkováním ze společného přívodu z AC sítě vn (HV1) – chování jednotlivých TNS na úrovni AC napájení je ovlivněno ostatními TNS,
- menší počet TNS je napájen zasmyčkováním ze společného přívodu z AC sítě vn, přívodních vedení je více (HV1, HV2), ale zároveň méně, než je počet TNS – kompromisní řešení mezi oběma předchozími.

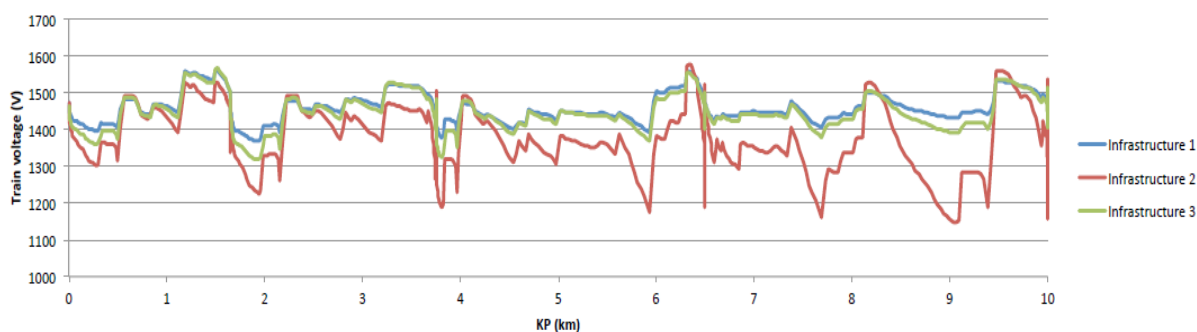


Obr. 8 Příklady uspořádání AC vn napájení TNS. Převzato z [20], upraveno.

Na obr. 9. je vyobrazen příklad hodnot trakčního napětí v uvažovaném úseku trati o délce 10 km při průjezdu jednoho vlaku pro typy napájecí infrastruktury uvedené na obr. 8. Z průběhů napětí je zřejmé, že v případě uspořádání č. 2 dochází podél trati k podstatně většímu úbytku trakčního napětí oproti ostatním dvěma uspořádáním a tento úbytek roste se zvětšující se vzdáleností vlaku od TNS s přívodním AC vn vedením (SST1). Je zřejmé, že úbytek trakčního napětí je v tomto případě výrazně ovlivněn

uspořádáním vn napájecí síti. Výpočty úbytku trakčního napětí podél trati proto musí v určitých případech respektovat i uspořádání vn napájecí síti TNS.

Úbytky napětí v trakční soustavě souvisí také s rozložením výkonu dodávaným jednotlivými TNS. Schopnost TNS dodávat potřebný výkon vlaku, nacházejícímu se dále od měřírny, je u měřírny s nižším napětím nižší, než u měřírny s vyšším napětím. Měřírna s nižším napětím tak bude méně zatížená, naopak měřírna s vyšším napětím může být přetěžována, což je nežádoucí. V těchto případech je potom nutné provést korekci napětí naprázdo všech měření, tak aby tok výkonu z jednotlivých TNS byl rovnoměrný, například nastavením správné odbočky na primárním vinutí trakčního transformátoru. Uspořádání vn napájecí síti AC má tedy vliv i na rozložení výkonu v trakční soustavě [19].



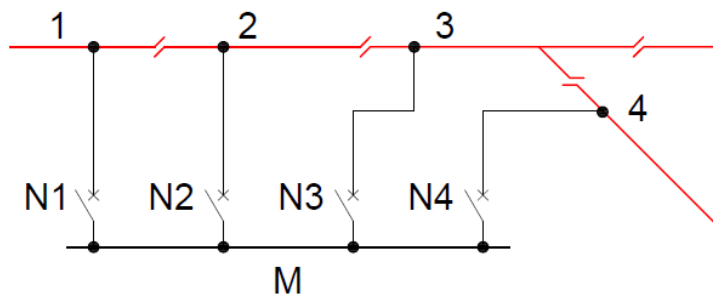
Obr. 9 Trakční napětí vlaku jako funkce vzdálenosti. Převzato z [20].

3.4 Napájení elektrických úseků DC trakční sítě metra

Z důvodů snadnější lokalizace poruch, usnadnění údržby, zajištění bezpečnosti pracovníků a rovněž pro omezení napájecích proudů se trakční DC napájecí síť rozděljuje na samostatné elektrické úseky, které jsou od sebe navzájem elektricky izolované [16][17]. Podle způsobu dělení a napájení jednotlivých úseků rozlišujeme tyto způsoby napájení:

a) Jednostranné, soustředěné napájení

Každý elektrický úsek je napájen samostatně a jednostranně vlastním napáječem. Schéma napájení je zobrazeno na obr. 10.



Obr. 10 Jednostranné, soustředěné napájení, M – trakční měřírna, N – napáječ. [16], upraveno.

Tento způsob napájení se používá v rozlehlých kolejištích uzlových stanic drah a v depech metra.

Výhodou jednostranného soustředěného napájení je jednoduchá a spolehlivá lokalizace poruch, přehledné proudové cesty a dobré využití vodivého průřezu, zejména v úsecích s větším sklonem. Nevýhodou je omezení délky napájených elektrických úseků z důvodu jednostranného napájení, případně dlouhé napájecí kabely.

b) Dvojstranné rozložené napájení

Každý elektrický úsek je napájen z obou konců z přilehlých trakčních měřičů, viz obr. 11.



Obr. 11 Dvojstranné rozložené napájení, M – trakční měřič, NR – napěťové rychlovypínače.
Převzato z [16], upraveno.

Toto uspořádání umožňuje při stejném průřezu vedení a dopravním zatížení tratě, vzhledem k úbytku napětí a proudu napáječů, prodloužit délku elektrického úseku na dvojnásobek oproti jednostrannému napájení.

Na dvojkolejných tratích se napájí každá kolej samostatně. Tím je dosažena jejich vzájemná energetická nezávislost, možnost výluky napájení pouze jedné z kolejí a snadnější vyhledávání poruch.

Vhodné umístění napájecích stanic je v místech úsekového dělení, protože napájecí vedení všech přilehlých elektrických úseků je v tomto případě nejkratší.

Napájení elektrického úseku musí být v případě potřeby vypnuto vždy z obou stran. Pro zajištění bezpečného vypnutí elektrického úseku z obou stran při poruše se zavádí elektrická vazba napáječů. Vypínač, který je blíže k místu poruchy vypíná jako první a zároveň vydává povel k vypnutí odpovídajícímu vypínači stejného úseku v protilehlé napájecí stanici.

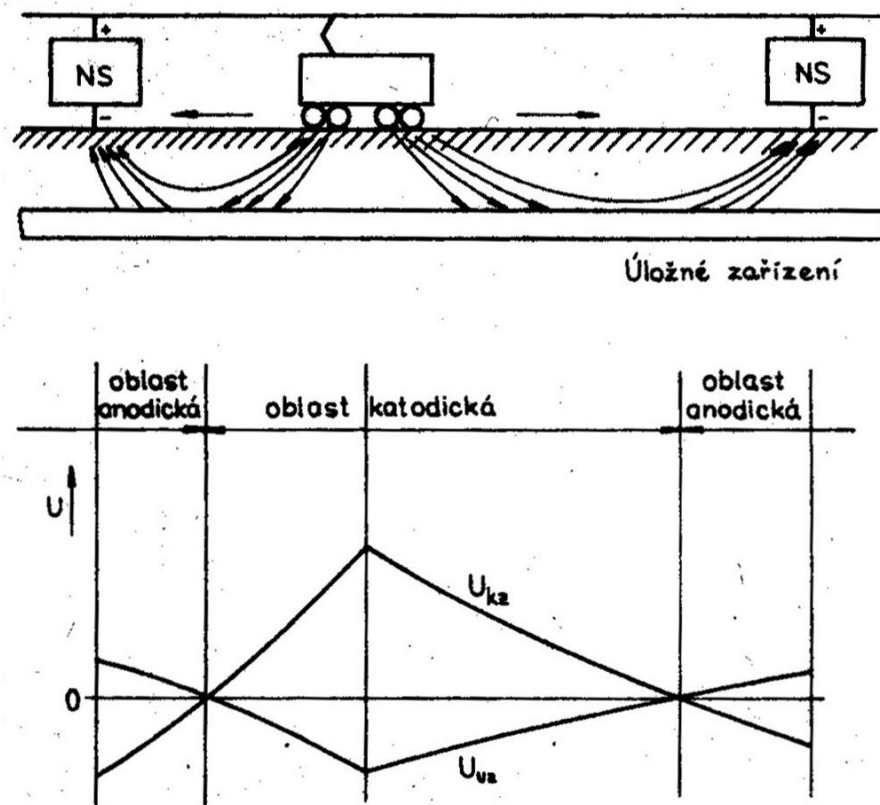
Dvojstranné rozložené napájení je hlavním způsobem napájení trakčního vedení na tratích pražského metra.

3.5 Zpětný obvod a problematika bludných proudů u DC trakčních soustav

Zpětné trakční proudy v DC trakční soustavě procházejí kolejnicemi, které zpravidla nejsou dokonale izolované od země. Část zpětného proudu proto vniká do země, tuto část nazýváme bludným

proudem. Bludné proudy jsou takové části zpětného proudu trakční soustavy, které alespoň část své dráhy protékají jinou cestou než zpětným obvodem. Zatímco bludné proudy produkované AC trakčními soustavami nezpůsobují zřejmé korozní účinky, bludné proudy pocházející z DC proudových soustav mohou na kovových konstrukcích (tzv. úložných zařízeních), uložených vodivě v půdě nebo ve vodě, způsobit vážné poškození materiálu korozí. Typicky se jedná o potrubí, kabely s kovovými pláští, uzemňovací soustavy, ocelové výztuže v betonu. Bludné proudy mohou dosahovat velkých hodnot, dle znečištění a geometrického uspořádání kolejového lože mohou tvořit 15 až 60 % celkového zpětného trakčního proudu.

Na obr. 12 je vyobrazeno schéma obvodu trakčního proudu se znázorněním průběhu napětí kolej - zem U_{kz} a průběhu napětí úložné zařízení - zem U_{uz} .



Obr. 12 Schéma obvodu trakčního proudu a průběhy napětí kolej - zem U_{kz} a úložné zařízení - zem U_{uz} , NS je trakční napájecí stanice. Převzato z [13].

Na úložných zařízeních lze vysledovat tato potenciálová pásma:

- katodické pásmo, v němž bludný proud vstupuje z okolní půdy do úložného zařízení,
- neutrální pásmo, ve kterém bludný proud úložným zařízením protéká,
- anodické pásmo, kde bludný proud z úložného zařízení vychází do okolní půdy.

Úložná zařízení v katodické a neutrální oblasti nejsou elektrochemickou korozí ohrožena, poškození vzniká v místech, kde bludné proudy z těchto zařízení vystupují, v anodické oblasti. Dochází zde k elektrolytickému rozpouštění kovu, které se projevuje bodovým proděravěním.

Množství vyloučeného kovu se řídí Faradayovým zákonem:

$$M = A \cdot I \cdot t$$

- kde M je množství vyloučeného kovu v kg;
 A je elektrochemický ekvivalent kovu v $\text{kg} \cdot \text{A}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$;
 I je proud odtékající místem poruchy do země v A;
 t je čas působení v s;

V tab. 3 jsou uvedeny elektrochemické ekvivalenty nejpoužívanějších kovů. Je z ní zřejmé, že z hlediska elektrochemické koroze je nejdolnějším materiálem hliník, nejohroženějším materiálem naopak olovo.

Tab. 3 Elektrochemické ekvivalenty nejpoužívanějších kovů [13]

Kov	Sn	Al	Cu	Pb	Fe
A [$\text{kg} \cdot \text{A}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$] $\cdot 10^{-9}$	338,6	93,9	332,3	1073,3	289,3

Konstrukce, jimiž bludné proudy procházejí, mohou zároveň samy ovlivnit jiné blízké konstrukce. DC trakční soustava proto musí být navrhována tak, aby redukovala bludné proudy tekoucí do země s cílem snížit nebo vyloučit nežádoucí účinky na cizích konstrukcích. Schematické znázornění toku bludných proudů v oblasti působení DC trakční soustavy je ukázáno na obr. 13.

Kromě provozních proudů jsou pro velikost bludného proudu nejdůležitější tyto parametry:

- měrná svodová vodivost kolejnic a ostatních částí zpětného obvodu,
- vzdálenost TNS,
- podélný odpor jízdnic kolejnic,
- vzdálenost kolejnicových a mezikolejových spojení.

Způsoby, které mají být použity k omezení šíření bludných proudů, sestávají převážně z:

- úpravy napájecí soustavy
- zlepšení (vodivosti) zpětného vedení,
- izolace zpětného vedení od země a uzemněných kovových konstrukcí a jiných železničních soustav [4][5][6].

4 Elektromagnetická kompatibilita drážních zařízení

Elektromagnetickou kompatibilitou je označována schopnost zařízení nebo systému fungovat vyhovujícím způsobem ve svém elektromagnetickém prostředí bez vytváření nepřijatelného elektromagnetického rušení pro cokoliv v tomto prostředí.

Dráha je komplexní instalace s pohybujícími se zdroji elektromagnetické energie, která při svém provozu používá elektrické systémy pracující s velkými výkony a současně obsahuje elektronické výkonové systémy charakterizované svou nelinearitou. S tím jsou spojeny elektromagnetické jevy, které mohou negativně ovlivnit provoz ETS a z ní napájených zařízení, případně se tyto mohou negativně jednosměrně či vzájemně ovlivňovat.

Rozlišujeme tyto prvky vzájemného ovlivnění [3][12]:

a) prvek ovlivňující (způsobuje elektromagnetické rušení), např.

- statický měnič jako spotřebič jalové složky příkonu
- statický měnič jako zdroj proudových harmonických
- elektrická trakční zařízení
- napájecí DS

b) prvek ovlivňovaný (trpící elektromagnetickým rušením), např.

- kolejové obvody zabezpečovacího zařízení,
- jiné elektrické lokomotivy v tomtéž napájecím úseku trakčního vedení,
- napájecí DS,
- místní energetický rozvod napájený souběžně s trakčním vedením,
- souběžná sdělovací vedení.

Elektromagnetický šum, který se může vyskytovat v drážních aplikacích, může být způsoben vnitřními nebo vnějšími zdroji. Mezi vnitřní zdroje elektromagnetického šumu patří např. napájecí vedení TNS nebo trakční vedení, výzbroj elektrických lokomotiv a vícevozových jednotek. K vnějším zdrojům rušení patří např. sousední drážní systémy, rádiové vysílače vč. mobilních telefonů nebo průmyslové závody rušící energetickou napájecí síť.

TNS se vůči napájecí straně chová jako zdroj vyšších proudových harmonických složek produkovaných trakčním diodovým usměrňovačem, vůči trakčnímu vedení se chová jako zdroj napěťových vyšších harmonických složek produkovaných stejným trakčním usměrňovačem. Z hlediska vzniku vyšších harmonických složek primárního proudu (příp. napětí) usměrňovací skupiny je v problematice EMC důležitou veličinou celkové harmonické zkreslení proudu (příp. napětí), definované jako:

$$THD = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{25} I_h^2}}{I_1}$$

kde I_1 je efektivní hodnota základní harmonické ($h = 1$)

I_h je efektivní hodnota jednotlivých složek řádu h

Podle počtu pulzů usměřovače se v primárním proudu vyskytují pouze vyšší harmonické složky určitých řádů:

$$h = k \cdot p \pm 1$$

kde k je celé číslo

p je počet pulzů usměřovače

Z uvedeného vyplývá, že v primárním proudu šestipulzního usměřovače se vyskytují pouze vyšší harmonické složky řádu 5, 7, 11, 13, 17, 19, 23, 25 atd., kdežto u dvanáctipulzního usměřovače se vyskytují pouze složky řádu 11, 13, 23, 25 atd.

V pražském metru byly doposud provozovány pouze šestipulzní trakční usměřovací skupiny, nově se při rekonstrukcích stanic zavádí používání dvanáctipulzních usměřovacích skupin.

5 Zařízení trakční měřírny metra

5.1 Prvky trakční měřírny metra

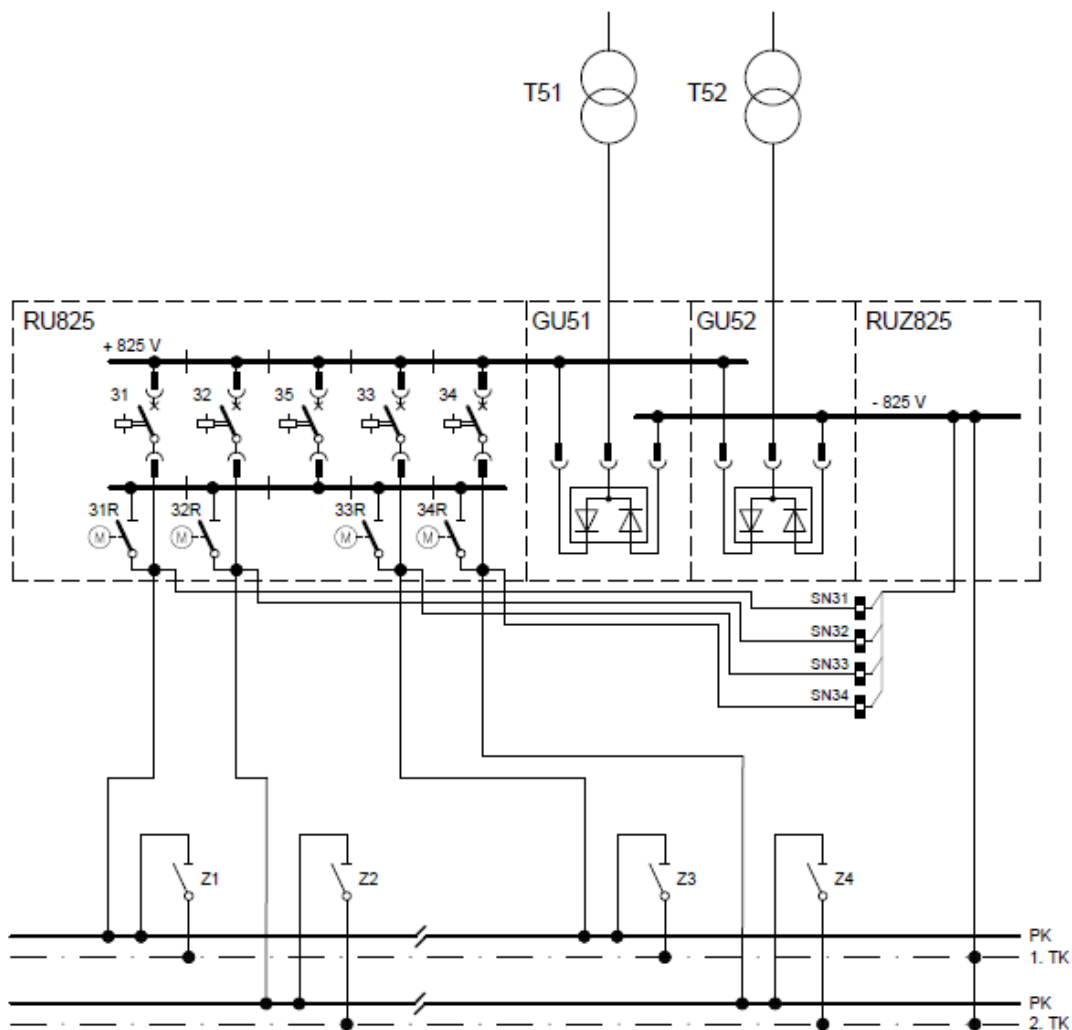
Zařízení měření metra zpravidla zahrnuje:

- usměrňovací skupinu(y), tj. soubor všech zařízení od svorek vstupní strany usměrňovacího transformátoru až po výstupní svorky usměrňovače, tedy trakční transformátor, trakční usměrňovač a případné kabelové vedení,
- spínací zařízení, např. vypínače, odpojovače, úsekové spínače a uzemňovače,
- kabely a napájecí sběrny,
- svodiče přepětí,
- rezistory, kondenzátory a tlumivky,
- zařízení pro omezení zkratového proudu,
- řídicí a ochranná zařízení,
- měřicí zařízení, jako napěťové a proudové převodníky,
- zařízení omezující napětí,
- instalace a zařízení pro připojení ke zpětnému obvodu nebo zemi,
- zařízení pro skladování energie, pokud je použito [10].

Trakční měřírny a z nich napájené trakční obvody mohou být uspořádány rozličnými způsoby podle způsobu provozu drážní dopravy, místních standardů a zvyklostí apod.

Principiální schéma měřírny a trakčního obvodu pražského metra je vyobrazeno na obr. 14. Měřírna obsahuje dva trakční transformátory (T51, T52), dva šestipulzní křemíkové diodové usměrňovače (GU51, GU52), rozváděč usměrněného napětí 825 V DC (RU825) s napáječovými rychlovypínači a rozváděč zpětných kabelů (RUZ825). Usměrňovače i napěťové rychlovypínače jsou ve výsuvném provedení. V provozu je vždy pouze jedna usměrňovací skupina, druhá skupina slouží jako 100 % záloha. Usměrňovače se zapínají nebo vypínají zapnutím nebo vypnutím vn vypínače v primárním přívodu příslušného trakčního transformátoru. Základní napáječové rychlovypínače č. 31 – 34 napájejí jednotlivé elektrické úseky trati. Vypínače jsou vybaveny odpojovači, které umožňují spojení vývodu s pomocnou přípojnici. Za normálních okolností jsou odpojovače rozpojeny. Rezervní rychlovypínač 35 napájí přímo pomocnou přípojnici a slouží jako náhradní vypínač v případě poruchy některého ze základních vypínačů. Při poruše některého základního vypínače se příslušný odpojovač zapne a připojí kabelové vývody k pomocné přípojnici. Měření přítomnosti napětí zajišťují snímače SN31 – SN34.

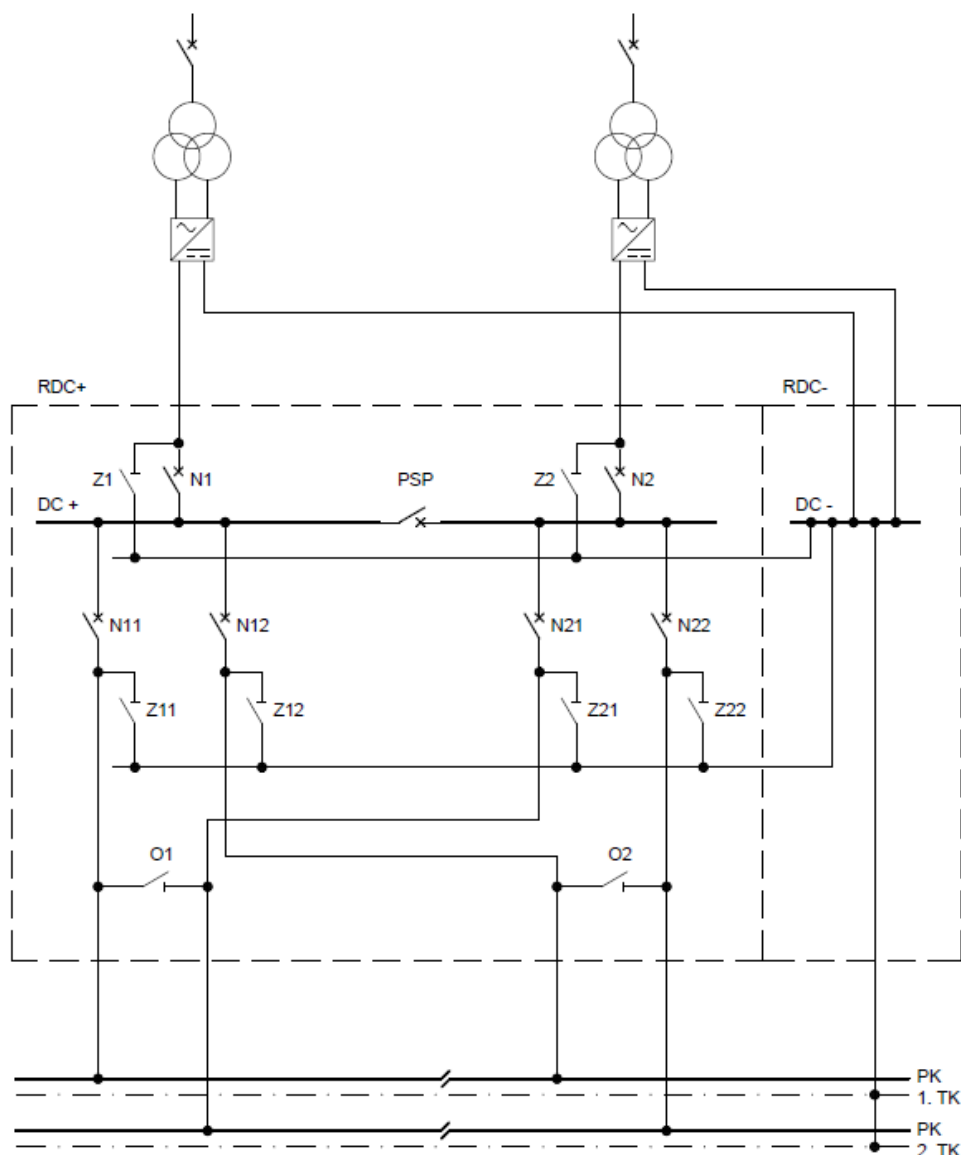
Pro zajištění bezpečného odpojení trakčního napětí od přívodní kolejnice jsou na trati umístěny uzemňovače (Z1 – Z4), které zkratují kabelové vedení od napáječe na pojížděnou kolejnici, která je připojena k minusovému pólu trakčního usměrňovače prostřednictvím rozváděče zpětných kabelů.



Obr. 14 Principiální schéma měřicího a trakčního obvodu pražského metra

Toto uspořádání měřicího a trakčního obvodu je obvyklé u drah metra v zemích bývalého východního bloku.

Příklad jiného uspořádání je vyobrazen na obr. 15. Dvě dvanáctipulzní usměrňovací skupiny pracují současně do oddělených přípojnic, které je možné propojit podélnou spojkou (PSP). Přípojnice je možné od usměrňovačů odpojit rychlovypínači N1, N2 a zkratovat je uzemňovači Z1 a Z2 umístěnými ve společné rozváděčové skříni. Jednotlivé kabelové vývody je možné zkratovat uzemňovači Z11, Z12, Z21, Z22 po odpojení příslušných rychlovypínačů, které jsou také umístěny v rozváděči stejnosměrného napětí. Na trati se tak nemusí nacházet žádné uzemňovače, veškeré zkratování je realizováno v tomto rozváděči. V případě poruchy vývodového rychlovypínače je kabelové vedení propojeno na funkční vypínač prostřednictvím odpojovačů O1 nebo O2.



Obr. 15 Příklad možného uspořádání měničny a trakčního obvodu

5.1.1 Transformátory

Trakční transformátory pro napájení trakčních soustav musejí splňovat požadavky technické normy ČSN EN 50329. Transformátory mohou být v olejovém nebo suchém provedení. V TNS metra se z důvodu požární bezpečnosti podzemních prostor používají výhradně suché transformátory.

Pro napájení šestipulzních usměrňovačů se používají třífázové trakční transformátory s jedním primárním a jedním sekundárním vinutím, např. zapojení Yd1. Pro napájení dvanáctipulzních usměrňovačů se používají třífázové trakční transformátory s jedním primárním vinutím a dvěma sekundárními vinutími, z nichž jedno je zapojeno do hvězdy a druhé do trojúhelníka, např. zapojení Yd1y0. Fázory příslušných fází obou sekundárních napětí jsou tak vůči sobě posunuty o 30° elektrických.

Pro skupiny dvanáctipulzních trakčních usměrňovačů se používají přednostně tři typy transformátorů:

- transformátor se třemi vinutími s jedním primárním vinutím a dvěma sekundárními vinutími s těsnou vazbou, s činitelem vazby $K \geq 0,9$. Tyto transformátory se přednostně používají pro dvanáctipulzní sériové spojení můstků;
- transformátor se třemi vinutími s jedním primárním vinutím a dvěma sekundárními vinutími s volnou vazbou: činitel vazby $0,2 \leq K \leq 0,9$. Tyto transformátory se používají pro dvanáctipulzní paralelní zapojení můstků s mezimůstkovým transformátorem (tlumivkou) pro zamezení vzájemné komutace diod obou můstků;
- transformátor se čtyřmi vinutími se dvěma primárními vinutími a dvěma nespřaženými sekundárními vinutími: činitel vazby $K < 0,2$. Tyto transformátory se používají pro dvanáctipulzní paralelní zapojení můstků bez mezimůstkové tlumivky.

Činitel vazby je definován jako

$$K = \frac{X_p}{X_p + X_s}$$

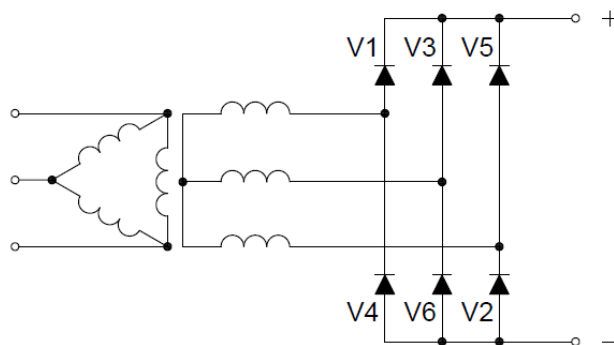
kde je X_p rozptylová reaktance vztahující se k primárnímu vinutí;

X_s rozptylová reaktance vztahující se ke každému ze sekundárních vinutí.

Z hlediska oteplení se transformátory navrhují pro konkrétní přednostní třídu provozu. Trakční transformátory v TNS pražského metra se konstruují pro atypickou třídu provozu X, odvozené od třídy provozu V. Předepsaná proudová hodnota zatížení je 100 % trvale, 150 % po dobu 2 hodin, 200 % po dobu 60 sekund s dodatečným požadavkem na zatížení 300 % po dobu 15 sekund [9][23]. Je-li pro výrobce transformátoru ekonomicky výhodnější použití normalizované třídy provozu, lze použít transformátor pro třídu provozu VI, která stanovuje přísnější požadavky na přetížení transformátoru (300 % po dobu 1 minuty).

5.1.2 Trakční usměrňovače

V TNS metra se pro napájení trakčního vedení nejčastěji používají šestipulzní nebo dvanáctipulzní usměrňovače. Principiální schéma usměrňovací skupiny s šestipulzním usměrňovačem je zobrazeno na obr. 16.



Obr. 16 Zapojení šestipulzního usměrňovače

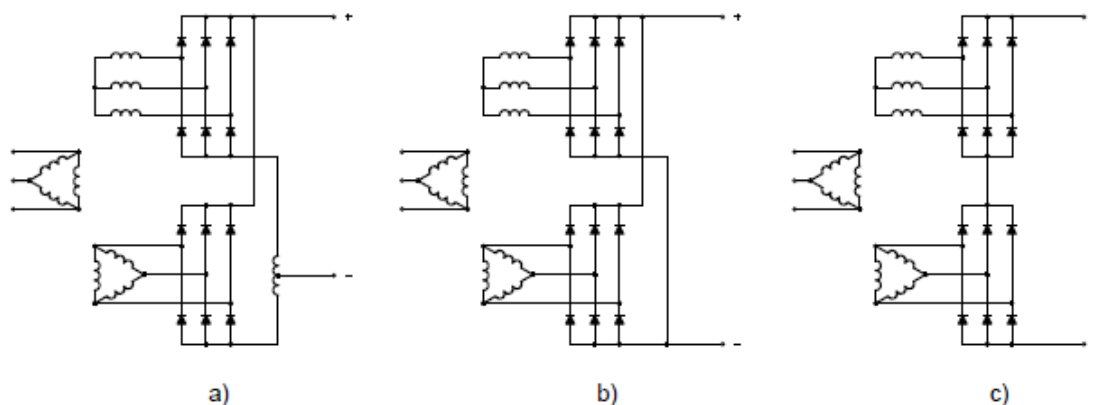
Mezi hlavní výhody usměrňovacích skupin s šestipulzními usměrňovači patří:

- jednodušší konstrukce transformátorů a usměrňovačů,
- menší rozměry a hmotnost transformátorů a usměrňovačů.

Mezi nevýhody naopak patří:

- vysoký obsah 5. a 7. harmonické v proudu odebíraném z DS,
- větší zvlnění výstupního DC napětí.

Nevýhody šestipulzních usměrňovačů jsou do značné míry eliminovány použitím 12pulzních usměrňovačů. Použitím transformátoru s dvěma sekundárními vinutími s napětím jednotlivých fází posunutým vůči sobě o 30° , napájejících dva společně pracující šestipulzní usměrňovače, dochází k významné eliminaci 5. a 7. harmonické v odebíraném primárním proudu, v jehož spektru se objevuje nejnižší harmonická 11. řádu, následovaná harmonickými řádu 13, 23, 25 atd. protože 5. a 7. harmonické proudy prvního a druhého usměrňovač jsou navzájem posunuty o 180° a navzájem se odečítají. Naopak harmonické proudy 11. a 13. řádu obou usměrňovačů se algebraicky sčítají. V praxi je možné použít několik možných způsobů zapojení můstků, viz obr. 17.



Obr. 17 Varianty zapojení dvanáctipulzní usměrňovací skupiny

Na obr. 17 a) je zobrazena varianta paralelního spojení s mezimústkovou tlumivkou, která se používá u usměrňovací skupiny s transformátory s úzkou vazbou pro zabránění vzájemné komutace diod mezi oběma usměrňovacími můstky. Tlumivka zajišťuje, že jsou oba můstky navzájem nezávislé. Při použití transformátoru bez vazby ($K < 0,2$) se mezimústková tlumivka nepoužívá, viz obr. 17 b). U paralelních spojení můstků dodává každý můstek polovinu celkového usměrněného proudu, diody proto mohou být dimenzovány na nižší proud. Na obr. 17 c) je zobrazeno uspořádání ze dvou sériově zapojených usměrňovacích můstků. Protože oběma můstky protéká celkový usměrněný proud, musí být diody dimenzovány na tento celkový proud, případně musí být řazeno v každé větvi paralelně. Tato skutečnost má dopad do rozměrů usměrňovače, rovněž ztráty oproti paralelnímu spojení můstků jsou výrazně větší.

Shrneme-li hlavní výhody 12pulsní usměrňovací skupiny, patří mezi ně následující:

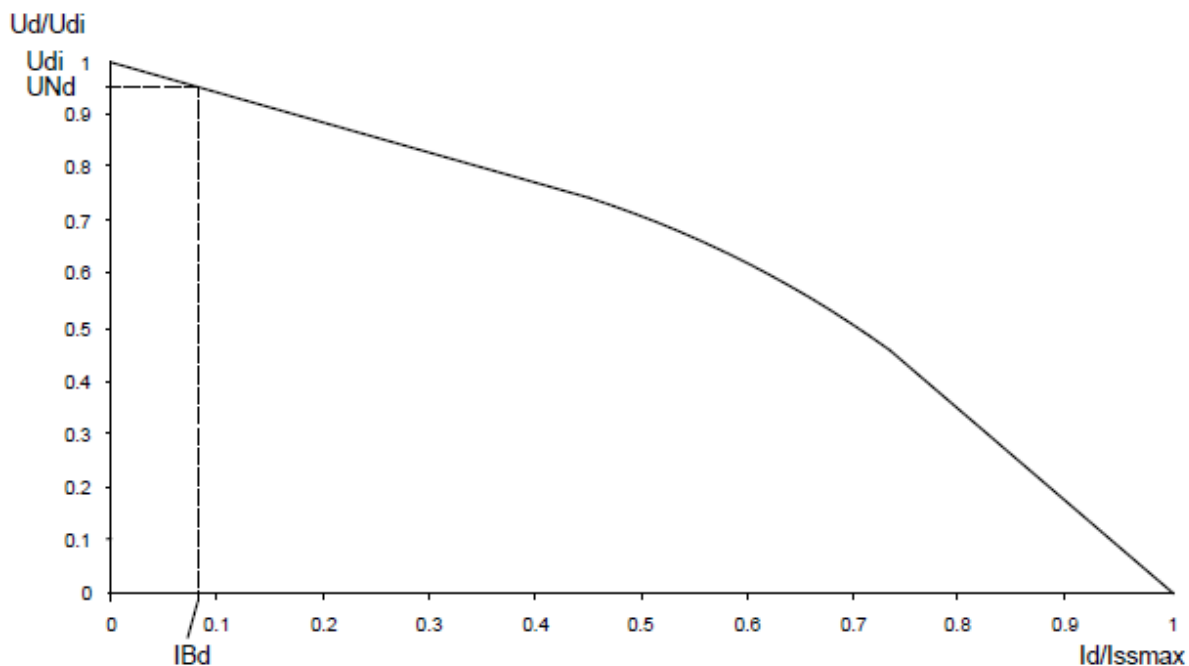
- vyšší vyhlazení sekundárního DC napětí,
- eliminace 5. a 7. harmonické primárního proudu

Mezi nevýhody patří:

- složitější usměrňovače a transformátory,
- větší rozměry a hmotnost transformátorů a usměrňovačů.

5.1.3 Usměrňovací skupina

Trakční transformátor společně s trakčním usměrňovačem a propojovacím vedením tvoří usměrňovací skupinu. Usměrňovací skupina s neřízeným usměrňovačem je charakterizována tzv. vnější charakteristikou, která vyjadřuje závislost mezi odebíraným proudem usměrňovače a jeho výstupním napětím. Typická charakteristika neřízené usměrňovací skupiny je zobrazena na obr. 18. Z vnější charakteristiky lze rovněž stanovit závislost ustáleného zkratového proudu usměrňovací skupiny na vzdálenosti od místa zkratu. Pro konkrétní výpočet se používá konkrétní charakteristika, případně charakteristiky závislé na činiteli vazby transformátoru, viz kapitolu 7.4.



Obr. 18 Typická charakteristika usměrňovací skupiny [8]

Na obr. 18 znamenají jednotlivé veličiny:

I_{Bd} základní stejnosměrný proud usměrňovací skupiny

I_d okamžitý proud usměrňovací skupiny

U_d DC napětí při proudu I_d

U_{di} ideální stejnosměrné napětí naprázdno usměrňovací skupiny

U_{Nd} jmenovité DC napětí usměrňovací skupiny při proudu I_{Bd}

I_{SSmax} teoretická maximální hodnota trvalého DC zkratového proudu při $L_d = \infty$, kde L_d je indukčnost zatěžovacího obvodu usměrňovací skupiny

Tvar charakteristiky u dvanáctipulzních zapojení závisí na činiteli vazby K trakčního transformátoru. Pro transformátory bez vazby ($K \approx 0$) je úbytek napětí lineární přibližně do poměru proudu $I_d / I_{SSmax} = 0,45$, u transformátoru s úzkou vazbou ($K = 1$) je pak úbytek napětí lineární přibližně do poměru proudu $I_d / I_{SSmax} = 0,35$.

Použití vnější charakteristiky bude ilustrováno při výpočtu parametrů usměrňovací skupiny.

6 Zásady návrhu trakčních měníren metra

Pro napájení systémů klasického metra se v drtivé většině používají DC trakční soustavy, AC soustavy spíše výjimečně.

Metro a jeho součásti se považují za dráhu a drážní zařízení. V České republice je metro klasifikováno zákonem č. 266/1994 Sb. jako dráha speciální. Základní podmínky pro provoz a stavbu metra stanovují vyhlášky č. 173/1995 Sb. a 177/1995 Sb., kterými se vydává dopravní, resp. stavební a technický řád metra.

Poměrně podrobné požadavky na technické provedení trakčních zařízení metra a trakčního vedení metra uvádějí ČSN 33 3510 z r. 1983, resp. ČSN 33 3525 z r. 1997. Obě uvedené technické normy vycházejí ze stavu tehdejší techniky a z toho důvodu jsou již v mnoha oblastech přežitě. Při návrhu trakčního zařízení měníren a trakčního vedení metra je proto nutné vycházet i z převzatých evropských technických norem pro drážní zařízení, z nichž velká část byla vydána po r. 2010.

Při procesu návrhu trakční měnírny je nutné vycházet z následující požadavků na:

- požadované dopravní výkony,
- investiční a provozní náklady,
- energetickou úspornost,
- bezpečnost a ochranná opatření,
- systém napájení z DS dodavatele energie,
- kvalitu odebírané energie z DS dodavatele energie,
- technické parametry souprav vlaků,
- zvolené elektrické parametry elektrické trakční soustavy,
- automatizované dispečerské řízení
- normální a abnormální provozní stavy,
- EMC,
- požární bezpečnost podzemních a nadzemních prostor,
- průjezdný průřez trati a zavážecí cesty,
- provoz a údržbu specifikovaná provozovatelem,
- stavební a prostorová omezení.

Z výše uvedených požadavků lze stanovit postup návrhu, který může být následující:

- 1) provedení energetické simulace s danými parametry provozu (pokud se jedná o novou trasu nebo změnu těchto parametrů),
- 2) stanovení topologie TM a elektrických parametrů jednotlivých prvků TM,
- 3) volba ochranných opatření proti systémovým nebezpečím,
- 4) výběr vhodných pevných trakčních zařízení,

- 5) dimenzování zvolených pevných trakčních zařízení pro normální i abnormální a poruchové provozní stavy, s ohledem na:
- úbytky napětí v trakčním obvodu,
 - předpokládané zatížení a dovolené oteplení,
 - předpokládané zkratové proudy.
- 6) stanovení nastavení ochran,
- 7) stanovení požadovaných zkoušek,
- 8) stanovení požadavků na provoz a údržbu jednotlivých zařízení.

7 Návrh trakčního zařízení měnirny metra

7.1 Požadované vlastnosti

Na základě požadavků norem a provozních zkušeností jsou požadovány tyto vlastnosti zařízení:

- Usměrňovací skupina
 - jednoduchá redundance usměrňovací skupiny, jedna usměrňovací skupina v provozu, druhá tvoří 100 % zálohu
 - dvanáctipulzní neřízený diodový usměrňovač, výsuvné provedení
 - zatížitelnost GU5x 100 % trvale, 150 % 2 hod, 200 % 1 min, 300 % 15 s
 - provedení s přirozeným vzduchovým chlazením ve skříňovém provedení
- DC napáječový rozváděč RU825
 - provedení s pomocnou přípojnici nebo s pomocnou přípojnici a příčným dělením s odpojovačem.
 - vybavení rychlo vypínači ve výsuvném provedení a odpojovači s propojením na pomocnou přípojnici, zajištění záměnnosti rychlo vypínačů
 - vybavení skříňe rezervního napáječe rychlo vypínačem napájejícím pomocnou přípojnici
 - rychlo vypínače s funkcí měření odporu linky, ochrannou proti přetížení ve dvou stupních, zkratu a podpětí
 - zajištění funkce vazby napáječů s napáječi v sousední měnirně napájející stejný úsek

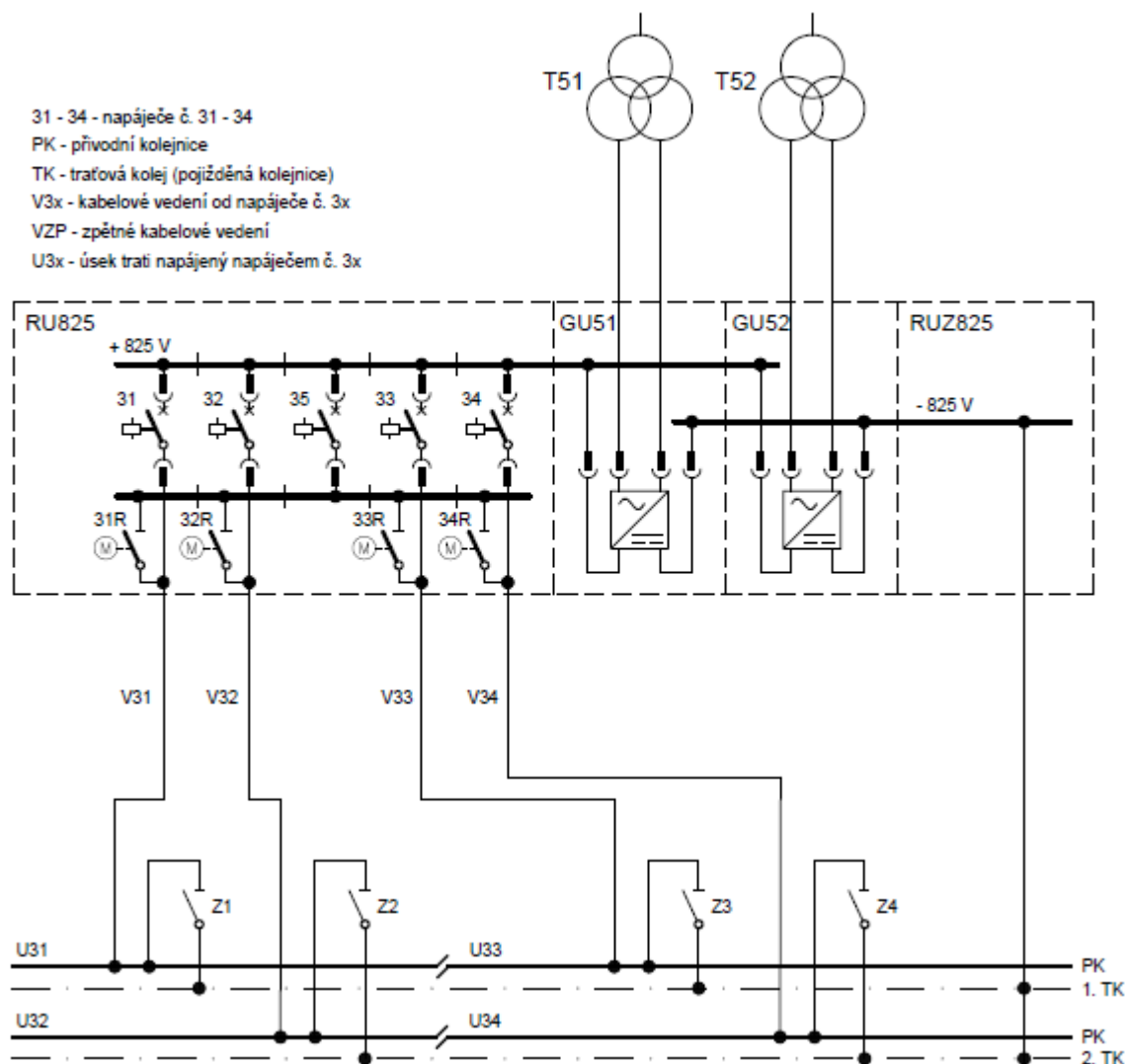
7.2 Výchozí předpoklady a zadané hodnoty

Situace napájení trakčního obvodu pro návrh je uvedena na obr. 19.

Návrh trakčního zařízení měnirny metra provedu pro tato zařízení:

- usměrňovací skupinu,
- kabelová vedení
 - vývodní kabelová vedení od rychlo vypínačů k přívodní kolejnici
 - zpětné kabelové vedení od pojížděné kolejnice do rozváděče zpětných kabelů

Primární napětí usměrňovací skupiny	U_{n_prim}	22 kV
Jmenovité napětí měnirny	U_{Nd}	825 V / soustava IT
Jmenovitý DC proud usměrňovací skupiny	I_{Bd}	3000 A
Měrný odpor přívodní kolejnice	r_{PK}	7 mΩ/km
Měrný odpor dvou paralelních kolejnic vč. propojek	r_{JK}	22 mΩ/km



Obr. 19 Situační schéma napájení

7.3 Dimenzování trakčního transformátoru

Dimenzování transformátoru vychází z požadovaného jmenovitého napětí DC trakční soustavy a výkonu na DC straně usměrňovací skupiny. Výkon usměrňovací skupiny se stanovuje energetickými výpočty pro konkrétní parametry tratě a grafikon dopravy, které nejsou předmětem této práce.

Napětí obou sekundárních vinutí transformátoru je z důvodu standardizace a záměnnosti pevně zadáno $U_{sec} = 0,65 \text{ kV}$. U dvanáctipulzní usměrňovací skupiny, složené z paralelní kombinace dvou můstkových šestipulzních usměrňovačů, napájených transformátorem se dvěma sekundárními vinutími, dodává každý z obou můstků polovinu usměrňovaného proudu I_{Bd} . Potřebný výkon transformátoru se určí [16]:

Stanoví se proudy obou sekundárních vinutí

$$I_{\text{secY}} = \sqrt{\frac{2}{3}} \cdot \frac{I_{\text{Bd}}}{2}$$

$$I_{\text{secD}} = \frac{\sqrt{2}}{3} \cdot \frac{I_{\text{Bd}}}{2}$$

kde I_{secY} proud sekundárního vinutí zapojeného do hvězdy

I_{secD} proud sekundárního vinutí zapojeného do trojúhelníku

Po dosazení

$$I_{\text{secY}} = \sqrt{\frac{2}{3}} \cdot \frac{I_{\text{Bd}}}{2} = \sqrt{\frac{2}{3}} \cdot \frac{3000\text{A}}{2} = 1225\text{A}$$

$$I_{\text{secD}} = \frac{\sqrt{2}}{3} \cdot \frac{I_{\text{Bd}}}{2} = \frac{\sqrt{2}}{3} \cdot \frac{3000\text{A}}{2} = 707\text{A}$$

Potřebný výkon transformátoru je potom

$$P = 3 \cdot \left(I_{\text{secY}} \cdot \frac{U_{\text{sec}}}{\sqrt{3}} + I_{\text{secD}} \cdot U_{\text{sec}} \right) = 3 \cdot \left(1225\text{A} \cdot \frac{650\text{V}}{\sqrt{3}} + 707\text{A} \cdot 650\text{V} \right) = 2757\text{kW}$$

Jmenovitý DC proud usměrňovací skupiny $I_{\text{Bd}} = 3000\text{ A}$ je stanoven s určitou rezervou, lze proto volit transformátor s $S_n = 2750\text{ kVA}$. V provozu pražského metra se volí standardně napětí nakrátko $u_k = 8\%$, proto je zvoleno i pro tento transformátor. Návrh je proveden pro dvanáctipulzní usměrňovací skupinu bez mezimústkové tlumivky, proto je volen transformátor s činitelem vazby $K < 0,2$. Dle požadavků normy musí být transformátor v provedení s přirozeným vzduchovým chlazením ve skříňovém provedení.

7.4 Výpočet parametrů usměrňovací skupiny

Výpočet parametrů usměrňovací skupiny vychází z postupu uvedeného v ČSN EN 50327/A1. Tento postup umožňuje určit charakteristiky výstupního napětí v závislosti na zatížení usměrňovače a výpočet zkratového proudu na výstupních svorkách usměrňovače. Ve výpočtu není uvažováno omezení zkratových proudů distribuční napájecí sítě, protože zkratový výkon na přípojnicích rozváděče 22 kV v měštině činí 300 - 400 MVA a je oproti výkonu usměrňovačového transformátoru řádově vyšší a lze ho považovat za „tvrdý zdroj“.

Parametry transformátoru:

Třívinitový, spojení Yy0d1

U_n 22 / 0,65 / 0,65 kV

S_n 2750 / 1375 / 1375 kVA

$u_k (x_{P/S})$ 8 % / 8 %

$$K = 0,18$$

Dále se dle výše uvedené normy určí následující hodnoty:

$$e_{xB} \approx u_k = 8 \%$$

$$e_{rB} \approx 0,1 \cdot e_{xB} = 0,8 \%$$

$$d_{xB} = 0,5 \cdot e_{xB} = 4 \%$$

$$d_{rB} = 0,8 \%$$

kde d_{rB} odporový úbytek DC napětí usměrňovací skupiny v procentech U_{di}

d_{xB} indukční úbytek DC napětí usměrňovací skupiny v procentech U_{di}

e_{rB} rezistanční složka poměrného napětí nakrátko transformátoru

e_{xB} indukční složka poměrného napětí nakrátko transformátoru

Následně se vypočítá poměr

$$\frac{I_{Bd}}{I_{SSmax}} = (1 + K) \cdot \sqrt{3} \cdot d_{xB},$$

po dosazení

$$\frac{I_{Bd}}{I_{SSmax}} = (1 + K) \cdot \sqrt{3} \cdot d_{xB} = (1 + 0,18) \cdot \sqrt{3} \cdot 0,04 = 0,0818.$$

Odtud

$$I_{SSmax} = \frac{I_{Bd}}{0,0818} = \frac{3000A}{0,0818} = 36675A.$$

Na charakteristice dle obr. 20 se vyznačí bod č. 1 odpovídající hodnotě $10 \cdot I_{Bd} / I_{SSmax}$ na vodorovné ose a $10 \cdot e_{rB}$ na svislé ose. Bodem č. 1 se z počátečního bodu $[0,0]$ vede přímka. Průsečík této přímky s křivkou $L_d = \infty$ (odpovídající $T_c = \infty$), bod č. 2, udává poměr trvalé hodnoty zkratového proudu I_{SS} / I_{SSmax} a průsečík této přímky s křivkou $L_d = 0$ (odpovídající $T_c = 0$), bod č. 3 udává poměr přechodné hodnoty zkratového proudu k I_{SSmax} při kovovém zkratu na výstupních svorkách usměrňovače.

Z bodu č. 2 se spustí svislice na osu x, ze které se odečte hodnota, v tomto případě 0,944. Potom

$$I_{SS} = 0,944 \cdot I_{SSmax} = 0,944 \cdot 36675A = 34621A.$$

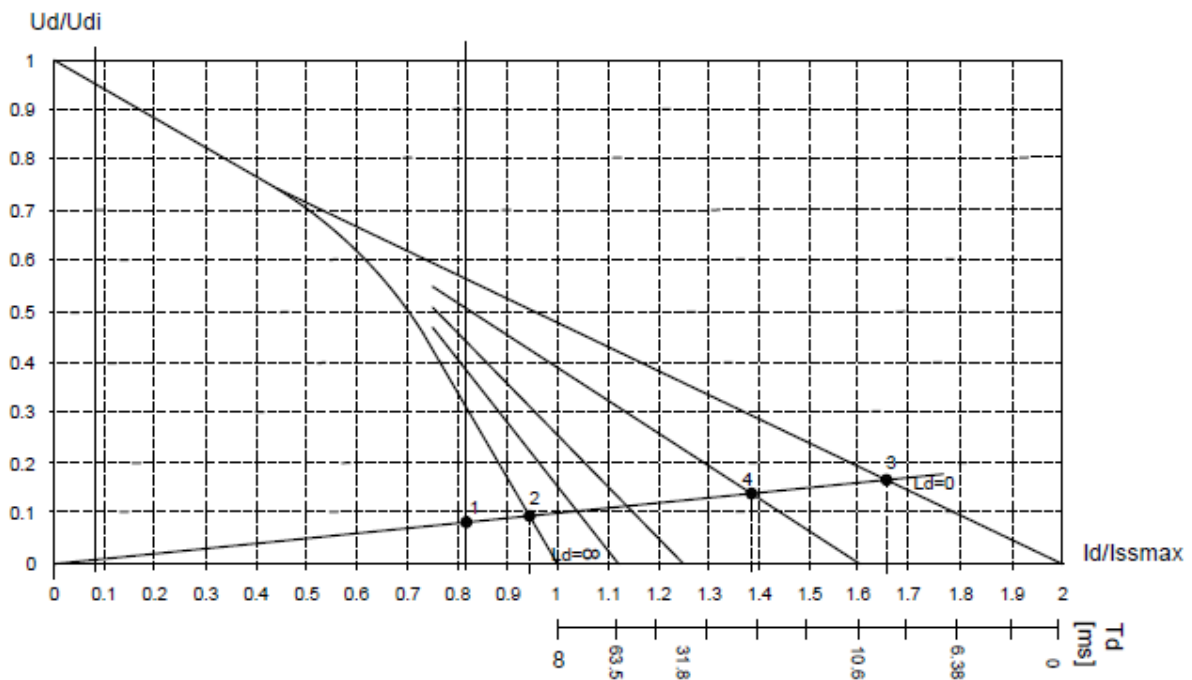
Dále se spustí svislice z bodu č. 3, ze které se opět odečte hodnota, zde 1,657. Aby se získala vrcholová hodnota zkratového proudu \hat{I}_{SS} , je třeba kvůli zvlnění DC proudu násobit tuto hodnotu hodnotou 1,05. Vrcholová hodnota zkratového proudu je potom

$$\hat{I}_{SS} = 1,05 \cdot 1,657 \cdot I_{SS} = 1,05 \cdot 1,657 \cdot 34621A = 60235A .$$

Tuto hodnotu vrcholovou hodnotu zkratového proudu lze očekávat na výstupních svorkách usměrňovače. V navazujícím rozváděči usměrněného napětí lze vzhledem k vnitřním indukčnostem přípojníc očekávat nižší hodnotu zkratového proudu. Tato hodnota se odečte z charakteristiky z průsečíku přímky a křivky odpovídající $T_c = 10$ ms, v tomto případě 1,385.

Vrcholová hodnota zkratového proudu na výstupu DC rozváděče je potom

$$\hat{I}_{SS} = 1,05 \cdot 1,385 \cdot I_{SS} = 1,05 \cdot 1,385 \cdot 34621A = 50348A .$$



Obr. 20 Vnější charakteristika usměrňovací skupiny - postup výpočtu

Dále se určí charakteristiky výstupního DC napětí usměrňovací skupiny U_d v závislosti na odebíraném proudu I_d .

Nejprve se vypočítá stejnosměrné napětí usměrňovací skupiny naprázdno U_{di} .

$$U_{di} = 1,35 \cdot U_{sec} = 1,35 \cdot 650V = 877,5V .$$

Výstupní napětí při konkrétním proudovém zatížení se určí ze vztahu

$$U_{Nd} = [100\% - (d_{xB} + d_{rB})] \cdot U_{di} .$$

Odtud napětí pro základní proud usměrňovací skupiny

$$U_{Nd} = [100\% - (d_{xB} + d_{rB})] \cdot U_{di} = [1 - (0,04 + 0,008)] \cdot 877,5V = 835,4V .$$

Vypočítané napětí je mírně vyšší, než je původně požadované jmenovité napětí 825 V. Je to dáno sekundárním napětím transformátoru $U_{\text{sec}} = 0,65 \text{ kV}$, které je stanoveno z důvodu záměnnosti a standardizace v měnárnách pražského metra. Pro dosažení napětí 825 V by bylo potřeba snížit sekundární napětí transformátoru na cca 644 V.

Výstupní napětí U_d při I_B 150%, 200% a 300% I_{Bd} (dané požadovanou přetížitelností) je potom

$$U_{d150} = [1 - 1,5 \cdot (d_{xB} + d_{rB})] \cdot U_{di} = [1 - 1,5 \cdot (0,04 + 0,008)] \cdot 877,5 = 814,3 \text{ V}$$

$$U_{d200} = [1 - 2 \cdot (d_{xB} + d_{rB})] \cdot U_{di} = [1 - 2 \cdot (0,04 + 0,008)] \cdot 877,5 = 793,3 \text{ V}$$

$$U_{d300} = [1 - 3 \cdot (d_{xB} + d_{rB})] \cdot U_{di} = [1 - 3 \cdot (0,04 + 0,008)] \cdot 877,5 = 751,1 \text{ V}$$

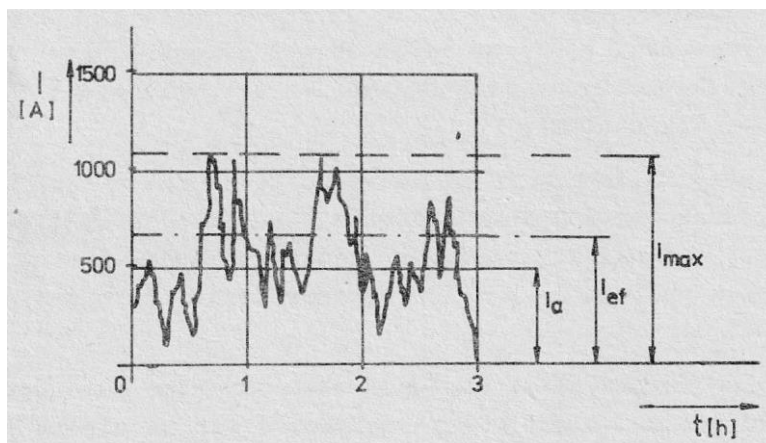
Úbytek napětí je lineární přibližně do poměru $I_d / I_{SS\text{max}} = 0,45$ (vzhledem k $K < 0,2$), tedy do

$$I_d = 0,45 \cdot I_{SS\text{max}} = 0,45 \cdot 36675 \text{ A} = 16504 \text{ A}$$

S výše uvedenými vypočtenými hodnotami musí být dále uvažováno při konstrukci DC rozváděče s ohledem na požadavek normy na možnost paralelní spolupráce usměrňovacích skupin.

7.5 Návrh trakčního vedení

Proudové zatížení trakčních měniren a jejich usměrňovacích skupin se rovná součtu současného odebíraného proudu jednotlivých hnacích vozidel, které se současně pohybují v úseku napájeném trakční měnirnou. Charakter proudu v trakčním obvodu je v čase značně proměnlivý, příklad je uveden na obr. 21.



Obr. 21 Příklad časového průběhu proudového zatížení měnirny. Převzato z [16].

V průběhu trakčního proudu rozlišujeme tyto veličiny:

- I_a střední aritmetický proud, kterým by se vykonala stejná trakční práce, jako skutečným proměnlivým průběhem proudu
- I_{ef} efektivní proud (střední kvadratická hodnota proudu), který způsobí stejné Joulovy ztráty ve vinutí elektrických strojů a ve vedení

I_{\max} špičkovou hodnotu proudu

Střední aritmetický proud měřírny je rozhodující pro celkové výkonové dimenzování měřírny. Pro dimenzování trakčního kabelového vedení jednotlivých napáječů vzhledem k dovolené proudové zatížitelnosti kabelů je rozhodující efektivní proud I_{ef} protékající jednotlivými napáječi. Špičkový proud je potom rozhodující pro nastavení nadproudových ochran napáječových rychlovyvínačů.

7.5.1 Určení typu a počtu kabelů vzhledem k dovolenému oteplení

Dimenzování kabelového vedení se provádí na základě vypočteného efektivního proudu v jednotlivých napáječích a efektivního proudu protékajícím zpětným kabelovým vedením pro nejnepriznivější případy provozu. Výpočty těchto proudů se v současné době provádějí pomocí simulovaných energetických výpočtů za použití komplexních výpočetních programů pro konkrétní grafikon vlakové dopravy, se zohledněním místních traťových poměrů (sklon tratě, poloměr oblouku atd.). Tyto výpočty nejsou předmětem této práce. Výpočty provedu na základě modelových hodnot efektivních proudů uvedených v tab. 4. V tabulce jsou uvedeny efektivní proudy protékající uvedenými rychlovyvínači v napáječích č. 31 – 34 s příslušnými kabelovými vedeními připojenými na přívodní kolejnici a zpětným kabelovým vedením od pojižděných kolejnic do rozváděče zpětných kabelů. Hodnoty jsou uvedeny jak pro normální provoz (oboustranné napájení ze sousedních měřírén), tak pro abnormální provoz (výpadek jedné ze sousedních měřírén).

Tab. 4 Efektivní proud ve vedení

Napáječ č.	31	32	33	34	
Kabelové vedení	V_{31}	V_{32}	V_{33}	V_{34}	V_{ZP1}
I_{ef} - normální provoz [A]	2050	2150	1250	1850	5950
I_{ef} - abnormální provoz [A]	2300	3030	2050	2540	4900

Pro dimenzování vedení musí být splněna podmínka $I_{dov} > I_{ef}$, přitom musí být volena hodnota efektivního proudu pro nejméně příznivý provozní stav.

Z hlediska mechanické odolnosti i požárních vlastností je vhodným kabelem pro trakční vedení kabel typu 3-CHKCH-R s parametry uvedenými v tab. 5 (pro teplotu okolí 30 °C a teplotu jádra 90 °C).

Tab. 5 Parametry kabelu 3-CHKCH-R

Typ kabelu	Počet a průřez žil	Ekvivalentní zkratový proud	Ekvivalentní zkratový proud stínění	Časová oteplovací konstanta (paralelně)	Zatížitelnost na vzduchu (paralelně, mezera 70 mm)
	[mm ²]	[kA]	[kA]	[s]	[A]
3-CHKCH-R	1x400/35	57,2	7,0	1139	1130

Pro jiný než základní způsob uložení kabelů, je nutné proudovou zatížitelnost kabelu přepočítat dle příslušných koeficientů. Potom pro zatížení kabelů platí

$$I_{\text{dov}} = I_n \cdot k_1 \cdot k_2 \cdot k_3$$

kde k_1 přepočítávací koeficient při zvýšení teploty nad 30 °C

k_2 přepočítávací koeficient pro paralelní kabely

k_3 přepočítávací koeficient pro střídání podmínek instalace na trase

Koeficienty k_1 a k_2 můžeme uvažovat $k_1 = k_2 = 1$, protože teplota okolního vzduchu nepřesahuje v prostorech metra 30 °C a paralelní kabely jsou stejného typu, délky i průřezu. Koeficient k_3 se pro způsob uložení trakčních kabelů v metru stanovuje jako $k_3 = 0,85$, protože v některých místech dochází z prostorových důvodů k těsnému uložení kabelů v délce větší než 10 m (katalogová hodnota pro zatížitelnost paralelních kabelů platí pro mezery mezi kabely 70 mm).

Dovolené zatížení je potom

$$I_{\text{dov}} = I_n \cdot k_1 \cdot k_2 \cdot k_3 = 1130\text{A} \cdot 1 \cdot 1 \cdot 0,85 = 960,5\text{A}$$

Je zřejmé, že vzhledem k zadaným efektivním proudům a přepočítané zatížitelnosti kabelu na vzduchu není možné použít jeden kabel, ale je nutné navrhnout n paralelních kabelů. Z efektivních proudů napáječů uvedených v tab. 4 a z vypočítaného dovoleného zatížení jednoho kabelu už můžeme stanovit počet paralelních kabelů jednotlivých vedení.

Požadovaný počet kabelů musí vyhovovat vztahu

$$n > \frac{I_{\text{ef}}}{I_{\text{dov}}}$$

Potom pro napáječ č. 31 je nejmenší možný počet paralelních kabelů

$$n > \frac{I_{\text{ef}}}{I_{\text{dov}}} > \frac{2300\text{A}}{960,5\text{A}} > 2,4$$

Pro kabelové vedení k přívodní kolejnici je tedy pro uvedený napáječ č. 31 nutno použít nejméně tři paralelní kabely. Výše uvedeným způsobem vypočítané počty kabelů pro zbývající napáječe a zpětné vedení jsou uvedeny v tab. 6.

Tab. 6 Minimální počty paralelních kabelů

Napáječ č.	31	32	33	34	
Kabelové vedení	V_{31}	V_{32}	V_{33}	V_{34}	V_{ZP}
I_{ef} - nejnepříznivější hodnota [A]	2300	3030	2050	2540	5950
Minimální počet paralelních kabelů	3	4	3	3	7

7.6 Nastavení ochrany rychlovypínačů výpočtem

Dynamická ochrana napěťového rychlovypínače reaguje na strmost nárůstu zkratového proudu, která je dána parametry trakčního obvodu. Nastavení provádí dodavatel usměrňovací skupiny ověřuje se zkratovými zkouškami.

Statická ochrana napáječového rychlovypínače musí být schopna rozlišit běžný provozní proud od poruchového zkratového proudu. Dle ČSN 33 3510 musí být splněna podmínka:

$$I_{pmax} + 400A \leq I_{nast} \leq I_{kmin} - 600A$$

kde I_{pmax} největší provozní proud v obvodu napáječe

I_{nast} proudové nastavení zkratové ochrany napáječe

I_{kmin} minimální ustálený zkratový proud v trakčním obvodu

Nastavení statické ochrany se zpravidla liší pro normální provoz a pro abnormální provoz, protože v obou případech bývají největší provozní proudy v obvodu napáječe odlišné. Při normálním provozu, tedy dvoustranném napájení, se na napájení vlaků podílejí oba napáječe úseku v sousedních měnírňách. Za abnormální stav se považuje

- jednostranné napájení, kdy celkový okamžitý trakční proud protéká pouze jedním napáječem příslušného elektrického úseku
- vypnutá vazba napáječů, protože v případě vzdáleného zkratu na trakčním vedení je zkrat vypnut vypínačem vzdálené měnírny, která je k místu zkratu blíže, odpovídající vypínač ve druhé měnírně vypnout nemusí, protože vzhledem k velkému odporu trakčního vedení může jím procházející proud vyhodnotit jako provozní

Minimální ustálený zkratový proud se určí podle vztahu

$$I_{kmin} = \frac{0,8 \cdot U_{di}}{R_{max}} \geq I_{nast}$$

kde I_{kmin} ustálený zkratový proud v nejvzdálenějším místě napájeného úseku

0,8 koeficient respektující kolísání síťové napětí a případný možný úbytek na oblouku

U_{di} napětí měnírny naprázdno

R_{max} maximální odpor zkratového obvodu

I_{nast} nastavení spouště rychlovypínače

Maximální odpor zkratového obvodu:

$$R_{\max} = R_M + R_{\text{NK}} + R_{\text{PK}} + R_{\text{JK}} + R_{\text{ZK}}$$

- kde R_M vnitřní odpor měřírny
 R_{NK} odpor napájecích kabelů
 R_{PK} odpor přívodní kolejnice
 R_{JK} odpor pojížděných kolejnic
 R_{ZK} odpor zpětných kabelů

V případě oboustranného napájení se zapnutou vazbou napáječů se uvažuje pouze polovina úseku trati, a tedy poloviční hodnoty R_{PK} a R_{JK} .

Vnitřní odpor měřírny se určí podle vztahu

$$R_M = \frac{U_{\text{di}} - U_{\text{Nd}}}{I_{\text{Bd}}}$$

Podle dříve vypočítaných údajů pro usměřňovací skupinu je vnitřní odpor jedné usměřňovací skupiny

$$R_M = \frac{U_{\text{di}} - U_{\text{Nd}}}{I_{\text{Bd}}} = \frac{877,5\text{V} - 835,4\text{V}}{3000\text{A}} = 0,014\Omega$$

V praxi se pro tento výpočet uvažují hodnoty $U_{\text{di}} = 900\text{V}$, $U_{\text{Nd}} = 825\text{V}$, vnitřní odpor je potom

$$R_M = \frac{U_{\text{di}} - U_{\text{Nd}}}{I_{\text{Bd}}} = \frac{900\text{V} - 825\text{V}}{3000\text{A}} = 0,025\Omega$$

Vyšší vnitřní odpor usměřňovací skupiny vede k nižší vypočtené hodnotě minimálního ustáleného zkratového proudu, a tedy k nižší maximální hodnotě nastavení spouště napáječového rychlovyvínače, což je na straně bezpečnosti. Ve výpočtech proto uvažují s $R_M = 0,025\Omega$.

Výpočet minimálních zkratových proudů pro jednotlivé úseky provedu pro parametry kabelového vedení uvedené v tab. 7, parametry trati dle tab. 8 a pro špičkové proudy napáječů uvedené v tab. 9.

Tab. 7 Parametry kabelového vedení

Typ kabelu	3-CHKCH-R 1x400 mm ²				
činný odpor	0,047 Ω/km				
kabelové vedení	V ₃₁	V ₃₂	V ₃₃	V ₃₄	V _{ZP}
délka [m]	80	160	60	60	70
počet paralelních kabelů	3	4	3	3	7
odpor kabelového vedení [Ω]	0,001253	0,00188	0,00094	0,00094	0,00047

Tab. 8 Parametry trati

úsek trati	U ₃₁	U ₃₂	U ₃₃	U ₃₄
délka [m]	2100	2100	1850	1850
celkový odpor přívodní kolejnice R _{PK} [Ω]	0,0147	0,0147	0,01295	0,01295
celkový odpor pojížděných kolejnic R _{JK} [Ω]	0,0462	0,0462	0,0407	0,0407

Tab. 9 Špičkové hodnoty proudu napáječů I_{pmax}

Napáječ č.	31	32	33	34
I _{pmax} - normální provoz [A]	3340	3660	2380	3330
I _{pmax} - abnormální provoz [A]	5750	6030	5420	6150

Pro napáječ č. 31 potom platí

$$R_{\max} = R_M + R_{NK} + R_{PK} + R_{JK} + R_{ZK} = 0,025\Omega + 0,001253\Omega + \frac{0,0147\Omega}{2} + \frac{0,0462\Omega}{2} + 0,00097\Omega = 0,057723\Omega$$

$$I_{\min} = \frac{0,8 \cdot U_{di}}{R_{\max}} = \frac{0,8 \cdot 900V}{0,057723\Omega} = 12473A .$$

Stejným způsobem vypočtené hodnoty I_{kmin} jsou uvedeny v tab. 10.

Tab. 10 Vypočtené hodnoty I_{kmin}

Napáječ č.	31	32	33	34
I _{kmin} [A] - jednostranné napájení	8166	8115	8941	8941
I _{kmin} [A] - oboustranné napájení	12473	12339	13307	13307

Pro normální provoz (oboustranné napájení) musí být potom nastavení spouště rychlovypínače v napáječi č. 31 v rozsahu

$$I_{pmax} + 400A \leq I_{nast} \leq I_{kmin} - 600A$$

$$3740A \leq I_{nast} \leq 12473A$$

Stejným způsobem získáme hodnoty nastavení všech napáječových rychlovypínačů. Výsledné hodnoty, jsou uvedeny v tab. 11.

Tab. 11 Nastavení statických ochran rychlo vypínačů

	Napáječ č.	31	32	33	34
normální provoz	I_{pmax} [A]	3340	3660	2380	3330
	I_{kmin} [A]	12473	12339	13387	13387
	interval nastavení [A]	3740 ÷ 11873	4060 ÷ 11739	2780 ÷ 12707	3730 ÷ 12707
	I_{nast} [A]	10000	10000	10000	10000
abnormální provoz	I_{pmax} [A]	5750	6030	5420	6150
	I_{kmin} [A]	8166	8108	8932	8932
	interval nastavení [A]	6150 - 7573	6430 - 7515	5820 - 8341	6550 - 8341
	I_{nast} [A]	7000	7000	7500	7500

Z tabulky nastavení je zřejmé, že při abnormálním provozu je nutné nastavení spouští rychlo vypínačů upravit na nižší hodnoty.

7.7 Shrnutí návrhu

Trakční zařízení měřírny metra vyžadovalo navrhnout parametry těchto základních zařízení: usměrňovací skupiny složené z trakčního transformátoru a usměrňovače, dále rozváděče DC napětí s rychlo vypínači a trakčního vedení. V návrhu byly určeny základní parametry a nastavení těchto prvků. Prvky usměrňovací skupiny nejsou zcela typická zařízení, výrobce je musí přizpůsobit konkrétní aplikaci. Při dodávce je tedy nutné vycházet z navržených parametrů.

8 Závěr

Práce byla sepsána tak, aby byla v souladu s jednotlivými body zadání. V úvodu práce je popsána obecná elektrická trakční soustava, podán přehled o způsobu napájení DC a AC elektrické trakce a uvedeny zásadní rozdíly mezi nimi a jejich hlavní výhody a nevýhody.

Dále jsou uvedeny typické součásti elektrických trakčních soustav včetně jejich možných uspořádání a popsána funkce napájecí stanice metra. Jsou popsána možná uspořádání napájecích systémů trakčních napájecích stanic metra z distribuční sítě vn používaných ve světě včetně popisu systému napájení pražského metra. Jsou rozvedeny způsoby napájení elektrických úseků DC trakce. Tato část práce je též věnována problematice bludných proudů vznikajících obecně z provozu DC trakčních soustav.

Samostatná kapitola stručně pojednává o problematice EMC drážních zařízení, ze které vyplývají výhody použití dvanáctipulzních usměrňovacích skupin oproti skupinám s šestipulzním usměrněním.

Další část práce se věnuje zásadám návrhu trakčního zařízení měnirny metra. Na základě zadaných parametrů byly navrženy parametry usměrňovacího transformátoru, určeny napěťové charakteristiky a vypočítány zkratové proud usměrňovací jednotky, které je třeba respektovat při konstrukci DC napáječového rozváděče.

Následující část řeší výběr trakčního kabelového vedení s ohledem na jeho oteplení pro uvedené proudové zatížení.

Poslední část práce je věnována výpočtu nastavení zkratových spouští napáječových rychlovypínačů dle požadavků normy.

9 Seznam obrázků

Obr. 1 Součásti typické elektrické trakční soustavy a její hlavní rozhraní. Převzato z [10].	3
Obr. 2 Možné uspořádání DC trakční soustavy. Převzato z [21].	4
Obr. 3 Možné uspořádání AC trakční soustavy 25 kV, 50 Hz. Převzato z [21].	5
Obr. 4 Příklad čtyřkabelového schématu vn napájení [20], upraveno.	10
Obr. 5 Příklad tříkabelového schématu vn napájení [20], upraveno	10
Obr. 6 Příklad dvoukabelového schématu vn napájení [20], upraveno	11
Obr. 7 Příklad dvoukabelového schématu napájení vn používaný v pražském metru [14], upraveno..	11
Obr. 8 Příklady uspořádání AC vn napájení TNS. Převzato z [20], upraveno.	12
Obr. 9 Trakční napětí vlaku jako funkce vzdálenosti. Převzato z [20].	13
Obr. 10 Jednostranné, soustředěné napájení, M – trakční měnírna, N – napáječ. [16], upraveno.	13
Obr. 11 Dvojstranné rozložené napájení, M – trakční měnírna, NR – napěťové rychlovyvínače. Převzato z [16], upraveno.	14
Obr. 12 Schéma obvodu trakčního proudu a průběhy napětí kolej - zem U_{kz} a úložné zařízení - zem U_{uz} , NS je trakční napájecí stanice. Převzato z [13].	15
Obr. 13 Schematické znázornění toku bludných proudů. Převzato z [22].	17
Obr. 14 Principiální schéma měnírny a trakčního obvodu pražského metra	21
Obr. 15 Příklad možného uspořádání měnírny a trakčního obvodu	22
Obr. 16 Zapojení šestipulzního usměrňovače	24
Obr. 17 Varianty zapojení dvanáctipulzní usměrňovací skupiny	24
Obr. 18 Typická charakteristika usměrňovací skupiny [8].	26
Obr. 19 Situační schéma napájení	30
Obr. 20 Vnější charakteristika usměrňovací skupiny - postup výpočtu	33
Obr. 21 Příklad časového průběhu proudového zatížení měnírny. Převzato z [16].	34

10 Seznam literatury

- [1] ČSN 33 3510 Elektrická trakční zařízení metra
- [2] ČSN 34 5145 ed. 2 Názvosloví pro elektrická trakční zařízení
- [3] ČSN EN 50121-1 ed. 4 Drážní zařízení – Elektromagnetická kompatibilita – Část 1: Obecně
- [4] ČSN EN 50122-1 ed. 2 Drážní zařízení – Pevná trakční zařízení – Elektrická bezpečnost, uzemňování a zpětný obvod – Část 1: Ochranná opatření proti úrazu elektrickým proudem
- [5] ČSN EN 50122-2 ed. 2 Drážní zařízení – Pevná trakční zařízení – Elektrická bezpečnost, uzemňování a zpětný obvod – Část 2: Ochranná opatření proti účinkům bludných proudů DC trakčních soustav
- [6] ČSN EN 50162 Ochrana před korozí bludnými proudy ze stejnosměrných proudových soustav
- [7] ČSN EN 50163 ed. 2 Drážní zařízení – Napájecí napětí trakčních soustav
- [8] ČSN EN 50327/A1 Drážní zařízení – Pevná trakční zařízení – Harmonizace jmenovitých hodnot pro skupiny měničů a zkoušky na skupinách měničů
- [9] ČSN EN 50329 Drážní zařízení – Pevná trakční zařízení – Trakční transformátory
- [10] ČSN EN 50562 Proces, ochranná opatření a prokázání bezpečnosti el. trakčních soustav
- [11] DOLEČEK, Radovan a Ondřej ČERNÝ. Trakční napájecí soustavy: studijní opora. Vyd. 1. Pardubice: Univerzita Pardubice, 2015, 104 s. ISBN 978-80-7395-879-4.
- [12] HLAVA, Karel a Univerzita Pardubice. Katedra elektrotechniky, elektroniky a zabezpečovací techniky v dopravě. Elektromagnetická kompatibilita (EMC) drážních zařízení. Vyd. 1. Pardubice: Univerzita Pardubice, 2004. ISBN 80-7194-637-0.
- [13] HORÁK, Karel. Energetika a trakce. Bratislava: Alfa, 1983.
- [14] Interní materiály Dopravního podniku hl. m. Prahy, a. s.
- [15] KOTAS, Patrik a České vysoké učení technické v Praze. Fakulta architektury. Dopravní systémy a stavby. Vyd. 2. Praha: Nakladatelství ČVUT, 2007. ISBN 978-80-01-03602-0.
- [16] LANÁKOVÁ, Gabriela a Dalibor ŠINDLER. Napájanie elektrických dráh. 1. vyd. Bratislava: Alfa, 1989.
- [17] LANÁKOVÁ, Gabriela. Vybrané state z pevných trakčných zariadení. 1. vyd. Bratislava: Alfa, 1987.
- [18] Přehled trakčních soustav používaných ve světě. Dostupné z: https://en.wikipedia.org/wiki/List_of_railway_electrification_systems#Conductor_rail_systems
- [19] Report of the Sub-Committee on Traction Systems, General Power Supply Arrangement and Energy Efficient Systems. Government of India. Ministry of Urban Development, 2013. Dostupné z: <http://www.mohua.gov.in/upload/uploadfiles/files/Report%204%20Traction%20System.pdf>
- [20] SEIMBILLE, Denis. Design of power supply systém in DC electrified transit railways – Influence of the high voltage network. KTH, Stockholm, 2014. Dostupné z: <https://www.diva-portal.org/smash/get/diva2:753972/FULLTEXT01.pdf>

- [21] STEIMEL, Andreas. Electric traction - motive power and energy supply: basics and practical experience. 2nd. München: DIV Deutscher Industrieverlag GmbH, 2014. ISBN 978-3-8356-7257-4.
- [22] Technické podmínky TP 124. Základní ochranná opatření pro omezení vlivu bludných proudů na mostní objekty a ostatní betonové konstrukce pozemních komunikací. Vyd. 2. Praha: Ministerstvo dopravy. Odbor infrastruktury, 2008, 120 s.
- [23] Vyhláška 177/1995 Sb. Ministerstva dopravy ze dne 30. června 1995, stavební a technický řád drah.