

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI

FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ

KATEDRA ELEKTROMECHANIKY A VÝKONOVÉ

ELEKTRONIKY

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

Rekuperace u trakčních napájecích stanic pro systém

25 kV, 50 Hz

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI
Fakulta elektrotechnická
Akademický rok: 2018/2019

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE
(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Patrik MASAŘ**
Osobní číslo: **E16B0032P**
Studijní program: **B2612 Elektrotechnika a informatika**
Studijní obor: **Elektrotechnika a energetika**
Název tématu: **Rekuperace u trakčních napájecích stanic pro systém 25kV,
50Hz**
Zadávající katedra: **Katedra elektromechaniky a výkonové elektroniky**

Z á s a d y p r o v y p r a c o v á n í :

Práce bude obsahovat :

1. Provedte stručné shrnutí problémů související s provozem současných TNS (trakčních napájecích stanic), zejména z hlediska možné rekuperace energie.
2. Popište klasické řešení TNS pro systém 25 kV, 50Hz v podmínkách ČR a ve světě. Problematika zamezení rekuperace v krizových stavech (porucha na straně TNS nebo v napájeném úseku atd.).
3. Zrealizujte simulační model TNS (s možností rekuperace) v krizových stavech (porucha na straně TNS a porucha v napájeném úseku), včetně příslušného akčního zásahu ochran.

Rozsah grafických prací: podle doporučení vedoucího

Rozsah kvalifikační práce: 30 - 40 stran

Forma zpracování bakalářské práce: tištěná/elektronická

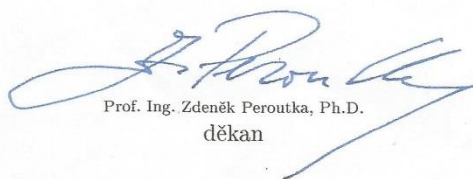
Seznam odborné literatury:

1. Doleček R., Černý O. : "Trakční napájecí soustavy: studijní opora"
Univerzita Pardubice, DFJP, Pardubice 2015.

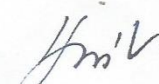
Vedoucí bakalářské práce: **Doc. Ing. Martin Pittermann, Ph.D.**
Katedra elektromechaniky a výkonové elektroniky

Datum zadání bakalářské práce: **5. října 2018**

Termín odevzdání bakalářské práce: **13. června 2019**


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




Prof. Ing. Václav Kús, CSc.
vedoucí katedry

V Plzni dne 5. října 2018

Abstrakt

Předkládaná bakalářská práce je zaměřena na problematiku rekuperace u trakčních napájecích stanic pro systém 25 kV, 50 Hz. Čtenář bude v následujícím textu seznámen se základními pojmy týkající se elektrické trakce. Dále s problematikou rekuperace u napájecích systémů 25 kV, 50 Hz, ale i s dalšími napájecími systémy používanými v České republice a ve světě.

Klíčová slova

Trakční soustava, rekuperace, trakční napájecí stanice, střídavá trakční soustava, stejnosměrná trakční soustava.

Abstract

This bachelor thesis is focused on the issue of recuperation at traction power stations for the 25 kV, 50 Hz system. The reader will be apprized with the basic concepts of electric traction. Other problems of recovery in power systems 25 kV, 50 Hz, but also with another power systems used in the Czech Republic and in the world.

.

Key words

Traction system, recuperation, traction power station, AC traction system, DC traction system.

Prohlášení

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

Dále prohlašuji, že veškerý software použitý při řešení této bakalářské práce je legální.

.....

podpis

V Plzni dne 11.6.2019

Patrik Masař

Poděkování

Tímto bych rád poděkoval vedoucímu své bakalářské práce doc. Ing. Martinu Pittermanovi Ph.D. za cenné připomínky, pomoc a konzultaci bakalářské práce.

Obsah

| | |
|----------------------------------------------------------------------|----|
| Úvod..... | 11 |
| Seznam symbolů a zkratek..... | 12 |
| 1 Provoz a rekuperace TNS | 13 |
| 1.1 Trakční soustava | 13 |
| 1.2 Trakční soustava 25 kV, 50 Hz | 15 |
| 1.2.1 Napájení a provoz trakční soustavy | 17 |
| 1.2.2 Filtračně kompenzační zařízení..... | 17 |
| 1.3 Rekuperace a provoz TNS | 18 |
| 1.3.1 Rekuperace u střídavých napájecích systémů | 18 |
| 1.3.2 Rekuperace u stejnosměrných napájecích systémů (3 kV DC) | 19 |
| 1.3.3 Porovnání napájecích systémů | 20 |
| 1.3.4 Problém rekuperace na soustavě 25 kV, 50 Hz | 21 |
| 1.3.5 Napěťově pulsní usměrňovač a jeho použití v trakci..... | 23 |
| 1.3.6 Rekuperace na soustavě 15 kV, 16,7 Hz..... | 24 |
| 1.3.7 Proč se v České republice nerekuje | 25 |
| 2 Řešení TNS 25 kV, 50 Hz..... | 27 |
| 2.1 TNS 25 kV, 50 Hz: | 27 |
| 2.1.1 Trakční transformovna | 30 |
| 2.1.2 Spínací stanice..... | 32 |
| 2.1.3 Zamezení rekuperace v krizových stavech | 34 |
| 3 Simulační model provozních a krizových stavů | 36 |
| 3.1 Motorický režim | 37 |
| 3.2 Generátorický režim | 38 |
| 3.3 Porucha v napájeném úseku | 39 |
| 3.4 Pokles napětí v TNS | 40 |
| Závěr | 41 |
| Seznam zdrojů..... | 42 |

Úvod

Tato bakalářská práce se zabývá problematikou rekuperace u trakčních napájecích stanic 25 kV, 50 Hz.

Bakalářská práce je rozdělena do tří kapitol a několik podkapitol.

První kapitola má za cíl čtenáře seznámit s obecným výkladem o trakčním napájecím systému. Dále tato kapitola zahrnuje problematiku rekuperace u trakčních napájecích systémů a stanic jak stejnosměrných, tak i střídavých. Porovnávají se zde různé napájecí systémy používané v České republice a ve světě. Také je zde provedeno shrnutí zamezení rekuperace na střídavé soustavě 25 kV, 50 Hz. Na závěr tato kapitola shrnuje, proč se v České republice na této napájecí soustavě rekuperace nevyužívá.

Cílem druhé kapitoly je zaměřit se na řešení trakčních napájecích stanic na soustavě 25 kV, 50 Hz. Je tu zmíněna realizace trakčních transformoven a spínacích stanic, například v České republice. Dále jsou zde popsány podmínky zamezení rekuperace v krizových stavech.

Třetí kapitola představuje simulační model provozních a krizových stavů převážně v režimu rekuperace na napájecí soustavě 25 Kv, 50 Hz. Jsou zde ukázány průběhy proudu lokomotivy, TNS a zkratových proudů. Dále také průběh napájecího napětí. Tyto průběhy jsou vyobrazeny ve dvou provozních a dvou krizových stavech.

Seznam symbolů a zkratk

| | |
|------------|--------------------------------------|
| TNS..... | Trakční napájecí soustava |
| FKZ..... | Filtračně kompenzační zařízení |
| TS..... | Trakční soustava |
| 1f,3f..... | Počet fází |
| NS..... | Napájecí soustava |
| DS..... | Distribuční síť |
| TT..... | Trakční transformovna |
| DC..... | Direct current (stejnoseměrný proud) |
| NPU..... | Napětově pulsní usměrňovač |
| VVN..... | Velmi vysoké napětí |
| Y-D..... | Zapojení vinutí hvězda-trojúhelník |

1 Provoz a rekuperace TNS

1.1 Trakční soustava

Trakční soustava je soubor zařízení, které slouží k přenosu elektrické energie z pevné soustavy do drážních vozidel.

Napájecí soustavu lze dělit podle technického provedení, a to na trolejové vedení anebo napájecí kolejnice.

Dále ji lze dělit podle druhu napětí a proudu na stejnosměrný a střídavý (1f nebo 3f).

Lze ji rozdělit také na pevná a pohyblivá zařízení.

Pevná zařízení slouží k napájení dráhy (trakční vedení, TNS, atd.), zatímco pohyblivá zařízení jsou součástí trakčního vozidla.

V České republice se nejvíce používá stejnosměrná TS 3 kV a střídavá TS 25 kV, 50 Hz.

Nejstarší trakční soustavy jsou stejnosměrné kvůli požadavku na zvyšování napájecího napětí z důvodu nárůstu požadavku na výkon a vzdálenost, na kterou měl být přenášen, dochází k vytváření motorových skupin, kde jsou vždy dva trakční motory spojeny trvale do série (soustava 3 kV).

Drážní vozidla pro stejnosměrnou trakci byla také jednodušší než pro střídavou, a to protože stejnosměrný proud z troleje procházel přes regulační odporové děliče napětí přímo do motorů spojených do série (kvůli snížení záběrného proudu), a to protože technologicky neumíme izolaci vinutí i vzájemné odizolování komutátorů udělat na vyšší napětí než 1,5 kV.

Jelikož stejnosměrný proud nelze transformovat, tak platí že napětí, které je v troleji, musí být připojeno na svorky sériově spojených motorů.

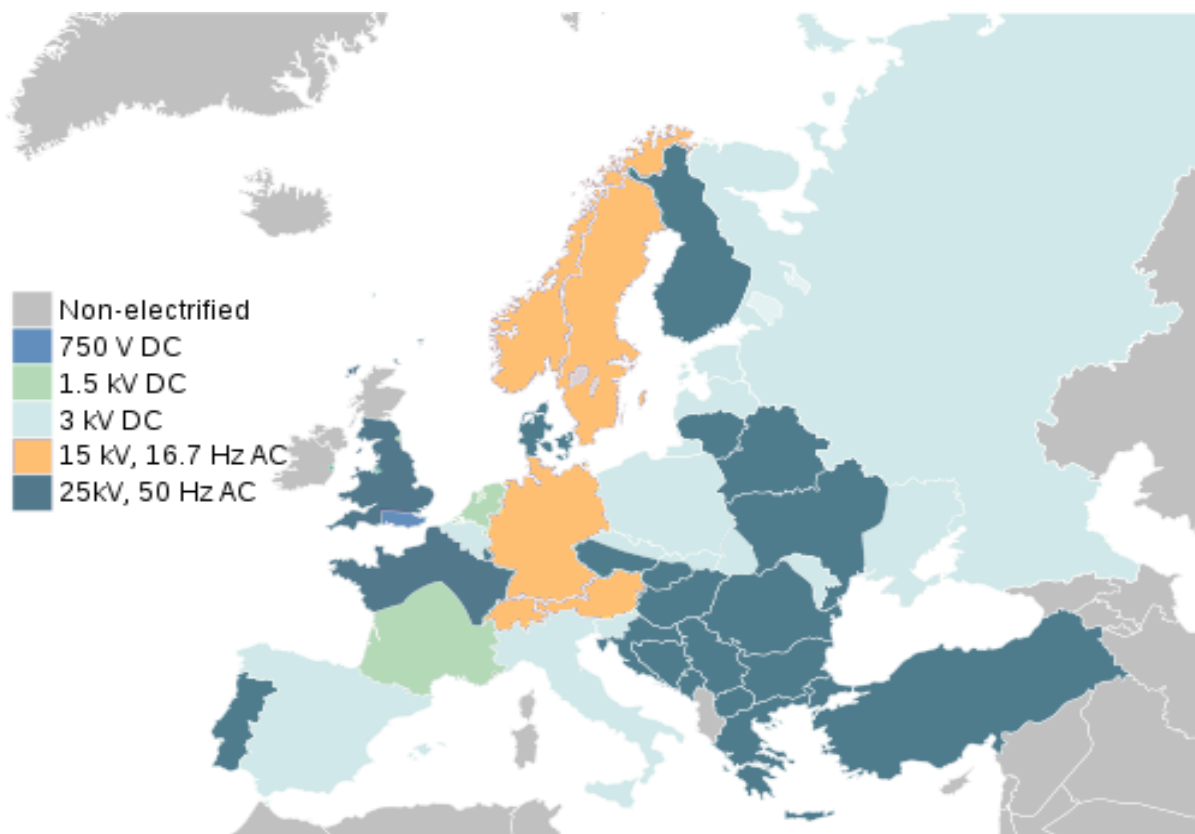
Na stejnosměrných TS jsou výkony limitovány napětím, které můžeme dodat.

Stejnosemárná TS je napájena z trakčních měničů, zatímco střídavé jsou napájeny z trakčních transformoven.

Střídavá soustava má výhodu v tom, že za použití velkého střídavého napětí lze docílit velkých výkonů, dobré regulace, malého proudu a malých ztrát na velkých úsecích mezi TNS.

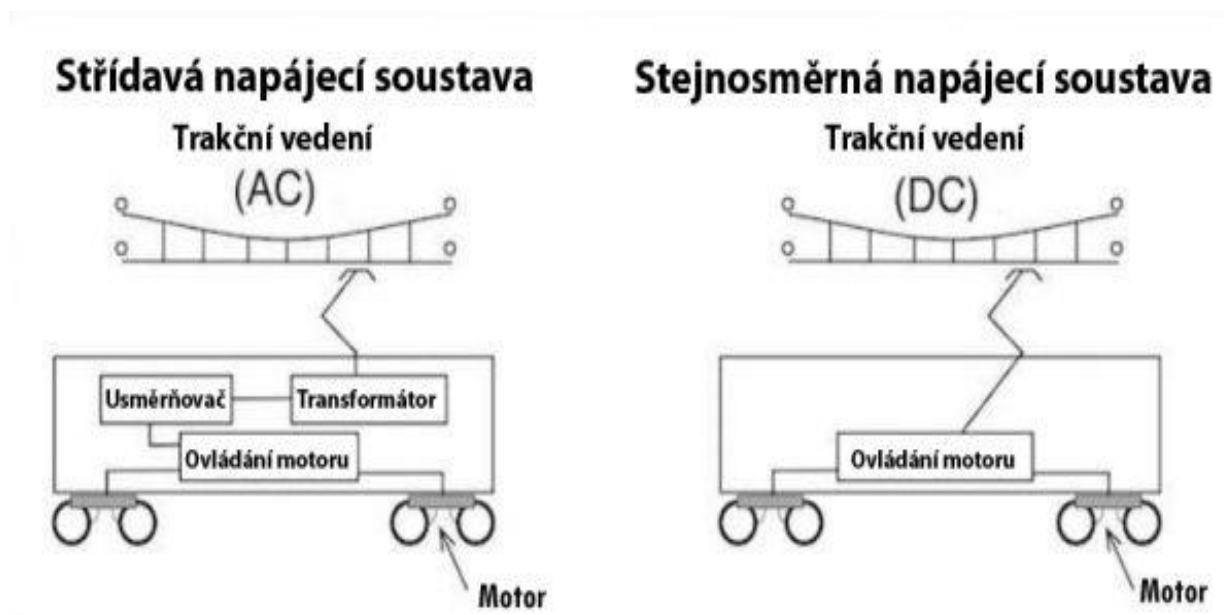
Nevýhodou je, že vozidlo pro střídavou TS je vybaveno transformátorem, který výrazně zvyšuje hmotnost vozidla (Pavlíček 2005; Šimek 2016).

Obrázek č. 1 – mapa Evropy



Zdroj: Molek 2015

Obrázek č. 2 – střídavá x stejnosměrná soustava



Zdroj: Fabián-Balkovský

1.2 Trakční soustava 25 kV, 50 Hz

Jedná se o jednofázovou napájecí soustavu velmi rozšířenou po celé Evropě i v České republice.

Je realizována jako paprsková síť, napájena jednostranně ze sítě 110 kV. Oboustranné napájení není možné z důvodu nežádoucích přetoků vyrovnávacích proudů mezi NS.

Tato soustava vykazuje velmi malé ztráty způsobené přenosem a trakční vedení se dá velmi snadno napájet přes trakční transformovny z distribuční sítě.

Kvůli vysokému napětí je možné snadno přenášet velké výkony, které vyžadují moderní lokomotivy.

Jednoduchost připojení na distribuční síť přináší i celou řadu problémů.

Jedním z nich je, že musíme jednotlivé úseky napájet z různých fází a to proto, že distribuční síť musí být rovnoměrně zatížena.

Oproti stejnosměrné soustavě se nemusí budovat měnírny, ale zase musíme budovat spínací stanice z důvodů snížení úbytku napětí, ale také kvůli ochraně.

Spínací stanice se budují uprostřed úseku mezi TNS nebo v místech odbočení vedlejší trati.

- **Výhody:** - Možnost použití menších průřezů

- Jednodušší provedení TNS oproti stejnosměrným soustavám

- Malé ztráty v trolejovém vedení

- Větší vzdálenost mezi TNS

- **Nevýhody:** - Rekuperace (v České republice, kromě jižních Čech, kde dodává E.O.N a je střídavá trakce, zakázána)

- Nesymetrické zatěžování 3f soustavy DS

- Dražší trakční vozidla

Pro soustavu jsou typické trakční transformovny, které jsou schopny přenášet výkon oběma směry, což je s hlediska rekuperace důležitá informace.

Starší drážní vozidla pro tuto soustavu obsahují diodové usměrňovače, které nedovolují vést záporný proud, takže rekuperace není možná.

Nejnovější vozidla obsahují pulsní usměrňovače, které jsou schopny oboustranného provozu a dovolují rekuperaci.

Přes veškeré nevýhody je tato soustava velmi výhodná a plánuje se v horizontu 30 let sjednocení napájecí soustavy v ČR, a to právě na soustavu 25 kV, 50 Hz.

Z historického hlediska byla soustava 25 kV, 50 Hz prvotně použita v Maďarsku ve 20. letech 20 století, kde byla použita drážní vozidla s asynchronními motory napájené z rotačního měniče fází, kvůli tomu byla hmotnost trojnásobná oproti drážním vozidlům na stejnosměrné soustavě.

V České republice byl tento systém poprvé zprovozněn v roce 1963 na úseku Plzeň-Horažďovice.

V současné době je v České republice zhruba 1259 kilometrů elektrifikovaných tratí, které využívají tento systém napájení (Doleček – Černý 2015: 56–57; Pavlíček 2005).

1.2.1 Napájení a provoz trakční soustavy

Celá napájecí soustava zahrnuje trakční napájecí stanice což jsou tzv. trakční transformovny, spínací stanice, napájecí a trolejové vedení. Soustava zahrnuje i vedení pro zpětný trakční proud.

Trakční transformovna (TT) jsou stanoviště s jednofázovými transformátory 110/27 kV zajišťující napájení trakční soustavy, popřípadě zajišťují(znemožnit) dodávku rekuperované energie do distribuční sítě.

Spínací stanice se zřizují pro zvýšení spolehlivosti napájení elektrizovaných tratí a zvýšení výkonnosti pevných elektrických trakčních zařízení (Doleček – Černý 2015: 51).

1.2.2 Filtračně kompenzační zařízení

FKZ je součástí trakční transformovny.

FKZ kompenzují zpětné negativní vlivy na napájecí síť. Tyto vlivy jsou odběr nebo dodávka jalové energie, deformace napěťové křivky vlivem vyšších harmonických složek proudu a nesymetrii zátěže.

FKZ zajišťuje plynulé a rychlé řízení jalového výkonu, filtraci vyšších harmonických složek a možnost individuálního řízení každé fáze zvlášť, když je požadováno odstranění nesymetrie sítě.

FKZ jsou zařízení, které zajišťují optimalizaci odběru elektrické energie pomocí dynamických kompenzátorů. Filtry jsou tvořeny sériovou kombinací kondenzátorů a filtrační tlumivky a slouží jako sériové rezonanční obvody pro odstranění nežádoucích vyšších harmonických složek a současně dodávají do sítě konstantní kapacitní proud.

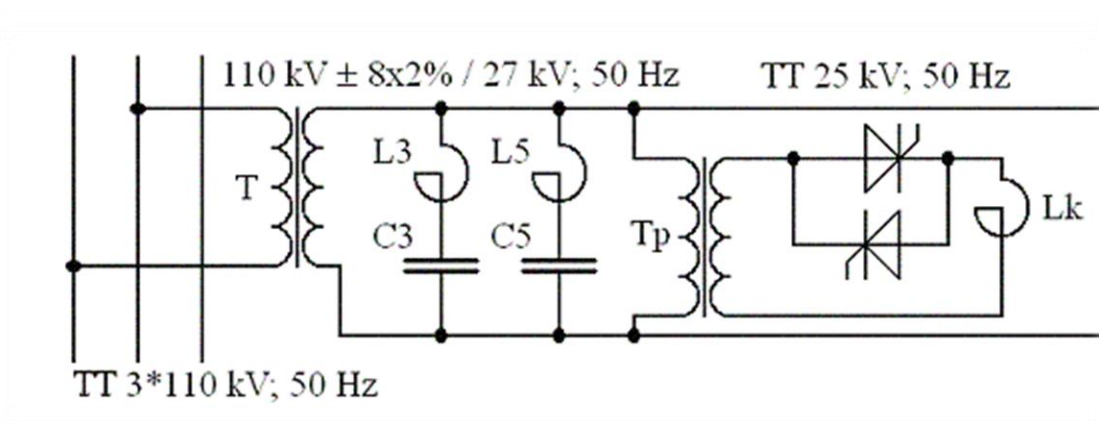
Tento kapacitní proud je kompenzován při nezatížené síti kompenzátozem s řízením proudu měničem v dekompenzační tlumivce.

FKZ se mohou použít jako beztransformátorové provedení kompenzačního zařízení s přímým připojením na síť.

U nás se používá FKZ se snižovacím transformátorem na 3 kV, 5 kV, 6 kV, 10 kV s filtry, které jsou naladěny na 3. a 5. harmonickou složku napětí.

Každý trakční transformátor má své FKZ (Doleček – Černý 2015: 60).

Obrázek č.3-FKZ



Zdroj: Šlezinger 2006: 40

1.3 Rekuperace a provoz TNS

Rekuperace je proces přeměny kinetické energie dopravního prostředku zpět na využitelnou elektrickou energii při brzdění.

Při rekuperaci pracuje motor v generátorickém režimu, který vrací získanou energii do napájecí sítě nebo ji ukládá do zásobníků energie (akumulátor, setrvačnick, superkapacitor).

1.3.1 Rekuperace u střídavých napájecích systémů

Nejjednodušší technické provedení rekuperace je v třífázové napájecí soustavě bez měniče, kde pohon drážního vozidla obstarávají asynchronní trakční motory. Princip je v tom, že pokud vlak jede z kopce, tak se zvýší rychlost vlaku natolik, že otáčky motoru překročí synchronní otáčky a moment motoru bude záporný. V soustavě, kde jsou asynchronní motory napájeny ze střídače, který generuje napájecí frekvenci, rekuperujeme tak že snížíme napájecí frekvenci.

Další systém, kde se rekuperace často využívá, je napájecí systém se sníženou frekvencí 15 kV 16,7 Hz. Z hlediska rekuperace se tato síť jeví jako nejvíce výhodná. Úplně celá síť od elektráren až po trakční vedení je jednofázová a navzájem propojená, takže kvůli tomu odpadají problémy s neutrálními poli při střídání fází. U těchto systémů je jistota odebrání rekuperované energie téměř stoprocentní, takže vozidla jsou vybavena záložní pneumatickou brzdou a elektrickou brzdou (rekuperace). V případě že je rekuperovaná energie nevyužita, jsou měnirny vybaveny brzdými odporníky, které přebytečnou energii spotřebují. Největší výhodou však je, že u těchto systémů má provozovatel vlastní napájecí síť (Německo), takže se nemusí řešit ekonomické problémy s provozovatelem distribuční sítě, jako je tomu například v České republice.

Pro nás je ze střídavých systémů nejvíce zajímavá rekuperace u napájecích sítí 25 kV, 50 Hz. Rekuperace byla prakticky možná až s nasazením pulsních měničů. Dříve používané diodové usměrňovače nedovolují zpětné vedení proudu a s tyristorovými usměrňovači se sice trochu rekuperovalo, ale nebylo to výhodné.

U této soustavy je v České republice rekuperace od distribuční sítě ČEZ zakázána, a to kvůli nepříznivým vlivům, které rekuperace zanáší do distribuční soustavy 110 kV. Tento požadavek se řeší zpětnými wattovými ochranami v trakčních napájecích stanicích. Tyto ochrany nám odepnou stanici od distribuční sítě 110 kV v případě, když výkon poteče směrem do distribuční sítě. Zajištění současného odběru z distribuční sítě v úseku, kde se rekuperuje tak, aby nedocházelo k těmto přetokům, je velice problematické, protože roste riziko vypnutí celé TNS (Doleček – Černý 2015: 58–65; Šimánek – Kudyn – Krátký 2011: 2–4.).

1.3.2 Rekuperace u stejnosměrných napájecích systémů (3 kV DC)

Rekuperace u stejnosměrných napájecích systémů je oproti střídavým systémům v principu jednodušší. Stejnosměrná trakční vozidla jsou většinou navržena tak, aby umožňovala brzdit rekuperaci a předala přebytečnou energii v daném úseku jinému drážnímu vozidlu. Trakční měnirny jsou vybaveny diodovými usměrňovači, které nedovolují přetoky energie do distribuční sítě, tudíž ji neovlivňují. Je však potřeba zajistit, aby v úseku, kde se rekuperuje, bylo další vozidlo. Moderní vozidlo pro soustavu 3 kV DC je vybaveno asynchronními trakčními motory, které jsou napájeny z jednoho nebo z více střídačů. Střídač vytváří třífázové napětí o proměnné efektivní hodnotě a frekvenci. Střídač je napájen ze

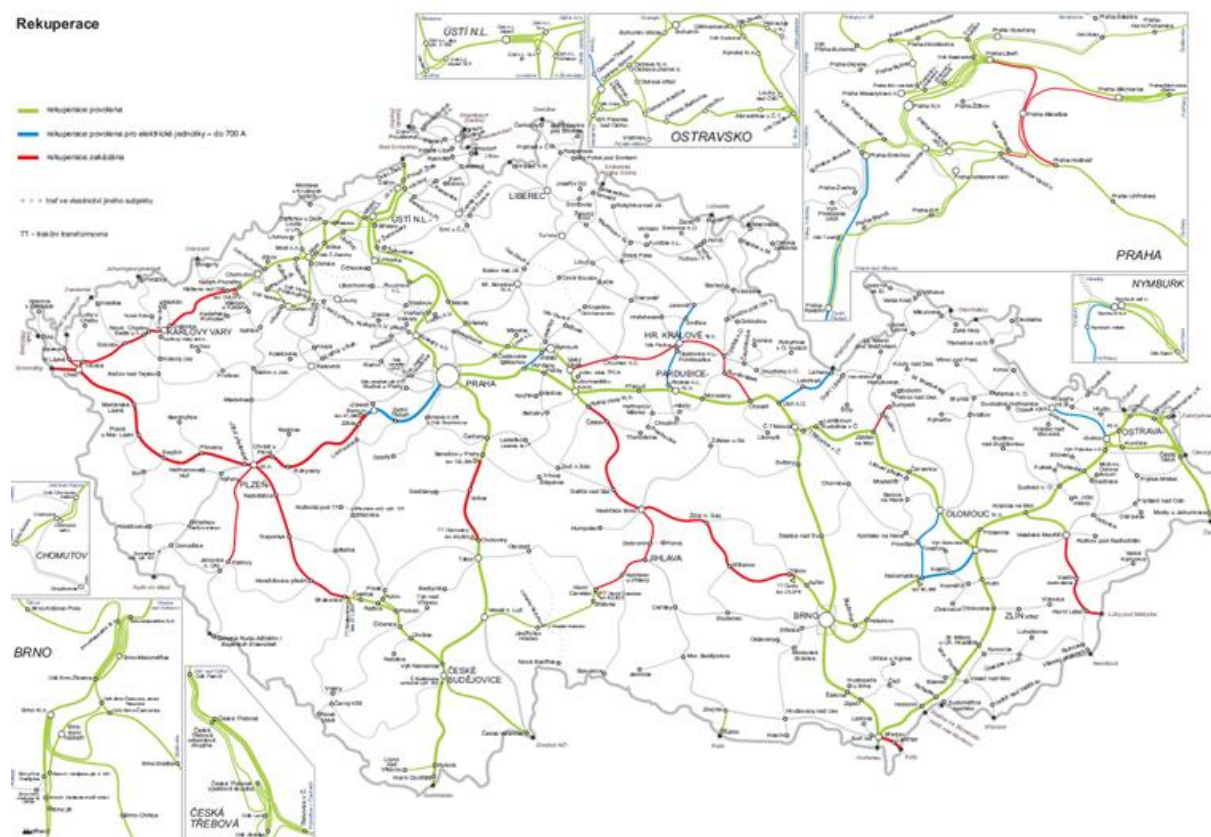
stejnoseměrného meziobvodu, který je tvořen z filtračního kondenzátoru (tvoří v podstatě napěťový zdroj). Tento meziobvod je napájen z troleje přes sběrač, hlavní vypínač a filtrační tlumivku. Ve stejnosměrném obvodu je zapojen také brzdový měnič (stejnoseměrný pulsní měnič), který připíná brzdový odpor do meziobvodu. Při rekuperaci dodává střídač do meziobvodu stejnosměrný proud, ten nabíjí kondenzátor (roste napětí). Pokud je v blízkosti rekuperujícího vozidla jiné vozidlo, které má dostatečně velký odběr, tak veškerý stejnosměrný proud z rekuperujícího vozidla teče do troleje. Pokud v blízkosti není dostatečně velký nebo žádný odběr, tak stejnosměrný proud zvyšuje napětí v meziobvodu do té doby, než nedosáhne hraniční hodnoty, která je nastavena pro sepnutí měniče. Tato hodnota musí být nastavena na vyšší hodnotu, než je hodnota maximálního napětí TNS a to proto, aby měnič nespínal i při provozních hodnotách. Sepnutím měniče dojde k vybití kondenzátoru a měnič se poté vypne. Tento děj se opakuje. Pokud tedy není v blízkosti dostatečný odběr, část rekuperované energie se spotřebuje v brzdovém odporu (Šimánek – Kudyn – Krátký 2011: 2–3).

1.3.3 Porovnání napájecích systémů

Z výše uvedených informací nám vychází, že rekuperace je výrazně jednodušší u sítí napájených ze stejnosměrných systémů. Pokud to vezmeme z technologického pohledu u vozidla, tak u stejnosměrných systémů nám stačí, aby drážní vozidlo bylo vybaveno stejnosměrným komutátorovým motorem, který je schopen pracovat v generátorickém režimu a odpor pro regulaci napětí na sběrači a maření přebytečné energie vyrobené při rekuperaci a brzdovým měničem. Dále stojí za zmínku, že rekuperace u stejnosměrných napájecích systémů nepřenáší negativní vlivy do distribuční sítě tudíž, je rekuperace povolena a hojně využívána. Výhodou může být i schopnost akumulace vyrobené energie rekuperací, a to v zásobnících energie.

U střídavých systémů se výhody a nevýhody rekuperace liší v závislosti na napájecích sítích, ale obecně je rekuperace problematictější než u stejnosměrných napájecích systémů, a to z technicko-ekonomického hlediska.

Obrázek č.4-Rekuperace na území České republiky

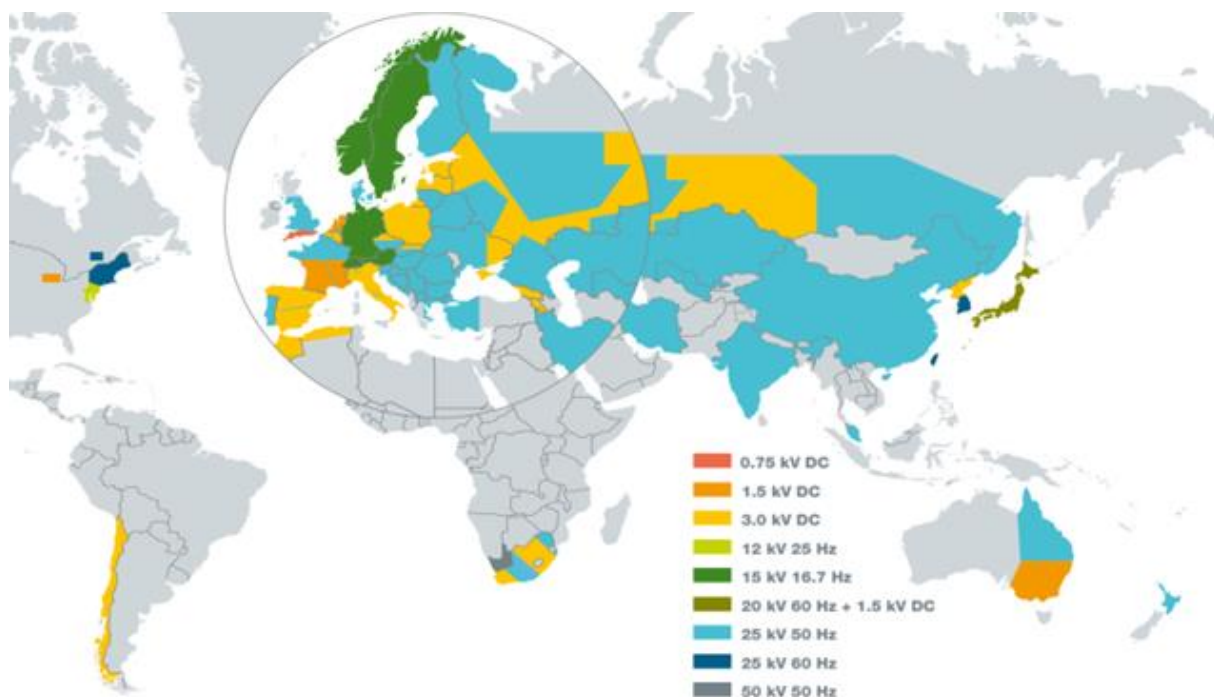


Zdroj: Krýže 2018

1.3.4 Problém rekuperace na soustavě 25 kV, 50 Hz

Soustava 25 kV, 50 Hz je hojně používána především v České republice, Velké Británii, téměř na celém Balkánském poloostrově, severní Francii atd..

Obrázek č.5 – mapa světa



Zdroj: Obrázek převzat z firemního materiálu "Bombardier Transportation Mitrac 3000 Driven by Reliability"

V České republice je tato soustava napájena z distribuční sítě 110 kV, kterou provozuje společnost ČEZ, vyjma jižních Čech a jižní Moravy, kterou provozuje společnost E-ON.

Rekuperace je v této soustavě prakticky uskutečnitelná. Trakční transformátory, které se používají v této síti, umístěny v TNS, jsou také technicky schopny přenést výkon opačnou cestou.

V České republice je ale rekuperace na této soustavě většinou nepovolena, a to z několika důvodů. Jedním z nich je, že by docházelo k nesymetrickému a nepravidelnému napájení jedné fáze, dále kvůli napěťovým skokům které nenadále nastávají, a také z ekonomických důvodů.

Pro dodavatele elektrické energie je z ekonomického hlediska zpětný odkup rekuperované energie nevýhodný a nabízejí za ni velmi nízké ceny. Tudíž se zamezuje přetoku energie zpět do distribuční sítě nasazením zpětných wattových ochran v trakční transformovně.

Další z důvodů je nízký účinník, deformace průběhu napětí a proudu a také nárazové dodávky rekuperované energie.

1.3.5 Napěťově pulsní usměrňovač a jeho použití v trakci.

U moderních drážních vozidel se používají napěťově pulsní usměrňovače, který některé z problémů zmíněné v kapitole 1.3.5 eliminuje anebo zlepšuje.

NPU jsou velmi důležité polovodičové měniče, které jsou nezbytné proto, aby drážní vozidlo mohlo vůbec rekuperovat.

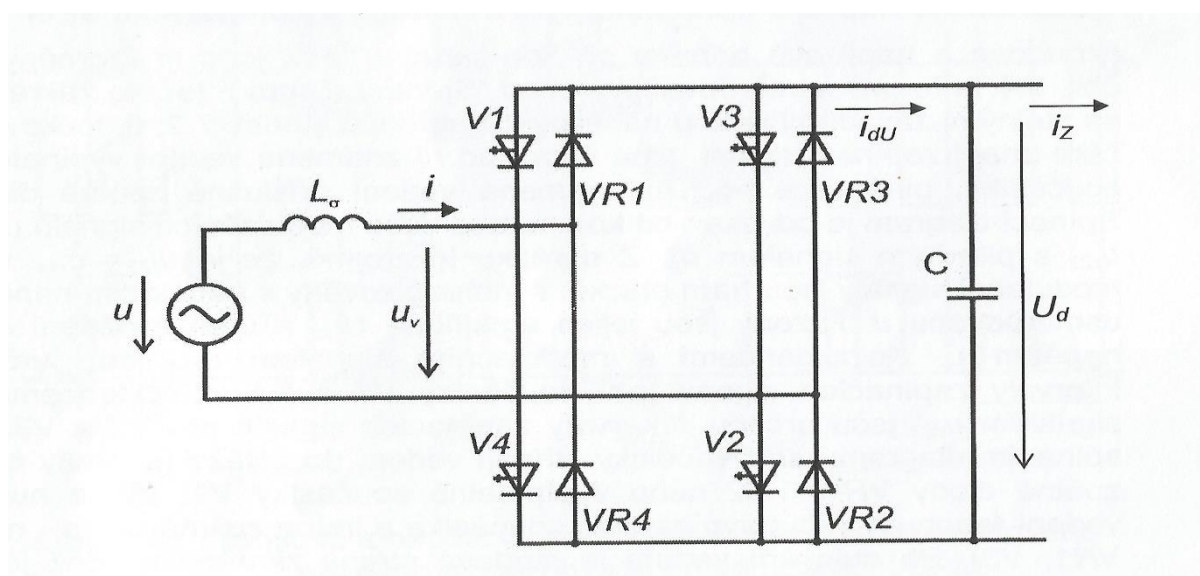
Napěťově pulsní usměrňovače, nebo slangově nesprávně nazývané také čtyřkvadrantové měniče, jsou vlastně napěťové střídače vybavené šířkovou pulsní modulací a provozované ve většině času v usměrňovačovém chodu.

NPU mají dvě „strany“ – střídavou a stejnosměrnou. Na střídavé straně NPU je napájecí síť s konstantním napětím a kmitočtem. Na stejnosměrné straně NPU je kapacitor se stabilizovaným napětím, na svorky kapacitoru je připojena zátěž.

NPU řídíme harmonickým proudem na střídavé straně, a to v usměrňovačovém chodu ve fázi, anebo při střídačovém chodu v proti-fázi s napájecím napětím. NPU umožňuje obousměrný přenos energie (Vondrášek – Glasberger a kolektiv 2017: 151–152).

V našem případě používáme jednofázové spojení NPU.

Obrázek č. 6 -jednofázové spojení NPU



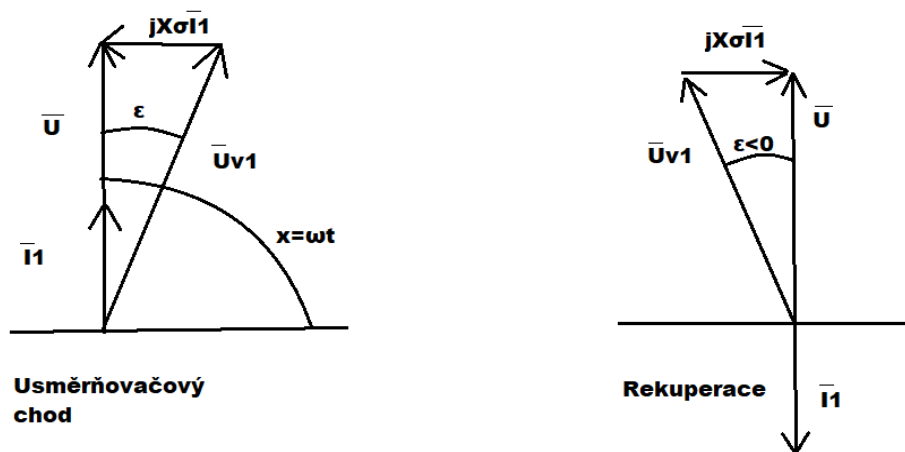
Zdroj: Vondrášek-Glasberger a kolektiv 2017: 151, obr. 8.2

Ze schématu na obr. platí pro fázory 1. harmonických průběhů u, i a u_v vztah

$$\overline{U}_{v1} = \overline{U} - jX\sigma\overline{I}_1 \dots X\sigma = \omega L\sigma$$

Ze kterého lze sestrojít fázorové diagramy.

Obrázek č. 7 – fázorové diagramy



Zdroj: Vondrášek-Glasberger a kolektiv 2017: 152, obr. 8.3

Z fázorového diagramu pro schéma na obr. vidíme, že pulsní usměrňovač je schopný dobře dodávat rekuperovanou energii zpět do sítě, a to i s dobrým účíníkem.

1.3.6 Rekuperace na soustavě 15 kV, 16,7 Hz

Pro srovnání bych se zmínil ještě o rekuperaci na soustavě se sníženým kmitočtem. Něco bylo již zmíněno v kapitole 1.3.1.

Tato trakční soustava se liší sníženým kmitočtem 16,7 Hz a napětím 15 kV. K hodnotě frekvence 16,7 Hz vedly technické důvody. K nim patří možnost transformace a tehdejší možnost úpravy síťového kmitočtu 50 Hz na kmitočet o nižší frekvenci.

Frekvence 16,7 Hz se dříve snadno realizoval pomocí rotačních měničů na bázi šesti-pólového synchronního motoru a dvoupólového alternátoru, neboť se jedná o 1/3 síťového kmitočtu. Dnes se snížení frekvence realizuje instalací polovodičových měničů.

Kmitočet 16,7 Hz se ukázal jako vyhovující pro napájení komutátorových trakčních motorů, které jsou v trakčních vozidlech.

Nižším kmitočtem dochází i ke snížení impedance trakčního vedení a společně s použitím vysokého napětí pomůže ke snížení počtu napájecích stanic

Trakční napěťová soustava je rozšířena pro napájení trakční soustavy především v Německu, Rakousku, Švýcarsku, Švédsku a Norsku. V Česku se s touto soustavou můžeme setkat pouze na trati Znojmo-Šatov-Retz (Rakousko), která je napájena z Rakouska. Z hlediska rekuperace má tato trakční soustava oproti trakční soustavě 25 kV, 50 Hz používané v České republice několik výhod. Největší výhodou je v tom, že celá trakční soustava od elektrárny přes distribuční síť až po trakční síť je jednotná a jednofázová a kvůli tomu se nemusí řešit obchodní podmínky v případě odkupu rekuperované energie. Kvůli jednofázovému přenosovému vedení vysokého napětí, které je nezávislé na rozvodné třífázové síti, je rekuperace v této síti bezproblémová.

Trakční vozy jsou zde vybaveny pulsním usměrňovačem, který jak už bylo zmíněno v kapitole 1.3.4., umožňuje oboustranný průtok výkonu. Kvůli tomu že má systém vlastní distribuční síť, jsou zde i trakční transformovny také koncipovány na obousměrný přenos energie. Odpadají zde problémy s neutrálními poli při střídání fází, a proto je zde téměř stoprocentní jistota odebrání rekuperované energie. Rekuperovanou energii nemusíme ihned spotřebovat, ale může ji přenést pomocí distribuční soustavy do jiného místa, kde se využije.

U této sítě se rekuperace využívá trvale (Doleček – Černý 2015: 50–55).

1.3.7 Proč se v České republice nerekuje

V České republice se rekuperuje pouze u stejnosměrných napájecích systémů a někde i u střídavých systémů.

U soustavy 25 kV, 50 Hz se v České republice nerekuje, a to převážně z ekonomických důvodů.

V současné době, kdy je železniční infrastruktura od železničního provozu oddělena, je výkup rekuperované elektrické energie předmětem obchodních vztahů a zájmů mezi dodavateli elektrické energie (ČEZ, E-ON a SŽDC), distributorem rekuperované energie (SŽDC) a provozovatelem železniční dopravy (České dráhy, atd.).

České dráhy by mohly vidět v možnosti vracet rekuperovanou energii do distribuční soustavy mírné snížení provozních nákladů, a to by přispělo ke konkurenceschopnosti železniční osobní dopravy.

Naopak SŽDC, který spravuje v Česku dopravní cestu, by se mohlo stavět negativně k rekuperaci do trakční napájecí sítě, a to kvůli tomu, že úspory energie by byly zanedbatelné, a naopak by vzrostly náklady na vozidla a infrastrukturu. Dále by pak mohla vyjít v potaz problematika měření spotřebované a vrácené energie a zohlednění nákladů na distribuci v trakční napájecí soustavě.

Podle neoficiálních informací se tam, kde již rekuperace je, v současné době nejedná o výkupu rekuperované energie, a to z důvodu toho, že o to dodavatelé elektrické energie do trakční sítě nemají zájem (Lednický 2014: 32–37).

2 Řešení TNS 25 kV, 50 Hz

2.1 TNS 25 kV, 50 Hz:

Trakční napájecí stanice (Trakční transformovny) pro systém 25 kV, 50 Hz jsou nejjednodušší. Přeměna trojfázového proudu na jednofázový se děje pouhou transformací ze 110 kV/25÷27 kV z jednoho nebo ze dvou sdružených napětí. Hlavním principiálním významem a výhodou střídavého napájení trakční soustavy je skutečnost, že elektrická energie se přivádí trakčním vedením k trakčním vozidlům s napětím několikanásobně vyšším než u soustav stejnosměrných. Dále pak může být, vzhledem k napětí 25 kV, vzdálenost mezi napájecími stanicemi až 50 km, průřezy vodičů jsou menší a kvůli velkému napětí lze přenášet výkony na větší vzdálenosti. Dalšími výhodami jsou velmi malé činné ztráty transformoven, napájecí stanice lze provést jako venkovní a mohou být jednoduše i dálkově řízené.

Z ekonomického hlediska je budování trakčních transformoven také výhodné, jelikož oproti stejnosměrným soustavám nemusíme usměrňovat proud, a proto nemusíme budovat měnírny.

Tento systém napájecích stanic má i svoje nevýhody. První a také jedna z největších nevýhod, je nesymetrické zatěžování třífázové distribuční sítě 110 kV. Proudový odběr z jedné fáze totiž způsobuje proudovou nesouměrnost, která je příčinou nestejných úbytků napětí v jednotlivých fázích neboli napěťové nesymetrie. Nevýhodou je také nesinusový proud odebíraný vozidly, které obsahují usměrňovače, tento proud způsobuje vznik vyšších harmonických v trakčním vedení a napájecí soustavě.

Další nevýhodou je proměnlivý fázový posun základního harmonického proudu proti napětí v trakčním vedení, který komplikuje kompenzaci účinníku.

Aby účinek nepříznivých vlivů na síť 110 kV byl minimální, musí napájecí třífázová síť 110 kV mít dostatečně velký zkratový výkon, aby nesymetrické zatížení nezpůsobilo nedovolenou napěťovou a úhlovou nesymetrii mezi fázemi. Dále pak trakční výkonová zátěž musí být co nejrovnoměrněji rozdělena na všechny tři fáze napájecí soustavy 110 kV.

Jedním z řešení je napájení pomocí jednofázových transformátorů uspořádaných tak, aby byly postupně připojeny na všechna tři sdružená napětí napájecí soustavy 110 kV (obr. 8). Musí být ale splněn předpoklad, že zatížení transformoven je přibližně stejné a že jsou napájeny

ze stejného vedení VVN, poté vzniká jen nepatrná nesymetrie v napájecí síti 110 kV. V České republice však kvůli členité energetické soustavě nelze splnit předpoklad napájení ze stejného vedení VVN, proto se tento způsob v Česku nepoužívá. Používá se například v Rusku, kde jsou na to vhodné podmínky.

Napájení trakční soustavy probíhá několika různými způsoby:

a) Napájení trakční soustavy jedním jednofázovým transformátorem připojeným na dvě fáze třífázové sítě. Tento způsob je nejjednodušší, ale nesymetricky zatěžuje třífázovou síť. Byl poprvé použit na naší první napájecí stanici 25 kv Nezvěstice, konkrétně na trase Plzeň-Horažďovice. Dále je dnes použit v TNS: Klatovy, Benešov, Nedakonice, Lipno, Kadaň–Pruněřov.

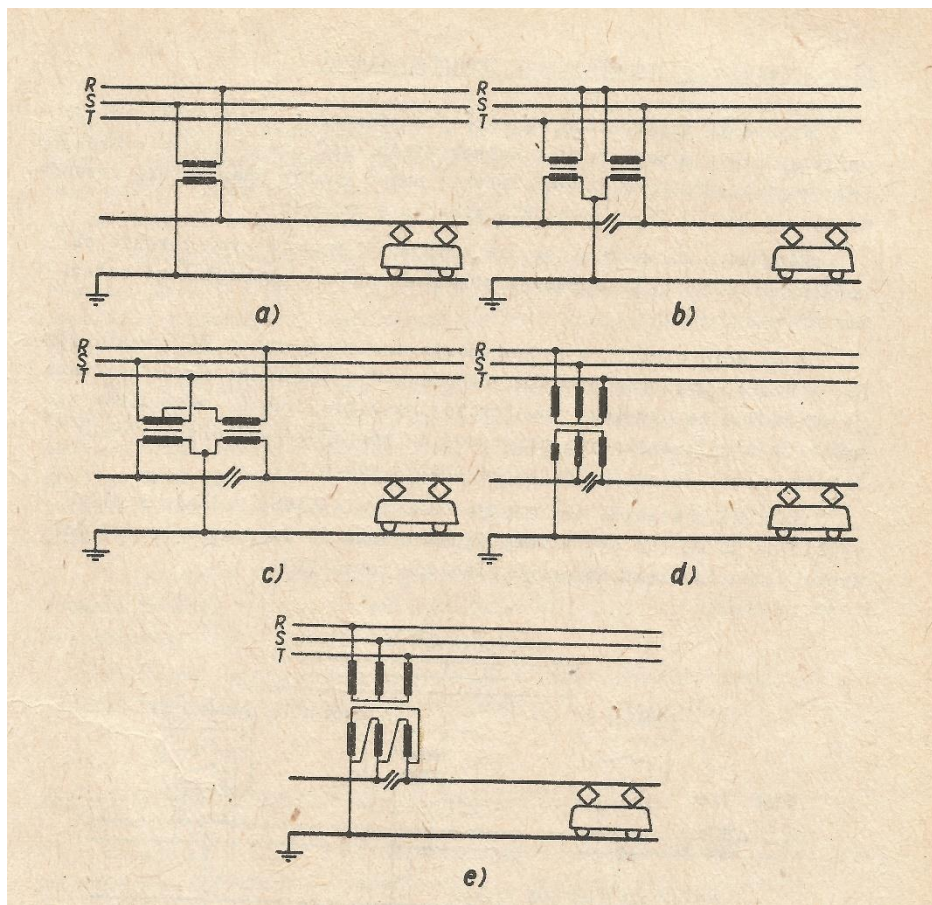
b) Napájení trakční soustavy dvěma jednofázovými transformátory připojenými na různé dvě fáze třífázové napájecí sítě, tzv. zapojení do „V“, anebo do otevřeného trojúhelníka.

c) Napájení trakční soustavy Scottovým transformátorem. Tento způsob vznikl už v počátcích jednofázové proudové soustavy. Transformátor má speciální konstrukci. Ta symetricky zatěžuje třífázovou síť. Používá se například v Japonsku.

d) Napájení trakční soustavy třífázovým transformátorem s nesouměrným sekundárním vinutím. Při stejné jednofázové zátěži trakčního vedení symetricky zatěžuje třífázovou soustavu.

e) Napájení třífázovým transformátorem ve spojení Y/D – 1 a nebo Y/D 11. Transformátor je symetrický. Použití v zemích bývalého SSSR (Fejt 1966: 156–164; Matouch – Princ 1977: 505–507).

Obrázek č.8 – Způsoby napájení trakčních soustav



Zdroj: Matouch - Princ 1977: 507, obr. 292

V České republice se používá zapojení dvou jednofázových transformátorů do „V“. Primární vinutí transformátorů jsou zapojena na rozdílná napětí, při stejném odběru v obou napájecích úsecích a při stejném napětí a účinníku v sekundárních vinutích vzniká proudová a výkonová nesymetrie 50%. Při jiných podmínkách se může proudová nesymetrie měnit v rozmezí 0-100 %. Nesymetrie způsobena nevyváženým trakčním odběrem má nepříznivé účinky na třífázovou síť 110 kV (Dirbák 2013: 14).

2.1.1 Trakční transformovna

Trakční transformovna se skládá v České republice z venkovní rozvodny 110 kV, 25 kV a z pomocné budovy.

Rozvodna 110 kV má prodloužené přípojnice a nebo uspořádání do typu H o zkratovém výkonu 3500 MVA, na který jsou dimenzovány veškeré přístroje v transformovně.

Rozvodna 110 kV obsahuje:

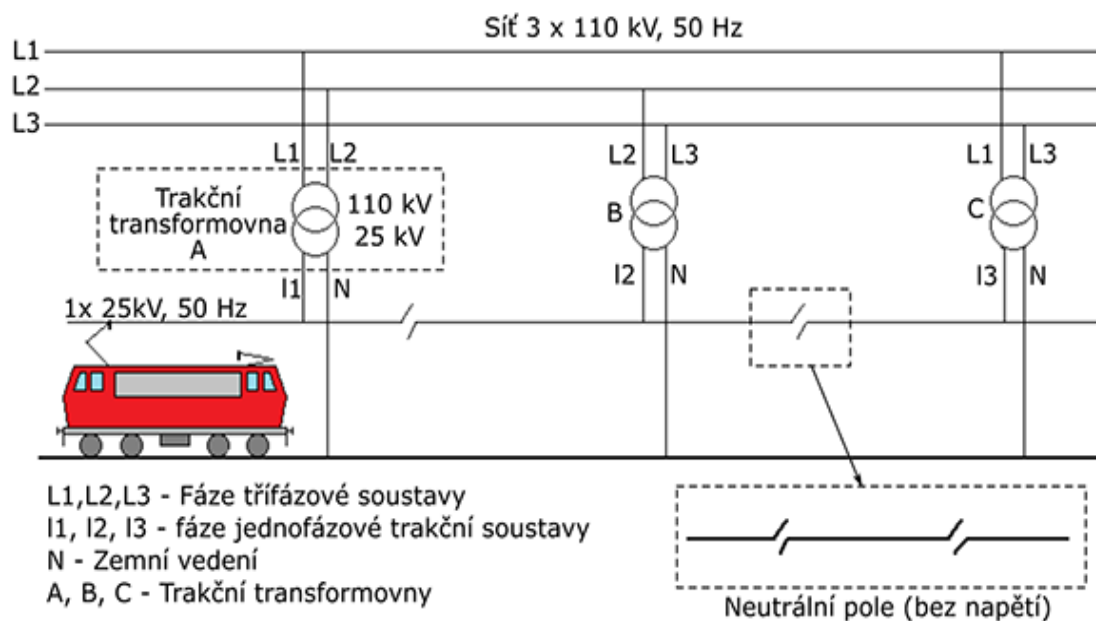
- Dvě pole pro přívody.
- Dvě pole pro trakční transformátor 10 MVA.
- Odpojovače – provedení odpojovačů je jako dvoupólové.
- Trakční transformátory.

V rozvodně jsou dva jednofázové trakční regulační transformátory v zapojení do „V“, každý má jmenovitý výkon 10 MVA bez ofukování, 13,3 MVA s ofukováním. Tyto transformátory jsou zapojeny svorkami primárního vinutí připojeny mezi dvě fáze třífázové energetické soustavy VVN 110 kV. Výstup ze sekundárního vinutí trakčního transformátoru je následně připojen jedním vodičem na trakční vedení a druhým vodičem je spojen s kolejem, které utváří zemní vedení.

Vzdálenost trakčních transformoven od sebe je asi 50 km.

V praxi existují dva základní typy napájení trakčního vedení. První je typ T (obr. 9). Zde je trakční transformátor umístěn uprostřed napájecího úseku. Napájené úseky mohou také obsahovat spínací stanice. Napájení tohoto typu je nejčastěji nasazováno u nepříliš zatížených nebo koncových úsecích. Při nasazení, na tratích více využívaných, musí trakční transformovna obsahovat dva transformátory, které se vzájemně zálohují.

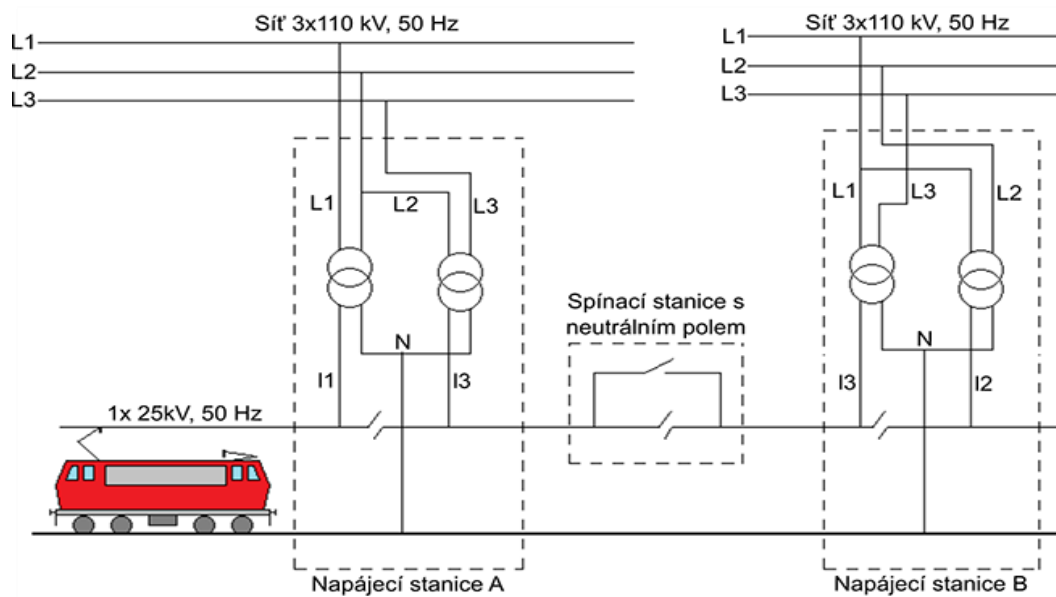
Obrázek č. 9 – Schéma napájení (typ T)



Zdroj: Pavlíček 2005: obr. 45

Nejčastěji se používá napájení trakčního vedení typu „V“. (obr. 10). TNS tohoto typu mají vždy dva jednofázové transformátory. Mezi napájecími stanicemi jsou vloženy spínací stanice a neutrální pole. V případě poruchy napájecí stanice lze její výkon rozdělit mezi dvě sousední napájecí stanice. Primární vynutí jednofázových transformátorů jsou zapojena na různé dvě fáze třífázové energetické soustavy tak, aby ve vektorovém zobrazení vznikl otevřený trojúhelník (odtud zapojení do „V“) Na obr. 10 lze vidět že jsou celkem tři možnosti zapojení (Fejt 1966: 156–164; Matouch – Princ 1977: 505–507).

Obrázek č.10 – Schéma napájení (typ V)



Zdroj: Pavlíček 2005: obr. 46

2.1.2 Spínací stanice

Spínací stanice se skládá ze dvou částí, a to z venkovní rozvodny 25 kV a z pomocné budovy.

Spínací stanice v trakční soustavě 25 kV, 50 Hz jsou zařízení, která umožňují napájení příslušných úseků trakčního vedení tak, aby byla zaručena potřebná selektivita vypínání zkratových proudů tak, že by se v případě poruchy odpojil pouze úsek s poruchou a ostatní úseky zůstaly nadále v provozu.

Spínací stanice umožňují dvoustranné napájení trakčního vedení, to znamená, že je možná paralelní spolupráce sousedních napájecích stanic, ale nevyužívá se to.

Spínací stanice můžeme dělit podle použití.

Podle způsobu spínání trakčního vedení můžeme spínací stanice rozdělit na:

- Podélné spínací stanice
- Příčné spínací stanice
- Kombinované spínací stanice

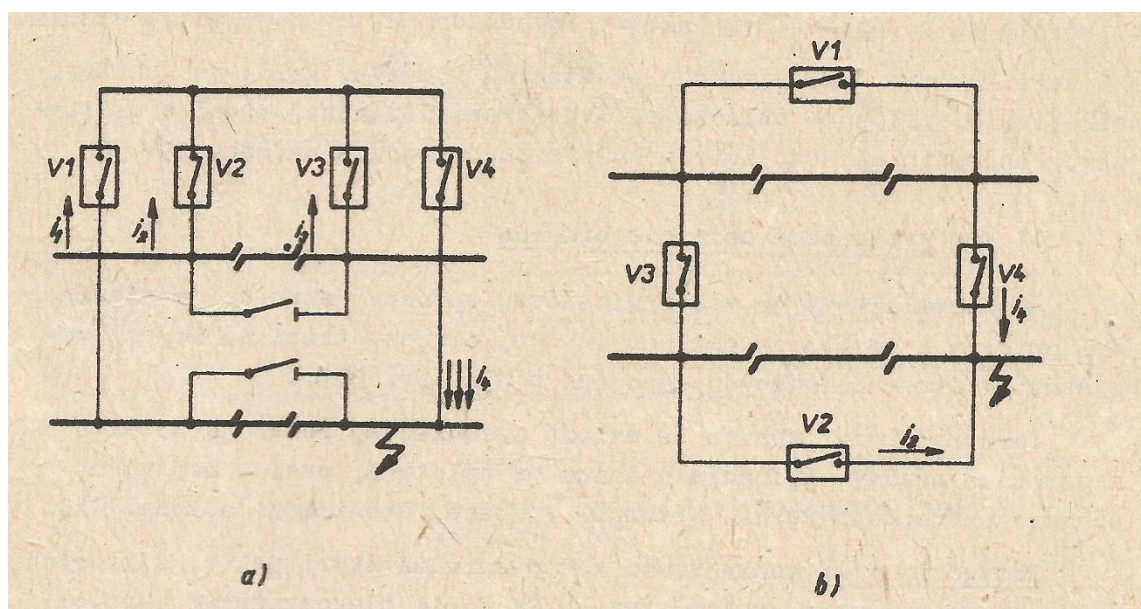
- Zvláštní spínací stanice.

Podélné spínací stanice jsou nejjednodušší a používají se na jednokolejných tratích, kde jsou umístěny mezi dvě sousední napájecí stanice. Tato spínací stanice má jeden vypínač, který vypíná při zkratu vlivem působení nadproudové ochrany a zapíná se automaticky pokud je na trolejovém vedení napětí z obou stran.

Příčné spínací stanice mají, podobně jako podélné, pouze jeden vypínač, který však trakční vedení spíná příčně. Vypínač vypíná vlivem nadproudové ochrany a zapíná se automaticky, pokud je napětí na obou stopách trolejového vedení. Tyto spínací stanice se používají na vyrovnání (snížení) úbytků napětí v trakčních vedení na tratích s jednostranným napájením anebo tam, kde je jedna kolej více zatížená než kolej druhá.

Kombinované spínací stanice se používají na dvojkolejných tratích pro spínání trakčního vedení mezi dvěma sousedními napájecími stanicemi. Tato spínací stanice spíná trolejové vedení příčně i podélně. Pro tento lze použít dvě schémata a to schéma uzlové a čtyřúhelníkové (obr. 11). Čtyřúhelníkové schéma je nejpoužívanější v trakční soustavě 25 kV, 50 Hz. Při zkratu v některém z úseků vypínají vždy dva vypínače.

Obrázek č.11 – Spínací stanice



Zdroj: Matouch - Princ 1977: 535, obr. 309

Zvláštní spínací stanice mají nejrůznější podoby podle svého účelu použití. Tyto stanice jsou budované ve velkých železničních uzlech pro rozdělení větších kolejových celků a nebo pro napájení přípojniových tratí apod.. Jejich podoby jsou často kombinace výše zmíněných spínacích stanic.

Podle zhotovení spínacích stanic je lze dělit na jednovypínačové a vícevypínačové.

Jednovypínačové spínací stanice slouží k příčnému propojení obou stop trakčního vedení, nebo k podélnému propojení jedné stopy děleného vedení. Spínací stanice pro podélné spínání jedné stopy trakčního vedení na jednokolejně trati musí znemožnit propojení obou přilehlých trakčních transformoven.

Vícevypínačové spínací stanice musí umožňovat jednostranné napájení trakčního vedení z přilehlých TNS, dvoustranné napájení trakčního vedení při paralelní spolupráci přilehlých TNS, podélné propojení obou stop trakčního vedení při přerušném napájení z jedné TNS a příčné propojení obou stop trakčního vedení.

Pomocná budova je přízemní stavba, ve které je nejpotřebnější vybavení pro ovládání spínací stanice. V místnosti manipulace je rozvaděč na ovládání ochrany, rozvaděč vlastní spotřeby a rozvaděč jednosměrný. V budově je i místnost na zařízení dálkového ovládání – akumulátorovna (Matouch – Princ 1977: 534–537).

2.1.3 Zamezení rekuperace v krizových stavech

Napájecí stanice jsou pro tuto soustavu provozovány jednostranně, a to z důvodu zamezení vzniku vyrovnávacích proudů mezi TNS. Sousední TNS navíc bývají občas připojeny na různé fáze DS. Z toho nám vyplývá, že jejich propojení by způsobilo mezifázový zkrat.

V případě poruchy či výluky jedné TNS jsou blízké napájecí úseky napájeny ze sousedních TNS.

Způsob detekce zkratu na TNS nebo na spínací stanici je takový, že v případě blízkého zkratu reaguje rychle mžiková ochrana a v případě zkratu vzdáleného, reaguje ochrana distanční.

Distanční ochrana měří hodnotu a charakter impedance trakčního vedení.

Zkratový proud je omezen impedancí trakčního vedení a rozptylovou indukčností trakčního transformátoru. Kvůli tomu jsou zkratové proudy dobře odlišitelné od trakčního proudu kvůli tomu, že mají nízký účinník induktivního charakteru.

Distanční ochrana reaguje od určité hodnoty proudu a při poklesu účinníku pod stanovenou hodnotu. Sleduje i charakter účinníku (ochrana reaguje pouze pokud je účinník induktivního charakteru.).

Požadavky na ukončení rekuperace jsou:

1) Vozidlo musí ukončit rekuperaci, pokud dojde ke ztrátě napětí

2) Vozidlo musí ukončit rekuperaci, pokud dojde ke zkratu v daném napájecím úseku.

Požadavek 2) lze rozdělit ještě na dva problémy:

- Vozidlo může rekuperovat pouze takovou velikostí proudu, aby nezabránilo detekci zkratu trakční napájecí stanicí.

- Vozidlo musí ukončit rekuperaci do úseku se zkratem potom, co došlo k vypnutí úseku z TNS.

Požadavek na ukončení rekuperace při ztrátě napětí je splněn tím, že vozidlo se snaží dodávat do trakčního vedení pouze činný proud, co při odpojení TNS, která dodává do sítě jalovou energii, vede k selhání regulace účinníku NPU a k jeho následnému vypnutí. NPU se zablokuje během několika milisekund.

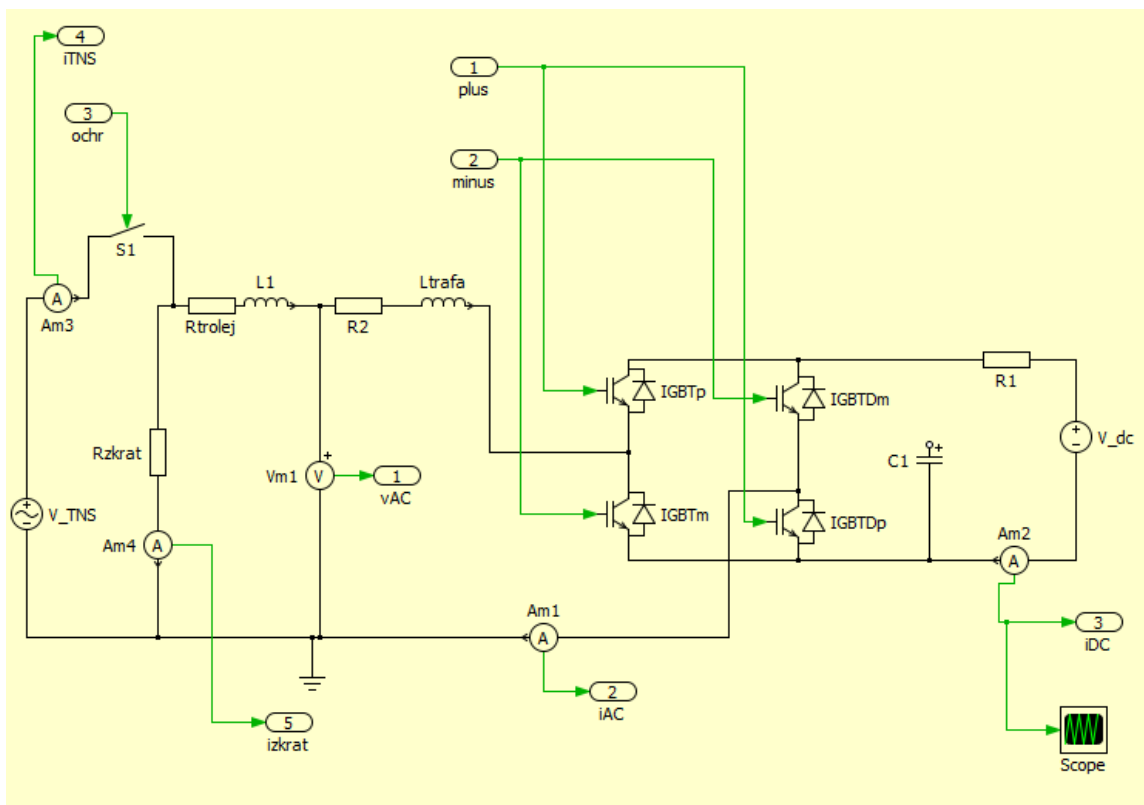
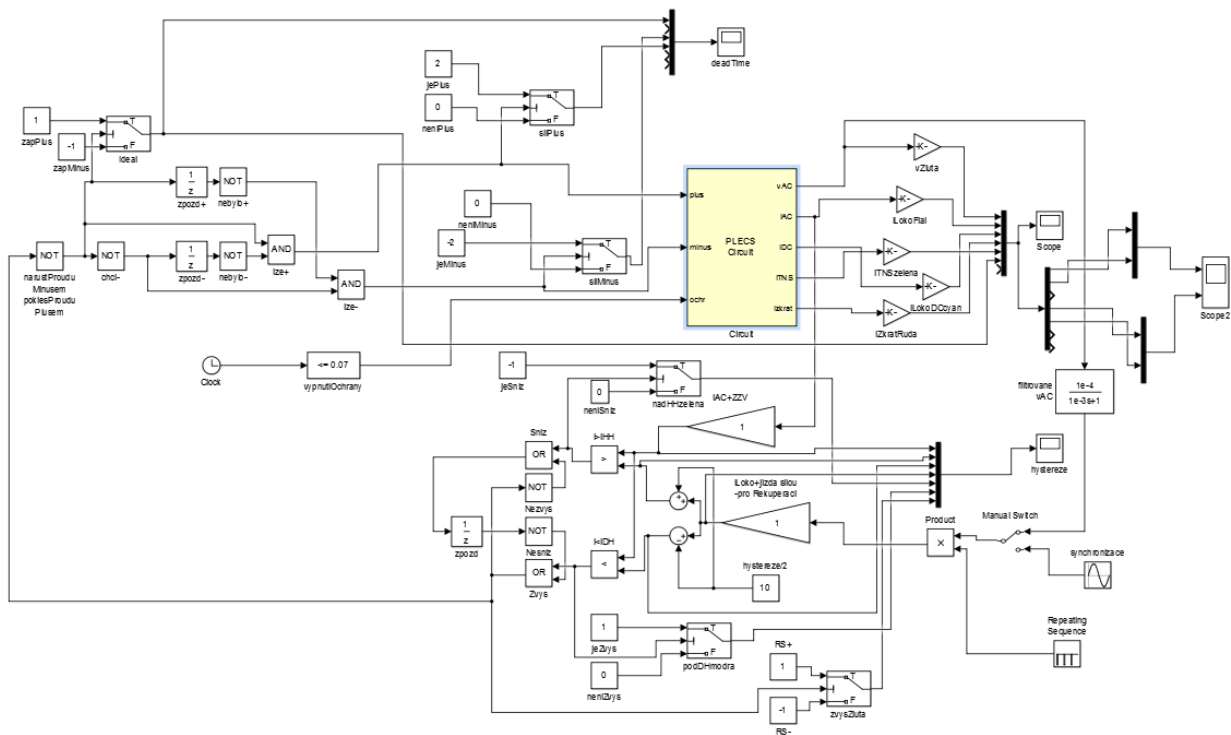
Požadavek na ukončení rekuperace při zkratu v napájecím úseku nepředstavuje taktéž problém, a to kvůli použití distanční ochrany. Rekuperující vozidlo dodává výhradně činný proud mnohem menší než vlastní zkratový proud, ve kterém převládá jalová induktivní složka. Na TNS nedochází k významnému ovlivnění velikosti zkratového proudu ani jeho účinníku. Správná a bezpečná funkce distanční ochrany je tedy zachována.

Vzhledem k použitému napětí je i vzdálený zkrat na vozidle rozpoznatelný nadproudovou nebo podpěťovou ochranou. V případě hodně dlouhých úseků při výlukách TNS, kdy by nemuselo dojít k vybavení nadproudové nebo podpěťové ochrany, dojde kvůli induktivnímu charakteru zkratového proudu k selhání regulace účinníku a zablokování NPU (Šimánek – Kudyn – Krátký 2011: 3–7).

3 Simulační model provozních a krizových stavů

K vytvoření simulace byl použit program MATLAB Simulink a rozšíření plects.

Obrázek č.12 – Řídicí obvod

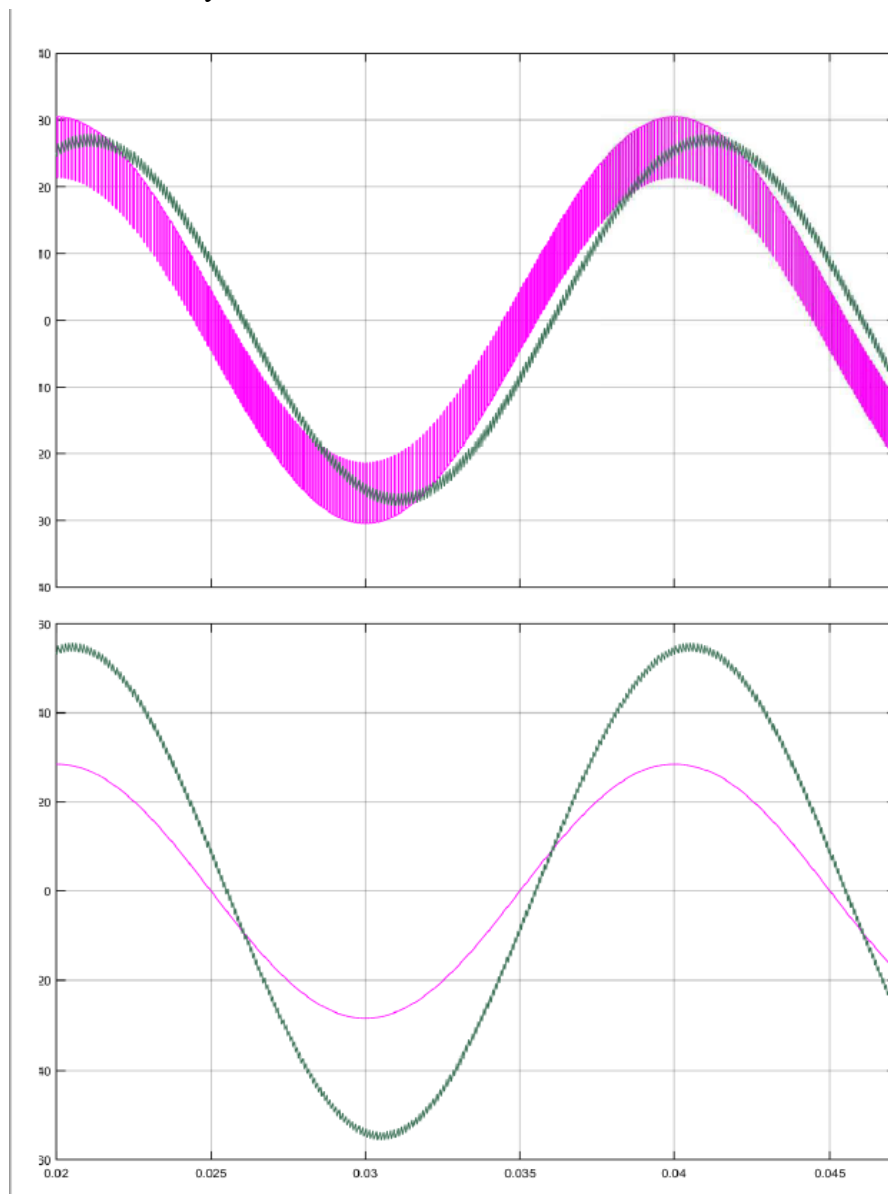


Obrázek č.13 – Výkonový obvod

3.1 Motorický režim

Při motorickém režimu je napětí (horní průběh – fialová barva) skoro ve fázi s proudem lokomotivy (horní průběh – zelená barva). Fázový posun proudu je dán indukčností trakčního vedení a transformátoru lokomotivy. Spodní průběhy ukazují zkratový proud (fialová) a proud TNS (zelená).

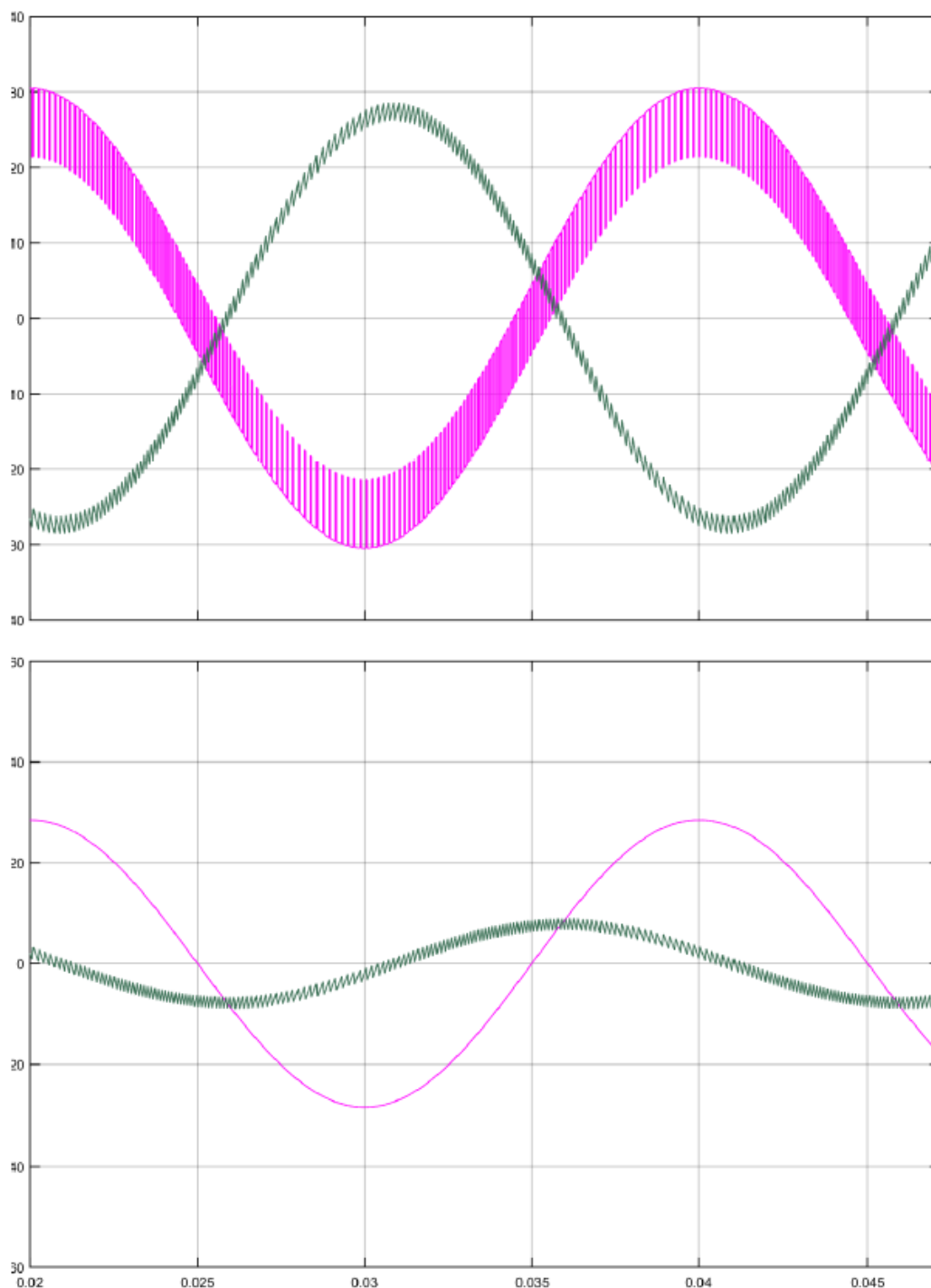
Obrázek č. 14 – Průběhy v motorickém režimu



3.2 Generátorický režim

Pro generátorický režim jsou průběhy v podstatě stejné jako u motorického režimu, akorát jsou v protifázi. Jednotlivé průběhy mají stejnou barvu, polohu a význam jako u motorického režimu.

Obrázek č.15 – Průběhy v generátorickém režimu

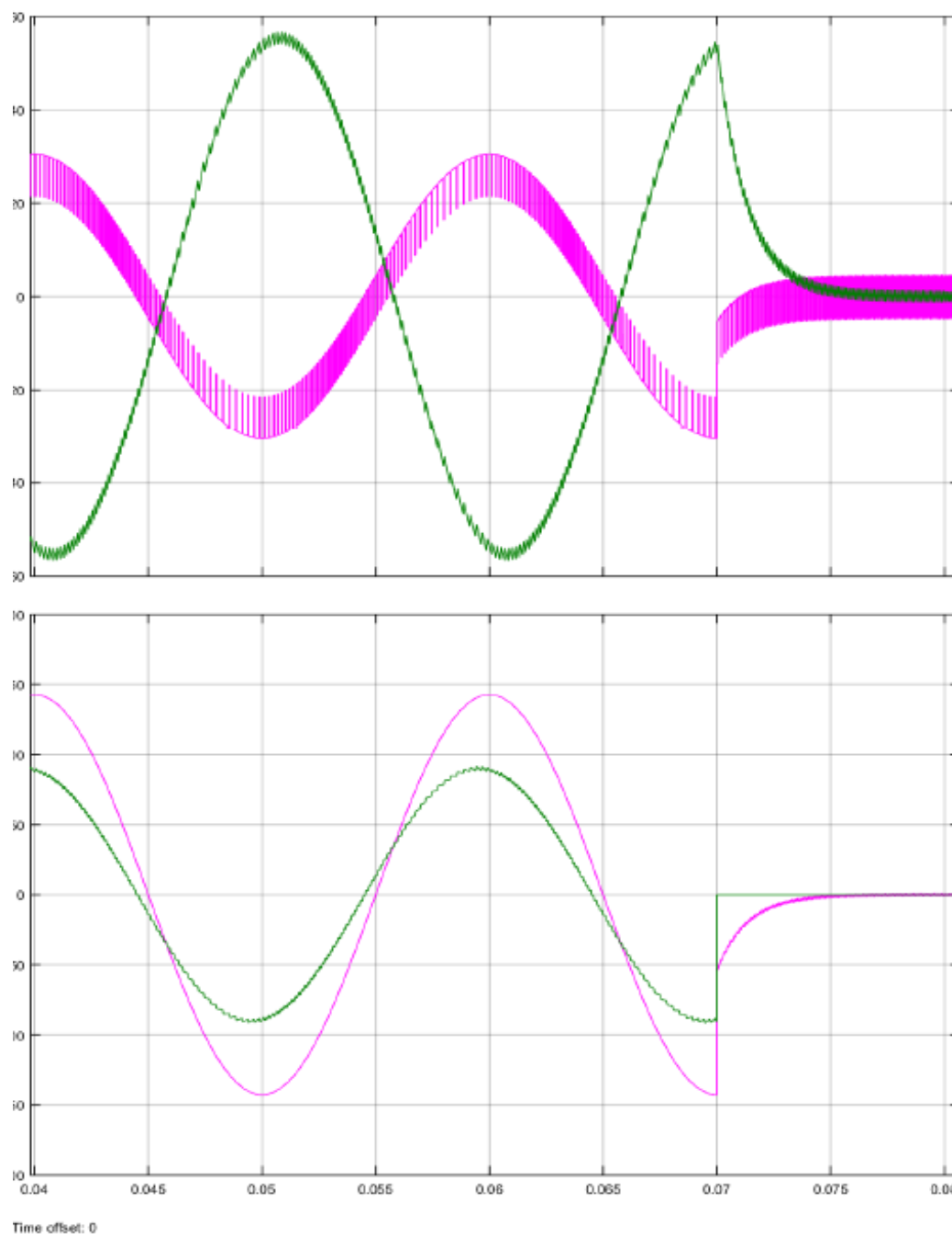


3.3 Porucha v napájeném úseku

Na průbězích je zobrazen režim rekuperace a následný zkrat v napájeném úseku.

Lze vidět celkem rychlou reakci ochran a následné zamezení rekuperace při detekci poruchy. Průběhy mají opět stejný význam, barvu a polohu jako u předchozích případů.

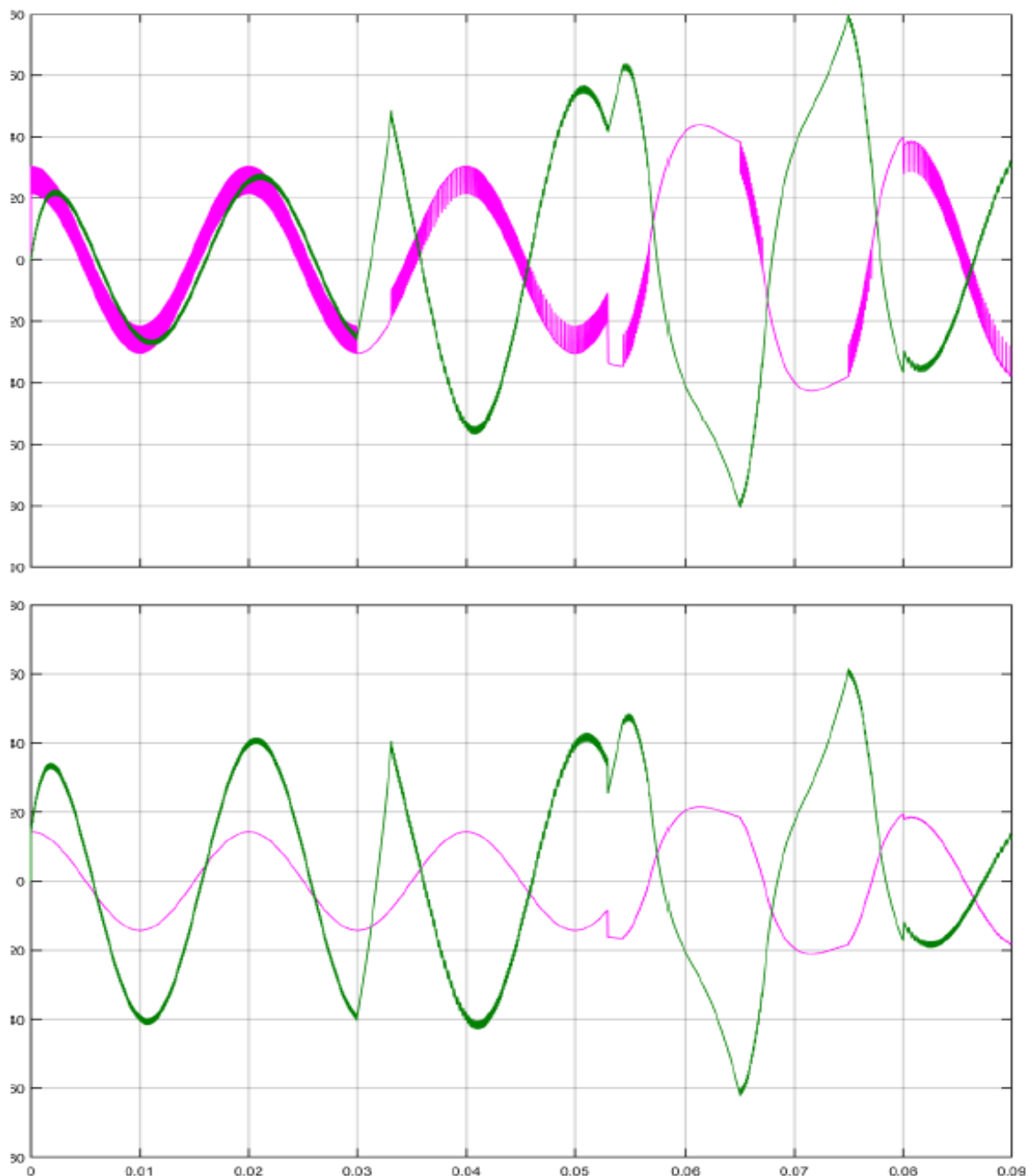
Obrázek č. 16 – Průběhy při zkratu v napájeném úseku v režimu, kdy vozidlo rekuperuje



3.4 Pokles napětí v TNS

Na průběžích lze vidět případ, kdy dojde k poklesu napětí na hodnotu zhruba 24 % z 25 kV v TNS. Vozidlo je v režimu rekuperace. Z průběhu lze vyčíst že vozidlo se při poklesu napětí v TNS snaží navýšit hodnotu napětí v napájecím úseku do doby, než zareagují ochrany. Průběhy mají opět stejný význam, barvu a polohu jako u předchozích případů.

Obrázek č. 17 – Průběhy při poklesu napětí TNS v režimu, kdy vozidlo rekuperuje



Závěr

Trakční soustavy a celkově trakční energetika se s technologickým progresem neustále vyvíjí. Určitě si myslím, že s nasazováním nových technologií bude rekuperace na střídavých soustavách v budoucnu samozřejmostí téměř všude. Ve vracení rekuperované energie vidím ekonomické výhody, avšak aby k tomu došlo, musejí se odstranit jisté technické problémy. Určitě je škoda, že rekuperovaná energie není dále využívána. Samozřejmě je to i o dohodě mezi provozovateli distribuční sítě a provozovatelem trakční soustavy. V České republice bych viděl řešení v modernizaci vozového parku, železniční infrastruktury a přechodu na jednotnou střídavou trakční soustavu. Jednotné trakční soustavy bychom se měly v České republice v blízké budoucnosti dočkat. Některé z těchto zmíněných věcí jsem popsal v kapitole 1.

Dále je v této kapitole stručně popsán princip rekuperace na stejnosměrné soustavě a také na střídavé soustavě 15 kV, 16,7 Hz používané v Německu a v několika dalších zemích. V soustavě 15 kV, 16,7 Hz se oproti naší střídavé soustavě rekuperace běžně využívá. Podrobněji popsáno v kapitole 1.3.6.

V kapitole 2.1.3 je shrnuta problematika zamezení rekuperace v krizových stavech na soustavě 25 kV, 50 Hz. Nová drážní vozidla vybavená NPU tyto podmínky splňují, tudíž jsou schopna bezpečně rekuperovat.

V kapitole 3 lze vidět průběhy dvou provozních a dvou poruchových stavů v trakční soustavě. V prvním případě poruchového stavu dojde ke zkratu na vedení. Zde je vidět akční zásah ochrany. Dále je zde vidět stav, kdy dojde ke snížení napájecího napětí v TNS. Zde lze vidět chování vozidla, které rekuperuje předtím, než zareagují ochrany.

Seznam zdrojů

- Dirbák, T. (2013). *Energetika dopravních systémů* [bakalářská práce] (Ostrava: VŠB).
- Doleček, R. – Černý, O. (2015). *Trakční napájecí soustavy: studijní opora* (Pardubice: DFJP).
- Fabian, M – Balkovský, M. (nedatováno).. CAD. nedatováno
(<https://www.cad.cz/strojirenstvi/38-strojirenstvi/8586-zeleznice-azeleznicky-elektricke-lokomotivy-stridava-napajeci-soustava.html>, 17. 3. 2019).
- Fejt, J. (1966). *Pevná trakční zařízení* (Český Těšín: Nadas).
- Krýže, P. (2018). Rekuperace. *Provoz SŽDC*. 6. 11. 2018
(<https://provoz.szdc.cz/PORTAL/Show.aspx?path=/Data/Mapy/rekuperace.pdf>, 2. 4. 2019).
- Lednický, D. (2014). *Maximalizace efektu rekuperačního brzdění* [diplomová práce] (Praha: ČVÚT).
- Matouch, Z. – Princ, J. (1977). *Trakčná energetika* (Praha: Nadas).
- Molek, T. (2015). Elektrifikace českých železnic. *OENERGETICE*. 9. 11. 2015
(<https://oenergetice.cz/technologie/elektrifikace-ceskych-zeleznic/>, 25. 3. 2019).
- Pavlíček, J. (2005). Elektrická trakce – Pevná trakční zařízení. *EDUCON*. 2005
(<https://www.educon.zcu.cz/view.php?cislomodulu=2015050204>, 13. 4. 2019).
- Princ, J. (1977). *Trakční energetika* (Praha: Nadas).
- Skála, P. (2017). *Analýza zpětné cesty elektrického napájení železničního trakčního vozidla* [diplomová práce] (Praha: ČVÚT).
- Šimánek, J. – Kudyn, V. – Krátký, L. (2011). *Bezpečná funkce pevných trakčních zařízení při rekuperaci elektrických hnacích vozidel* (Praha: ČD).
- Šimek, L. (2016). Stejnosemerná nebo střídavá? *Vlaky.net*. 20. 2. 2016
(<https://www.vlaky.net/zeleznice/spravy/5989-Stejnosemerna-nebo-stridava/>, 13. 3. 2019).
- Vondrášek, F. – Glasberger, T a kolektiv (2017). *Měniče kmitočtu a střídavého napětí* (Plzeň: FEL).