

Metodika určující podmínky a parametrizaci provozu měničů AC/AC v nových nebo rekonstruovaných TNS 25 kV, 50 Hz s požadavky provozovatelů DS

Verze: v1 (28. 12. 2023),

Revize: r0 (08. 03.2024)

V Brně dne : 28. 12. 2023

Zpracoval: Ing. Jiří Pelc
Ing. Jan Klusáček,
Ing. Lukáš Radil, Ph.D.
prof. Ing. Jiří Drápela, Ph.D.
Ing. Ondřej Svoboda
Bc. Jan Bureš
Jiří Podhradský

Rozsah: 64 stran

Metodika byla vypracována v rámci řešení projektu TAČR CK02000099

Poskytovatel: Technologická agentura České republiky (TAČR), Evropská 1692/37, 160 00 Praha 6, IČ 72050365

Příjemce projektu: SUDOP BRNO, spol. s r.o., (SUDOP BRNO) Kounicova 688/26, Veverří, 602 00 Brno, IČ 44960417

Další uchazeč: Vysoké učení technické v Brně, (VUT) Antonínská 548, 60200 Brno, IČ 00216305

Aplikační garant: Ministerstvo dopravy, (MD) nábřeží Ludvíka Svobody 1222/12, 110 15 Praha 1, IČ 66003008

Řešitel projektu: Ing Jiří Pelc (SUDOP BRNO)

Další řešitel: Ing. Lukáš Radil, Ph.D. (VUT)

Řešitelský tým: Ing. Ondřej Svoboda (SUDOP BRNO)
Jiří Podhradský (SUDOP BRNO)
Ing. Jan Klusáček (VUT)
prof. Ing. Jiří Drápela, Ph.D. (VUT)
Ing. Michal Ptáček (VUT)

Obsah

1	Seznam symbolů a zkratek	6
2	Definice pojmů	7
3	Úvod	8
4	Popis metodiky	9
4.1	Cíle metodiky	9
4.2	Vymezení metodiky z pohledu možnosti napájení z distribuční soustavy	9
4.2.1	Transformovna zapojená do V	10
4.2.2	Transformovna zapojená do T s FKZ	10
4.2.3	Zapojení s aktivním balancérem.....	10
4.2.4	Napájení pomocí dvou-stupňových měničů	11
4.3	Vymezení metodiky z hlediska specifik měničového napáječe	11
4.4	Vymezení metodiky z hlediska technických předpisů	11
4.4.1	DCC NC	11
4.4.2	RFG NC	12
4.4.3	Pravidla provozování distribučních soustav, Příloha 4.....	12
4.4.4	Pravidla provozování distribučních soustav, Příloha 7.....	12
4.4.5	Pravidla provozování distribučních soustav, Příloha 6.....	12
4.4.6	PNE 33 3430-0 ed.6.....	12
4.5	Vymezení metodiky z hlediska ekonomické analýzy.....	13
5	Metodika modelování	14
5.1	Měničový trakční napáječ.....	14
5.1.1	Úroveň modelu 1.....	14
5.1.2	Úroveň modelu 2.....	14
5.1.3	Úroveň modelu 3.....	15
5.2	Distribuční síť 110 kV	15
5.2.1	Úroveň modelu 1.....	15
5.2.2	Úroveň modelu 2.....	16
5.2.3	Úroveň modelu 3.....	17
5.3	Trakční soustava.....	17
5.3.1	Vedení trakční soustavy	17
5.3.2	Zátěže trakční soustavy	18
6	Hodnocení zpětných vlivů dle PNE 33 3430-0	19
6.1	Pomalé změny napětí.....	19
6.1.1	Minimální požadavky na model měniče	19
6.1.2	Minimální požadavky na model sítě vvn	19
6.1.3	Scénář simulace.....	19
6.1.4	Vyhodnocení	20
6.1.5	Příklad vyhodnocení.....	20

6.2	Rychlé změny napětí.....	21
6.2.1	Minimální požadavky na model měniče.....	21
6.2.2	Minimální požadavky na model sítě vvn.....	21
6.2.3	Scénář.....	21
6.2.4	Vyhodnocení.....	22
6.2.5	Příklad vyhodnocení.....	22
6.3	Flikr.....	23
6.3.1	Minimální požadavky na model měniče.....	24
6.3.2	Minimální požadavky na model sítě vvn.....	24
6.3.3	Scénář.....	24
6.3.4	Vyhodnocení.....	24
6.3.5	Příklad vyhodnocení.....	25
6.4	Nesymetrie.....	27
6.5	Harmonické.....	27
6.5.1	Minimální požadavky na model měniče.....	27
6.5.2	Minimální požadavky na model sítě vvn.....	27
6.5.3	Scénář.....	27
6.5.4	Vyhodnocení.....	28
6.5.5	Příklad vyhodnocení.....	29
6.6	Meziharmonické.....	31
6.6.1	Minimální požadavky na model měniče.....	31
6.6.2	Minimální požadavky na model sítě vvn.....	31
6.6.3	Scénář.....	31
6.6.4	Vyhodnocení.....	32
6.6.5	Příklad vyhodnocení.....	32
6.7	Komutační poklesy.....	34
6.8	Hromadné dálkové ovládání (HDO).....	34
6.8.2	Minimální požadavky na model měniče.....	35
6.8.3	Minimální požadavky na model sítě vvn.....	35
6.8.4	Scénář.....	35
6.8.5	Vyhodnocení.....	35
6.8.6	Příklad vyhodnocení.....	36
7	Další požadavky, povinná podpora sítě.....	38
8	Doplňující možnosti měničového napáječe, podpůrné služby.....	39
8.1	Služby jalového výkonu.....	39
8.2	Disponibilita jalového výkonu pro podpůrnou službu.....	40
8.2.1	Minimální požadavek na model měniče.....	40
8.2.2	Minimální požadavek na model vvn.....	40
8.2.3	Scénář.....	40

8.2.4	Vyhodnocení	40
8.3	Ztrátový výkon při poskytování služeb jalového výkonu.....	41
8.3.1	Minimální požadavek na model měniče.....	42
8.3.2	Minimální požadavek na model vvn.....	42
8.3.3	Scénář.....	42
8.3.4	Vyhodnocení	42
9	Závěr	44
9.1	Novost předložené metodiky	44
9.2	Popis uplatnění metodiky	44
9.3	Ekonomické aspekty metodiky	45
10	Příloha A – teoretický podklad pro vytvoření modelů komponent sítě 110 kV pro modelování v časové doméně	46
10.1	Venkovní a kabelová vedení	46
10.1.1	Model s distribuovanými parametry	47
10.1.2	Model se soustředěnými parametry.....	48
10.1.3	Frekvenční charakteristika sítě.....	48
10.2	Transformátory.....	49
10.3	Zátěže.....	50
10.3.1	RL statické a rotační zátěže	51
10.3.2	Model sítě vn.....	51
10.3.3	Sezónní skladba zátěží	51
10.3.4	Řídící vrstva zátěží.....	51
10.4	Synchronní generátory	51
10.5	Zařízení se vstupním měničem	52
10.6	Paralelní a sériové kompenzátory a filtry	52
10.6.1	Paralelní kondenzátory a reaktory	52
10.6.2	Sériové kondenzátory a reaktory,.....	53
10.6.3	Pasivní filtry harmonických.....	54
10.7	Model vzdáleného ekvivalentního napáječe	54
10.8	Ekvivalentní model distribuční sítě v místě připojení.....	54
11	Příloha B – výchozí situace modelu při tvorbě metodiky.....	56
11.1	Model sítě vvn	56
11.1.1	Parametry vedení.....	56
11.2	Model měniče SFC.....	58
11.2.1	Topologie	59
11.3	Model trakční zátěže	60
	Reference	63

1 Seznam symbolů a zkratek

Symbol/zkratka	Popis	Jednotka
AC	Střídavé napětí	-
ČR	Česká republika	-
DC	Stejnoseměrné napětí	-
DCC	Network Code on Demand Connection	-
DS	Distribuční síť	-
EHV	Elektricky hnaná vozidla	-
EMC	Elektromagnetická kompatibilita	-
FKZ	Filtračně kompenzační zařízení	-
PDS	Provozovatel distribuční soustavy	-
PPDS	Pravidla provozování distribučních soustav	-
PPPS	Pravidla provozu přenosových soustav – Kodex přenosové soustavy	-
PPS	Provozovatel přenosové soustavy	-
PpS-N	Nefrekvenční podpůrná služba	-
PS	Přenosová soustava	-
PWM	Pulse Width Modulation (pulsní šířková modulace)	-
RfG	Network Code Requirements for Generators	-
SFC	Static Frequency Converter (statický měnič frekvence)	-
THD	Total harmonic distortion (celkové úplné harmonické zkreslení)	%
TNS	Trakční napájecí stanice	-
TS	Trakční soustava	-
TSI ENE	Technická specifikace pro interoperabilitu subsystému energie železničního systému	-
VM	Výrobní modul	-
VRT	Vysokorychlostní tratě	-

2 Definice pojmů

Fázové napětí – fázové napětí je základní hodnotou napětí, ke které se vztahuje kvalita elektrické energie. Jedná se o hodnotu napětí fázového vodiče vůči zemi.

Sdružené napětí – sdružené napětí je napětí, které je mezi fázemi elektrického obvodu ve vícefázové soustavě.

Zdánlivý výkon – zdánlivý výkon – S (VA), je definován součinem efektivní hodnoty napětí a proudu. Skládá se z reálné a imaginární (jalové) složky.

Činný výkon – činný výkon – P (W) je užitečný výkon wattového charakteru a je ukazatelem činné energie. Ve frekvenční oblasti, je reálnou složkou zdánlivého výkonu a je definován součinem efektivních hodnot napětí, proudu shodné frekvence a kosinu vzájemného úhlu.

Jalový výkon – jalový výkon Q (var) je výkon, který není wattového charakteru. Ve frekvenční oblasti je imaginární složkou zdánlivého výkonu a je definován součinem efektivních hodnot napětí, proudu shodné frekvence a sinu vzájemného úhlu.

Deformační výkon – jedná se o newattový výkon v jednotkách (VA). O deformačním výkonu hovoříme, při určení výkonu vyšších harmonických napětí a proudu nestejných frekvencí.

Základní frekvence – jedná se o systémovou frekvenci napětí na základní harmonické. V Evropě je tato hodnota 50 Hz, ve spojených státech 60 Hz.

Harmonické frekvence – jedná se o celočíselné násobky základní síťové frekvence. Většinou hovoříme o lichých násobcích – 3,5,7,9 atd., které se vyskytují na nosné základní frekvenci napětí. Sudé harmonické 2,4,6 atd. jsou méně významné a prakticky jsou zanedbatelné.

Harmonické zkreslení (THD) – je ukazatel, který definuje zkreslení sinusového signálu. Variantou THD je THDu a THDi, které popisují zkreslení napětí (THDu) a proudu (THDi) vzhledem k základní nebo také první harmonické průběhu.

3 Úvod

Záměna trakčního napájení z 3 kV DC na 25 kV AC, 50 Hz je záměr schválený ministerstvem dopravy, na základě zpracované studie „Koncepce přechodu na jednotnou napájecí soustavu ve vazbě na priority programového období 2014-2020 a naplnění požadavků TSI ENE“. Rozdělení České republiky na dvě hladiny napájecího napětí bylo tvořeno historickým a technickým vývojem. V současné době, však napájení pomocí stejnosměrného napětí naráží na své limity, hlavně z důvodu navyšování dopravy a používáním moderních lokomotiv a souprav s výkonem vyšším než 6 MW.

Prvním úsekem, kde má být provedena transformace napájení byl vybrán úsek Nedakonice-Říkovice. Řešený pilotní projekt patří v ČR k nedůležitějším (1. a 2. Národní tranzitní železniční koridor) a má i zásadní význam v evropské železniční dopravě (evropské nákladní železniční koridory RFC) a v regionální dopravě. To klade vysoké nároky na spolehlivost pevných trakčních zařízení.

Metodika je výsledkem projektu TAČR CK02000099, jehož hlavním řešitelem je společnost SUDOP Brno, s.r.o. a spoluřešitelem VUT v Brně, Ústav elektroenergetiky. Partneři participují na projektu úspěšné integrace jednotek do distribuční soustavy (DS) a zároveň prověřují možnosti aditivních vlastností měničů pro podpůrné služby distribuční soustavě. Projekt je součástí výzkumného záměru pro Ministerstvo dopravy ČR.

Metodika koncipuje formu identifikace a specifikace potřebných technických požadavků a konkrétních číselných limitů souvisejících s realizací kritériálního rozhodování při návrhu libovolné trakční napájecí stanice (TNS) lokalizované v rámci ČR a na ni kladených dalších funkcionalit umožňujících lokální podporu elektrizačních sítí či umožňujících ekonomický provoz elektrických lokomotiv, resp. významnější možnosti rekuperace lokomotiv v rámci výkonové sítě bez ohrožení její řádné provozuschopnosti a stability. Dále bude určovat podmínky a parametrizaci provozu výkonových měničů AC/AC v nových nebo rekonstruovaných TNS 25kV, 50 Hz s požadavky provozovatelů DS.

Metodika vychází z funkčního a praktického řešení řízení výkonových měničů použitých na úrovni konkrétního pilotního projektu provedení TNS a je opřena o realizované dynamické modely a dynamické odezvy dílčích systémů na náhlou změnu stavu.

4 Popis metodiky

4.1 Cíle metodiky

Cílem metodiky je především v určení použití statických měničů frekvence (SFC - Static frequency converter) na nových, případně na rekonstruovaných trakčních napájecích stanicích pro elektricky hnaná vozidla (EHV).

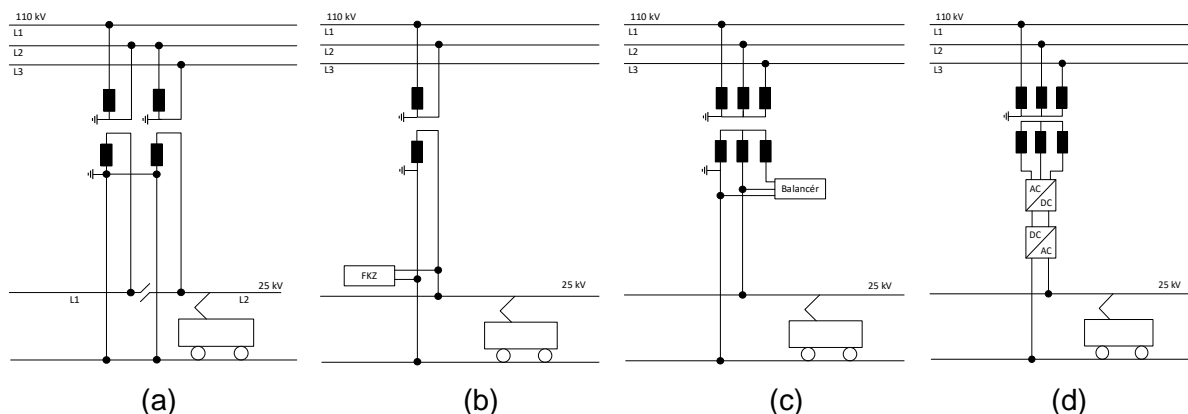
Metodika vychází z projektu „Pilotní projekt napájení trakčního vedení měniči AC/AC“, podpořeného grantem Technologické agentury České republiky (TAČR), pod číslem CK02000099.

Metodika určuje podmínky pro použití SFC v podmínkách České republiky s ohledem na napájecí infrastrukturu distribučních sítí (DS). Primárně se jedná o napájení z napěťové hladiny 110 kV, do které jsou napáječe především zapojovány. Metodika je obecně aplikovatelná i na podmínky pro připojení do přenosové soustavy (PS) s respektováním požadavků na připojení do PS, nicméně je řešena primárně ve vztahu k DS.

Metodika vychází ze směrnic a nařízení, technických předpisů a souvisejících norem, národních norem ČSN a podnikových norem PNE. Dále metodika přináší několik scénářů provozu jednotek SFC s EHV, které jsou ukázány na příkladech.

4.2 Vymezení metodiky z pohledu možnosti napájení z distribuční soustavy

Provoz vysokorychlostních železnic je podmíněn funkčností elektrického napájení (subsystém TSI ENE) [11], a to i s ohledem na vysoké výkony. Elektrická vysokorychlostní ucelená trakční jednotka délky 200 m vyžaduje při rozjezdu příkon cca 10 MW, a vlak dvojnásobné délky 400 vyžaduje při rozjezdu příkon cca 20 MW. Obdobné hodnoty výkonů předávají vozidla do trakčního vedení při elektrodynamickém rekuperačním brzdění. Pro tyto účely není použitelný napájecí systém 3 kV, aplikace systému 25 kV či 2 x 25 kV je nutností. Spolu s vysokorychlostními tratěmi přijde napájecí napětí 25 kV i do železničních uzlů Ústí nad Labem, Praha, Přerov a Ostrava, dosud využívajících napájecí napětí 3 kV. Měnit napětí v trakčním vedení 3 kV/25 kV v průběhu rozjezdu a zejména brzdění vlaku je krajně nežádoucí (dochází k přerušení tažné, respektive brzděné síly). Proto je nanejvýš potřebné uskutečnit konverzi napájecího napětí 3 kV na 25 kV v dotyčných železničních uzlech v předstihu před výstavbou vysokorychlostních železnic. Rekuperační brzdění bude u VRT z důvodu ekologizace dopravy žádoucí a nebude možné již převážnou (dnes prakticky veškerou – vyjma pár úseků) část energie mařit v odporových. Z tohoto a výše popsaných důvodů je provoz měničové technologie vítanou příležitostí, jak účinně a efektivně řídit tuto zpětnou dodávku do sítě distribučního napájení. Uvažovaná provedení a schématická zapojení TNS jsou na Obr. 1.



Obr. 1 (a) Principiální schéma zapojení napájení pomocí V zapojení; (b) zapojení transformátoru s FKZ; (c) schéma s aktivním balancérem; (d) s dvoustupňovým AC/AC měničem [27]

4.2.1 Transformovna zapojená do V

Ve snaze snížit namáhání DS nesymetrickým odběrem je v TNS určených k napájení trakčního vedení 1 x 25 kV 50 Hz z DS 3 x 110 kV 50 Hz využíváno zapojení V (otevřený trojúhelník), viz Obr. 1(a). Taková TNS obsahuje dva jednofázové transformátory. Každý z nich je na primární straně na jiné dvě fáze třífázového systému 3 x 110 kV. Na sekundární straně jsou připojeny k vrchnímu trakčnímu vedení a ke kolejnici, přičemž jeden transformátor napájí trakční vedení na jednu stranu od TNS a druhý transformátor napájí trakční vedení na druhou stranu od TNS. Technické řešení TNS zapojených do T a TNS do V je tedy prakticky shodné, liší se jen tím, zda jsou oba transformátory (provozní a záložní) připojeny ke stejné dvojici fází (zapojení do T) nebo zda jsou oba transformátory (oba jako provozní) připojeny k různým dvojicím fází (zapojení do V).

Předpokládanou výhodou TNS v zapojení do V je ve srovnání s trakčními transformovnými zapojenými do T poněkud menší nesymetrie odběru příkonu z DS (zatěžovány jsou dvě dvojice fází), avšak symetrie docílena není. K vytvoření symetrie by musely být v TNS společně provozovány nikoliv dva, ale tři jednofázové transformátory a musely by být zatěžovány nikoliv různým, ale stejným dopravním provozem.

Naopak nevýhodou trakčních transformoven zapojených do V jsou ve srovnání s trakčními transformovnými zapojenými do T kratší napájené úseky, nikoliv společně na obě strany od TNS ke spínací stanici v polovině napájeného úseku, ale jen na jednu stranu od TNS ke spínací stanici v polovině napájeného úseku. To má zásadní negativní vliv na využitelnost rekuperačního brzdění. Napájené úseky jsou krátké, pravděpodobnost předání rekuperovaného brzdového výkonu jiným vozidlům je malá, velká část rekuperovaného výkonu přebývá a musela by být předávána do DS, což není z důvodu prohlubování nesymetrie v DS povoleno.

4.2.2 Transformovna zapojená do T s FKZ

Aby bylo možno i starší vozidla s diodovými usměřovači a se stejnosměrnými trakčními motory, která mají nízký účinník a velký obsah vyšších harmonických složek proudu, napájet přes jednofázové transformátory z DS i v současnosti, kdy je požadován vysoký účinník ($\cos \varphi > 0,95$) a nízký obsah vyšších harmonických složek proudu, byla do TNS (do trakčních transformoven uspořádaných do T) dodatečně doplněna filtračně kompenzační zařízení (FKZ), viz Obr. 1(b). FKZ sestávající z filtrů lichých harmonických složek proudu (3., 5, 7., tedy 150 Hz, 250 Hz a 350 Hz) a tyristorově spínané dekompenzační tlumivky, které neutralizují vliv kapacit v případě malého odběru magnetizačního proudu.

Účel byl splněn, avšak za cenu:

- potřeby vybudování příslušné technologie FKZ,
- ztrát činného výkonu, spojených s provozem FKZ,
- vědomí, že jde o dočasné opatření, neboť po dožití vozidel s technologií diodových usměřovačů a stejnosměrných trakčních motorů (rok výroby 1965 až 1990, tedy aktuální stáří 27 až 52 let) budou tato zařízení demontována. U nových instalací FKZ tak nelze naplnit předpoklad jejich využívání po dobu 30 let, jak předepisuje metodika ekonomického hodnocení dopravních staveb zveřejněná ve Věstníku dopravy č. 11/2013.

4.2.3 Zapojení s aktivním balancérem

Provozovatelé DS (PDS) trakční napájecí stanice s měničovými aktivními balancéry akceptují a pokládají je z hlediska zpětného vlivu na distribuční síť za přínosné (ve srovnání s jednofázovými transformátory zapojenými do T či do V), viz Obr. 1(c). Technickým přínosem aktivních balancérů je symetrizace proudů do všech tří fází DS, s možností kompenzace jalových a harmonických proudů TS. Avšak PDS připouštějí aktivní balancéry pouze v děleném

provozu (jednostranné napájení s dělením trakčního vedení v místě spínacích stanic, přibližně uprostřed mezi trakčními napájecími stanicemi). Balancéry mají své limity, například řízení fázového úhlu, a proto jsou nevhodné v řadě napájecích stanic, kde dochází k fázovému natočení napětí [27].

4.2.4 Napájení pomocí dvou-stupňových měničů

Trakční napájecí stanice s kaskádou měničů 3 AC/DC a DC/1 AC (Obr. 1(d)) umožňují realizovat trakční soustavu (TS) 25 kV 50 Hz s jednotnou a stabilizovanou fází bez podélného dělení. Díky tomu lze praktikovat i v systému 25 kV spojitě napájení trakčního vedení bez střídání fází (úseky trakčního vedení mohou být v normálním provozním stavu podélně i příčně propojeny, a to jak u trakčních napájecích stanic, tak i u spínacích stanic, situovaných přibližně uprostřed mezi sousedními trakčními napájecími stanicemi). Není tedy nutno ani vypínat proud, ani stahovat sběrač.

Dlouhé spojitě napájené úseky zároveň vytvářejí podmínky pro uklidnění příkonu (nízký poměr P_{max}/P_{str}), tedy pro hospodárné dimenzování a pro nízké platby za rezervovaný příkon, i pro prioritní předávání rekuperovaného výkonu mezi vozidly s minimálními zpětnými přetoky do DS.

Dvoustupňový měnič odděluje TS od napájecí DS a zpětné vlivy na DS jsou tak majoritně určeny řešením a vlastnostmi 3AC/DC stupně. Vlastní kaskáda měničů se pak v praktické realizaci liší ve vnitřní struktuře měničů 3 AC/DC a DC/1 AC.

4.3 Vymezení metodiky z hlediska specifik měničového napáječe

Metodika prezentuje přístup k evaluaci vlastností aktivních napáječů trakční soustavy skládající se z dvou-stupňového výkonového měniče. Tento druh napáječů umožňuje obousměrné toky energie a v provozu plynule přechází z režimu odběru do režimu dodávky. Z hlediska platných norem se tím jedná o specifické zařízení, nicméně vzhledem k podobnosti aktivního front-endu lze na něj aplikovat přístupy odvozené od požadavků jak na výrobní moduly, tak na zátěže, nebo HVDC měniče. Na druhou stranu, přístupy je nutné modifikovat vzhledem ke specifické povaze procesu za měničem, tzn. provozu trakční soustavy.

Metodika se primárně zaměřuje:

- na vlastnosti zařízení z oblasti EMC a kompatibilitu s prostředím DS v oblasti připojení,
- na chování zařízení se zaměřením na dynamické změny pracovního bodu a
- na možnosti využití zařízení pro síťové služby a podporu sítě, avšak bez omezení primární funkce zařízení, což je napájení provozu v trakční síti.

Metodika je zaměřená na měničové napáječe, které obsahují DC meziobvod, je přes ně přenášén celý výkon (neslouží jako kompenzátory zpětných vlivů) a umožňují aktivní řízení jak na straně DS tak na straně TS. Metodika se tedy zaměřuje pouze na ty vlivy, které jsou důsledkem provozu a principu fungování této technologie měničů. Důležité jsou tzv. plánovací úrovně rušení a jevů, které postihují jednotlivé dřívější metodiky a normy.

4.4 Vymezení metodiky z hlediska technických předpisů

4.4.1 DCC NC

DCC NC je nařízení Evropské komise (EU) 2016/1388 ze dne 17. srpna 2016, kterým se stanoví kodex sítě pro připojení spotřeby [3].

Vzhledem k tomu, že měničový napáječ je primárně spotřebičem elektrické energie, tzn. odběrnou jednotkou, váže se na ni ustanovení uvedená v nařízení DCC NC. Toto nařízení slouží k zajištění spravedlivých podmínek hospodářské soutěže, k zajištění bezpečnosti provozu celé soustavy a integraci obnovitelných zdrojů do soustavy [3].

Zařízení umožňuje poskytovat doplňkové služby pro řízení DS a potažmo přenosových PS řízením (činného) a jalového výkonu.

4.4.2 RFG NC

RfG NC je nařízení Evropské komise (EU) 2016/631 ze dne 14. dubna 2016, kterým se stanoví kodex sítě pro požadavky na připojení výroben k elektrizační soustavě [1].

Toto nařízení se vztahuje k výrobním modulům (VM), které jsou trvale připojeny do PS nebo DS za účelem generování elektrické energie. Měničový napáječ umožňuje krátkodobě dodávat elektrickou energii při rekuperačních stavech při brzdění EHV, proto nařízení RFG NC se vztahuje i na něj, ale pouze v omezené míře. Dále může docházet k přenosu elektrické energie (ať už vyžádanou, nebo nevyžádanou) skrze trakční soustavu při dvoustranném napájení, tzn. jeden měnič dodává energii do DS/PS, případně je vyžadována povinná výkonová podpora soustavě. Výrobním modulem chápeme celou jednotku SFC za předpokladu, že bude dodávat marginální dodávku elektrické energie do DS/PS v rámci rekuperace.

4.4.3 Pravidla provozování distribučních soustav, Příloha 4

Pravidla provozování distribučních soustav, Přílohou 4 [22] se rozumí požadavky na VM, které jsou připojovány do sítí nn, vn nebo 110 kV PDS.

V souladu s čl. 3 RfG [1] se tato pravidla nevztahují na VM, které byly instalovány za účelem poskytování záložní elektřiny a jsou provozovány paralelně se soustavou po dobu kratší než pět minut v každém kalendářním měsíci, když je soustava v normálním stavu; Paralelní provoz daného výrobního modulu během údržby nebo zkoušek před uvedením do provozu se do pětiminutového limitu nezapočítává. Rovněž se nevztahují na VM, které nemají trvalé místo připojení a které provozovatelé soustav používají k dočasným dodávkám elektřiny v situacích, kdy běžná kapacita soustavy není vůbec nebo částečně k dispozici.

4.4.4 Pravidla provozování distribučních soustav, Příloha 7

Pravidla shrnují hlavní hlediska, na která je nezbytné brát zřetel při posouzení potřeby podpůrných služeb, jejich specifikaci, využívání, certifikaci, ověřování a hodnocení i ověřování jejich zdrojů, především výrobních modulů připojených k DS o napěťové úrovni vn a vvn [24].

Vzhledem ke kapitole 7 PPDS, Příloha 7 může měnič poskytovat nefrekvenční služby DS – řízení napětí, řízení jalového výkonu. Dále lze přihlížet k potřebnosti posouzení dle volné přílohy 5 PPDS Příloha 7 (sítě vn, 110 kV). Pravidla dále přinášejí požadavky na provozovatele zařízení v předprovozní fázi na proces certifikace, kde se mj. posuzuje schopnost dodávat službu.

4.4.5 Pravidla provozování distribučních soustav, Příloha 6

Příloha 6 PPDS uvádí a stanovuje pravidla, požadavky a podrobnosti k technickému řešení připojení odběrného místa, předávacího místa a lokální DS (LDS) včetně přípojek nn, vn a vvn k DS, mezní hodnoty pro potřebu posuzování zpětných vlivů odběrných zařízení na DS a potřebné informační vazby [23].

Primárně se napájecí měnič chová jako odběrná jednotka s odezvou na straně poptávky – řízením činného výkonu a jalového výkonu.

4.4.6 PNE 33 3430-0 ed.6

Tato norma [7] platí pro plánování připojování a provozování elektrických zařízení veřejných elektrických distribučních a přenosových soustav nn, vn, vvn a zvn z hlediska vlivu na elektrizační soustavu (ES) 50 Hz. V dokumentu se využívají pasáže zejména o posouzení připojitelnosti zařízení z hlediska zpětných vlivů na DS v kontextu nízkofrekvenční elektromagnetické kompatibility (EMC).

4.5 Vymezení metodiky z hlediska ekonomické analýzy

Metodika je zaměřena na technické posouzení připojování nových SFC měničových napáječů do distribučních, případně přenosových soustav pro napájení TS.

Z analýzy nákladů a přínosů (Cost benefit analýzy) zapojení měničových napáječů pro napájení trakčních soustav vyplývají následující benefity:

a) pro provozovatele DS:

- kontrola rekuperace – třífázově symetrická říditelná rekuperace do DS,
- oddělení DS a trakční soustavy přes DC meziobvod,
- nezávislé řízení výkonu P a Q ze strany DS,
- pokud není měnič plně zatížen, může poskytnout podpůrnou službu jalovým výkonem pro řízení profilu napětí v DS,
- nízké harmonické zkreslení proudů odebíraných z DS,

b) pro stranu trakčního napájení lze identifikovat následující výhodné vlastnosti:

- oddělení jalového příkonu a deformace odebíraného proudu starších lokomotiv od zatížení DS,
- odstranění neutrálních polí, jednotná fáze (na delším úseku),
- možná spolupráce napájení trakčního vedení z jedné strany transformátorem, z druhé měničem, pro zlepšení investiční ekonomiky,
- omezení zkratových proudů v trakčním vedení,
- napětí trolejového vedení může být plně řízeno,
- vyšší míra využití rekuperace EHV v TS bez rizika nežádoucí dodávky do DS, což je jednoznačně ekonomicky efektivní a společensky velmi žádoucí.

Obecně, uplatnění SFC představuje zvýšení potenciálu na splnění požadavků na připojení do elektrizační soustavy, i s možností akceptace rekuperace; splnění požadavků na odběr elektrické energie s plnohodnotným řízením činného a jalového výkonu s definovaným $\text{tg}\varphi$; což vůči standardnímu připojení trakčním transformátorem znamená úsporu nákladů za neoprávněnou dodávku/odběr. Potenciál poskytování podpůrné služby jalovým výkonem navíc otevírá možnost monetizace nasazení SFC technologie napájení TS. V zahraničí je služba jalového výkonu využívána, nicméně ucelený koncept této služby dosud není v ČR stanovený (ale již je o nich diskutováno) a ani požadovaná velikost výkonu či množství energie nebyla dosud s distributory projednávána.

5 Metodika modelování

Pro SFC měniče platí, že jejich chování v DS a trakčních sítích (TS) je velmi vhodné vyšetřit na vlastnosti vyplývající z konstrukce měniče v místě jeho připojení do DS.

Pokud výrobce nedodá přesné parametry měniče, včetně reálných provozních zkoušek měniče, je nezbytně nutné provést simulace, které prokáží kompatibilitu měniče v místě připojení primární strany měniče a neohrozí kvalitu dodávky elektrické energie pro ostatní uživatele DS. Stejně tak je nutné provést simulace ověřující připravenost provozovat elektricky hnaná vozidla (EHV) napájená přes trakční soustavu připojenou na sekundární stranu SFC.

5.1 Měničový trakční napáječ

Model měničového napáječe s DC meziobvodem musí být uzpůsoben pro analýzu elektromagnetické kompatibility (EMC). Model proto musí být schopen emulovat realistické proudové zatížení měniče, které vyvolá zpětný vliv na napětí v místě připojení. V závislosti na míře potřebného detailu, lze model zpracovat ve třech úrovních.

5.1.1 Úroveň modelu 1

Úroveň modelování 1 je nejdetailnější úroveň modelování. Jedná se o dynamický elektromagnetický model pro modelování v časové oblasti, který reflektuje dynamické chování až na základních vlastnostech prvků a blíží se k modelu tzv. digitálního dvojčete, který popisuje stav věcí ve stejném měřítku. Nicméně je přihlédnuto k chování měničů vzhledem k distribuční soustavě vyjma komunikačního rozhraní, ochrany a vlastní diagnostiky měniče, která není pro studium zpětných vlivů nezbytná. Principiálně model musí odpovídat skutečné jednotce včetně konceptu omezování zpětných vlivů. Rozsah modelu by měl být takový, aby co nejvěrněji kopíroval skutečnou výstroj (výbavu) až na úroveň jednotlivých spínacích prvků, a dále použité transformátory a další prvky, které významně ovlivňují vstupní impedanci zařízení (filtrační zařízení, sériové reaktance, apod.). Nezáleží přitom na druhu spínacího prvku (GTO - Gate turn-off thyristor, IGCT - Integrated gate-commutated thyristor, IGBT - insulated-gate bipolar transistor aj.), ale na charakteru spínání jednotlivých typů spínačů (technika generování PWM) a jejich topologii, což definuje výslednou emisi frekvenčních složek proudu. Model dále reflektuje dynamické chování, tzn. strukturu řídicích smyček měniče, které mají zásadní vliv na výslednou nelinearitu vnitřní impedance. Model proto obsahuje realistický estimátor okamžitého úhlu, realistickou topologii řídicích a regulačních smyček, které mají přímý vliv na dynamiku změn proudu, potažmo činného a jalového výkonu.

Příklad modelu úrovně 1 měniče je uveden v příloze 11.2.

5.1.2 Úroveň modelu 2

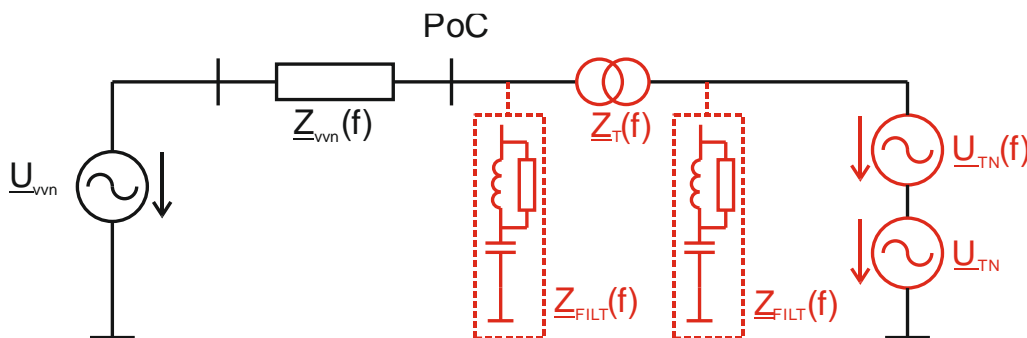
Modelovací úroveň 2 zjednodušuje komplexitu modelu úrovně 1 a je vhodná zejména pro časově náročné simulace v časové oblasti. Jedná se o adaptaci dynamického chování měniče úrovně 1 na obecnou architekturu tzv. back-to-back měniče, tzn. měniče skládajícího se z třífázového můstku (front-endu) zapojeného do DS, stejnosměrného meziobvodu a jednofázového můstku (front-endu) zapojeného do TS. Díky zachování řídicí struktury je zachována i dynamická odezva měniče na změny odběru TS a změny žádaných hodnot regulačních smyček. I přes zjednodušení lze analyzovat dynamické chování s časovou konstantou delší než 0,02 ms (pro 50 Hz systém).

Úroveň modelu 2 je postačující pro analýzu dějů jako jsou poklesy napětí, flickr, dynamika přenosu činného výkonu (P) a regulace jalového výkonu (Q). Detailní popis zjednodušení modelu úrovně 2 je v příloze 11.2.

5.1.3 Úroveň modelu 3

Úroveň modelování 3 je zjednodušením modelů v časové oblasti (např. úroveň modelování 1) a umožňuje modelování ustálených stavů ve frekvenční oblasti pomocí Theveninova nebo Nortonova modelu měniče připojeného do ekvivalentního impedančního modelu distribuční sítě. Jedná se o metodu modelování zástupných (ekvivalentních) napěťových nebo proudových zdrojů, jejíž výstupem je odezva obvodu na jednotlivé stupně vyšších harmonických napětí. I přes významné zjednodušení je tento způsob modelování v současné době rozšířený. Použití takového přístupu modelování významně zjednodušuje křížové ovlivňování frekvenčních složek proudu a napětí odlišných řádů. Například model nezohledňuje ovlivnění emise harmonických proudů harmonickými složkami napětí v místě připojení. Model ve frekvenční oblasti se velmi často používá při řešení analýzy symetrických složek (např. při nesymetrických poruchách).

Pro studium zesílení harmonických a rezonancí je kromě emise harmonických proudů aktivními prvky nutné také zmapovat a zohlednit reálnou topologii pasivních prvků. U měničových napáječů je tedy nutné zohlednit zejména parametry a topologii vstupních transformátorů ($Z_T(f)$), vstupních filtrů ($Z_{FILT}(f)$), případně jiných kompenzačních zařízení. Theveninův (Nortonův) model měniče se skládá z napěťového (proudového) zdroje na základní frekvenci (U_{TN}) a zdroje emulující vyšší frekvenční složky ($U_{TN}(f)$). Parametry modelu je prakticky možné získat z měření na reálném zařízení anebo ze simulace požadovaného ustáleného stavu pomocí modelu úrovně 1. Příklad jednopólového schématu modelu úrovně 3 je na Obr. 2.



Obr. 2 Příklad Theveninova modelu měniče ve frekvenční oblasti (úroveň modelování 3).

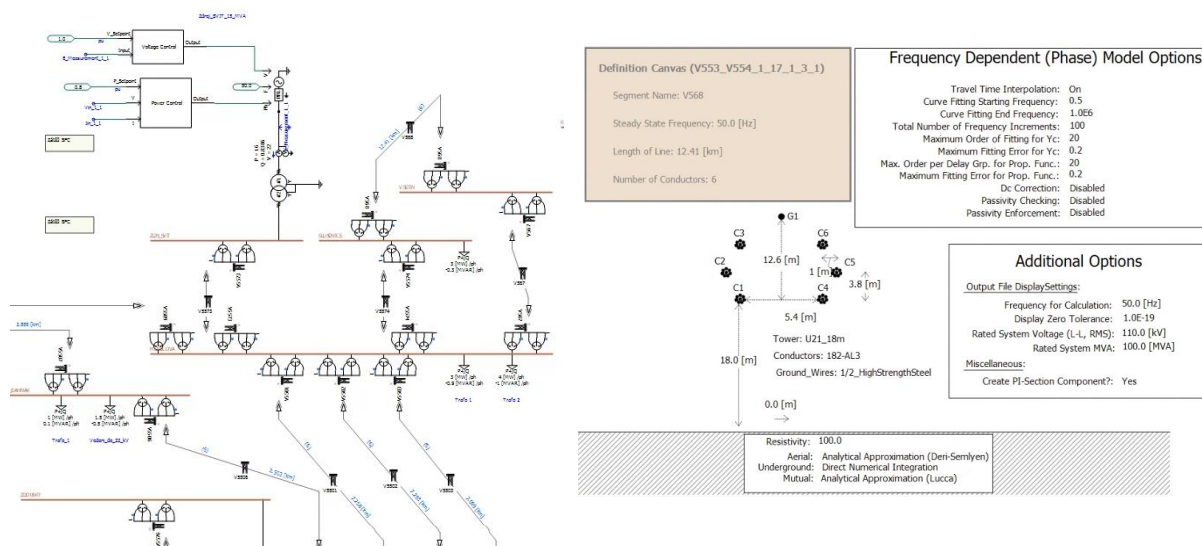
V rámci modelu ve frekvenční oblasti lze v principu zohlednit i řízení měniče. Komplexita takového přístupu a odvození potřebných parametrů a závislostí však převyšuje rámec komplexity modelu úrovně 1, proto není předmětem této metodiky.

5.2 Distribuční síť 110 kV

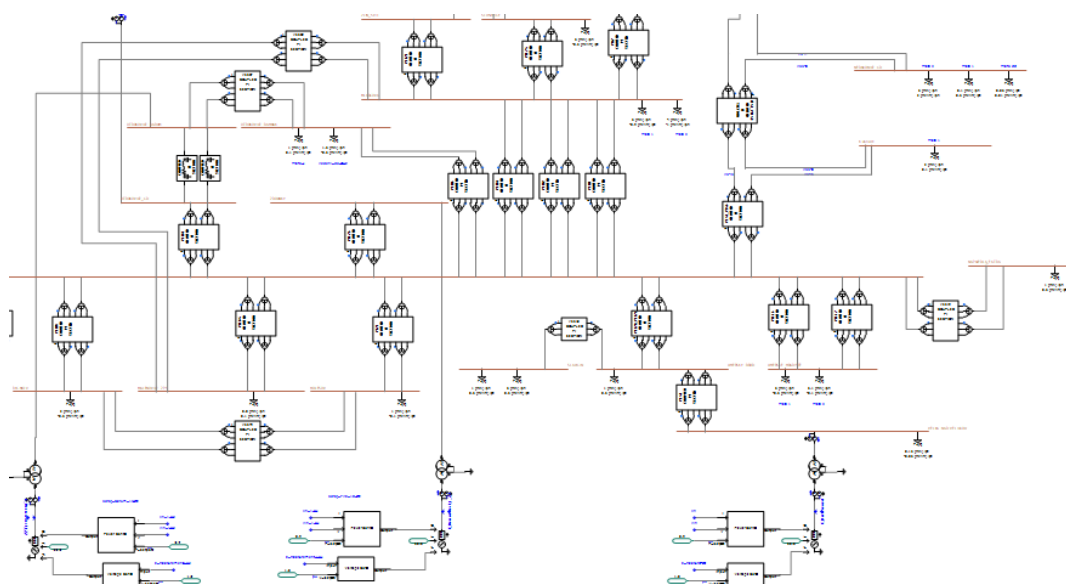
Distribuční síť, na kterou je připojen měničový napáječ, je možné modelovat opět ve třech úrovních detailu a tím i náročnosti.

5.2.1 Úroveň modelu 1

Za úroveň 1 se v této metodice považuje model pro dynamické simulace v časové oblasti. Jednotlivá vedení jsou modelována buďto 1) pomocí rozložených parametrů, tzn. skutečných geometrických rozměrů (Obr. 3a) nebo 2) alternativně pomocí soustředěných parametrů, tzn. prostřednictvím dvojbranů („II články“ na Obr. 4). Příklad ukazuje modelovaná vedení pomocí bloků uvnitř simulačního prostředí PSCAD. Konkrétně se jedná typ podpěrného bodu „soudek“ s geometrickými parametry uvedené na obrázku Obr. 3b. Vstupními parametry, jsou různé typy proudovodných lan, kabeláže a jejich propojení. Více informací je uvedeno v příloze dokumentu, kapitola 10.1.



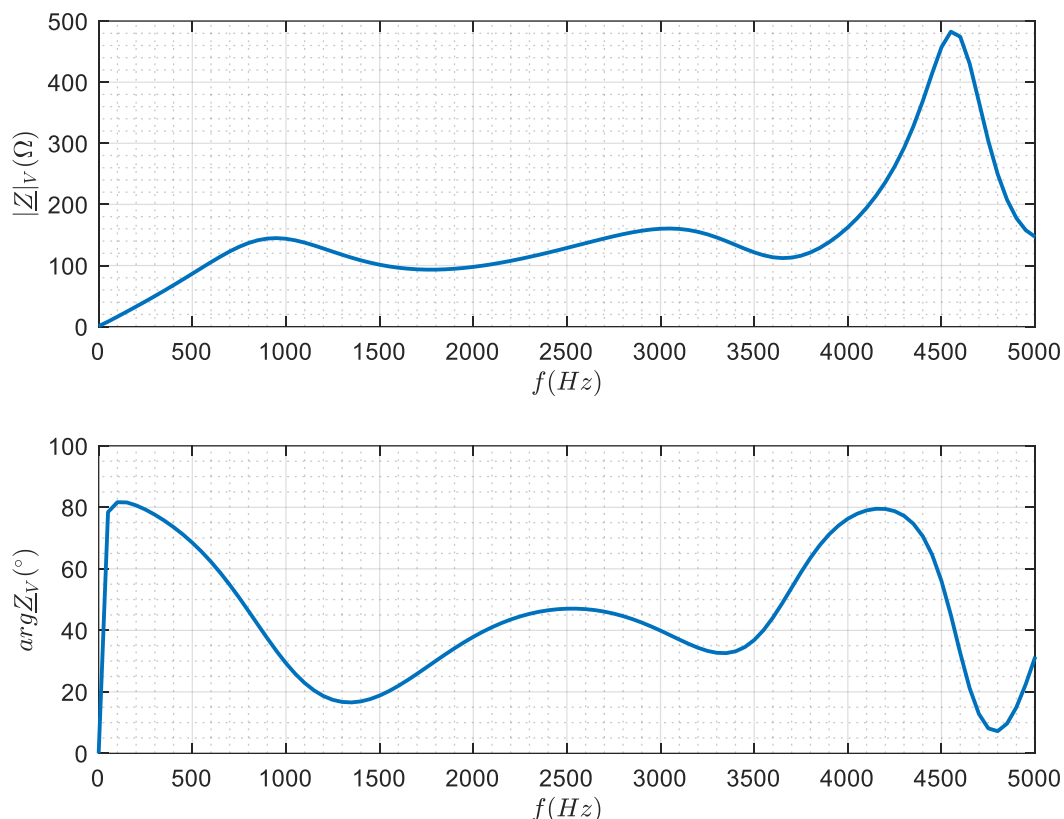
Obr. 3 Příklad geometrického modelu v simulačním prostředí PSCAD



Obr. 4 Schéma sítě vytvořené „π“ články pomocí náhradních parametrů

5.2.2 Úroveň modelu 2

Úroveň modelování 2 reprezentuje distribuční soustavu její frekvenční závislosti v místě připojení napáječe ($Z_{vvn}(f)$) na Obr. 2). Frekvenční závislost lze prakticky získat frekvenčním skenem modelu úrovně 1 (Obr. 5), nebo na základě měření v místě připojení měniče, rozsah se uvažuje typicky do 5 kHz. Výsledná impedance reflektuje všechna připojená zařízení (vedení, transformátory, kompenzátory, ostatní zátěže včetně jejich filtrů, atd.) v jednom provozním stavu. Úroveň síťového modelu 2 je kompatibilní s úrovní modelu 3 měničového napáječe.



Obr. 5 Příklad impedanční charakteristiky ve frekvenční oblasti (frekvenční sken z geometrického modelu).

Výhodou modelování na úrovni 2 ve frekvenční oblasti je, že je v porovnání s modelováním v časové oblasti (úroveň 1) rychlejší. Na druhou stranu, jedná o obraz sítě v jediném kvazi-ustáleném stavu a model proto není vhodný pro simulování dynamických dějů, doprovázených zejména změnami stavu jednotlivých zařízení a částí soustavy. Další informace o modelování sítí jsou v příloze 10.1.

5.2.3 Úroveň modelu 3

Jedná se o nejjednodušší variantu modelování vedení, kdy je nahrazeno podélným odporem a indukčností s parametry zkratové impedance v místě připojení. Tento model je kompatibilní s modelováním ve časové i frekvenční oblasti a velmi často se používá při řešení analýzy symetrických složek (např. při nesymetrických poruchách). Model relativně přesně reflektuje chování soustavy v oblasti 50 Hz a při pomalých dynamických změnách, nicméně s ohledem na lineární frekvenční charakteristiku není vhodný na studium zpětných vlivů frekvenčních složek proudu vyšších řádů, velmi rychlé dynamické děje a analýzu rezonancí. Porovnání frekvenční charakteristiky s jinými přístupy k modelování je v příloze B, v kapitole 11.1.1.

5.3 Trakční soustava

Model trakční soustavy je nutný, pouze pokud je měničový napáječ modelován na úrovni 1 nebo 2. Pokud je použita úroveň 3, trakční soustava je součástí Theveninova (Nortonova) modelu.

5.3.1 Vedení trakční soustavy

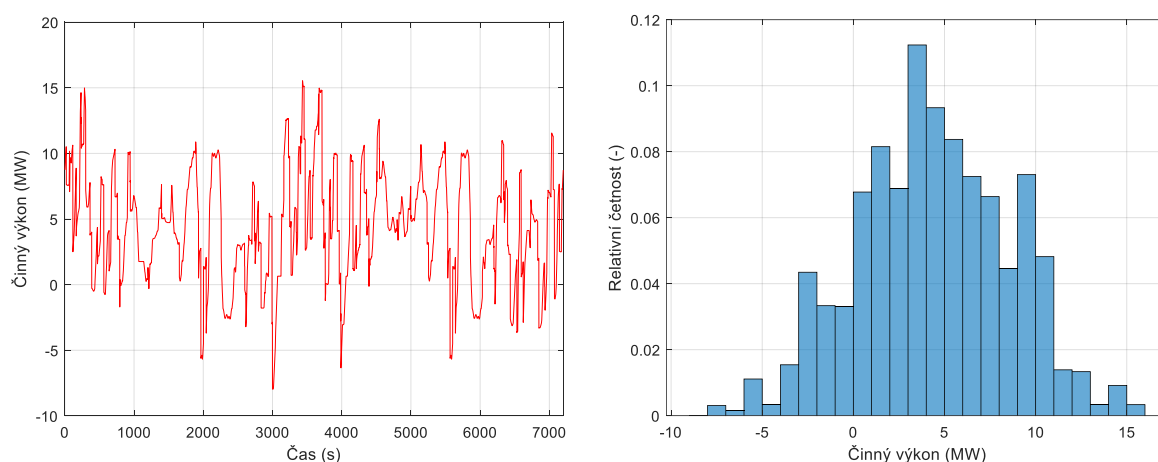
Vedení trakční soustavy (trolej) lze modelovat na základě geometrických parametrů vedení. Například Bergeronův model je založen na modelu s rozloženými parametry L a C a soustředěným odporem. Reprezentuje prvky L a C „ π “ sekce distribuovaným způsobem (tj.

nepoužívá soustředěné parametry). Je to zhruba ekvivalentní použití nekonečného počtu „ π “ sekcí s tím rozdílem, že odpor je soustředěný (1/2 uprostřed vedení, 1/4 na každém konci).

Vzhledem k oddělení TS a DS stejnosměrným obvodem měničového napáječe lze však vedení TS značně zjednodušit a nahradit pouze podélnou impedancí, s parametry dle [8]. Vzdálenost trakční zátěže od napáječe není nutné zohledňovat, nicméně z důvodu stability simulace je vhodné mezi trakční napáječ a model zátěže vložit alespoň velmi malou impedanci.

5.3.2 Zátěže trakční soustavy

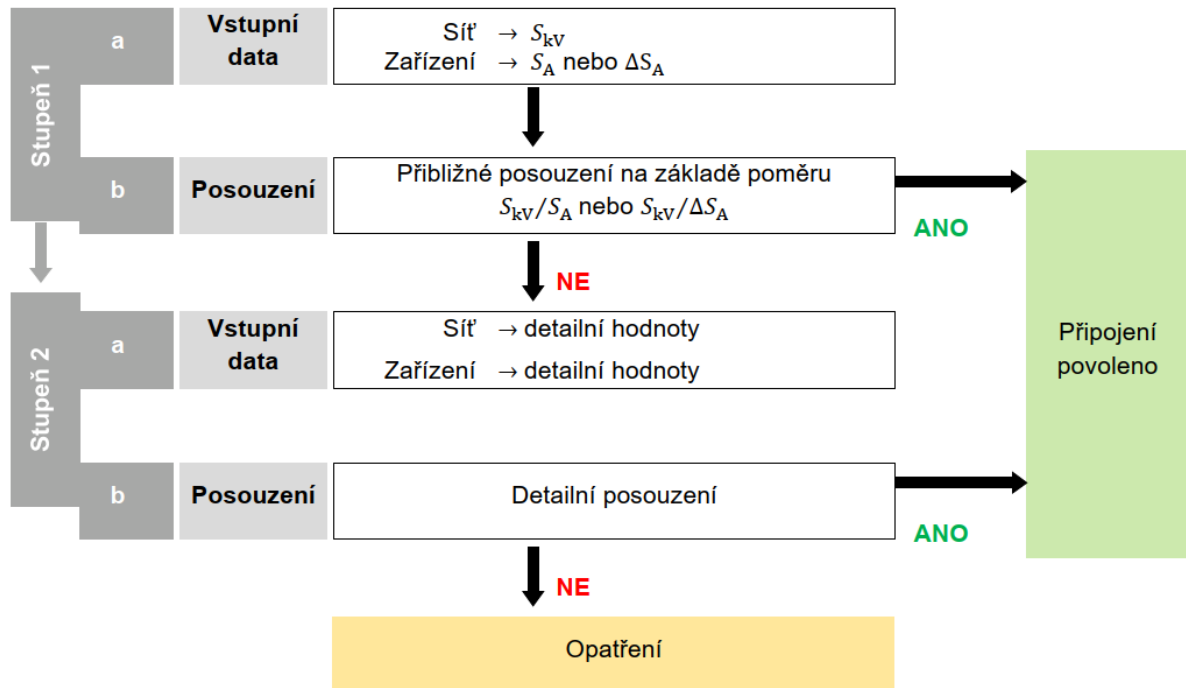
Úroveň detailu modelování trakčních vozidel (zátěže) závisí na technologii napáječe. V případě měničového napáječe s DC meziobvodem jsou TS od DS oddělené a rušení proudu a napětí způsobené trakčními vozidly je do velké míry eliminováno DC meziobvodem a příslušnými filtry. Při modelování tak na rozdíl od transformátorových napáječů není nutné detailně modelovat elektrickou výzbroj a vzájemný pohyb trakčních vozidel. Zatížení TS lze nahradit jedním ekvivalentním proudovým zdrojem, který je řízený na požadovaný činný výkon dle maximálně sekundového profilu za období charakterizující typický provoz (např. 2 h, Obr. 6). Profil lze získat například z předpokládaného provozu trati dle jízdního řádu (grafikonu) a z pohybové rovnice vozidel. K tomu lze prakticky použít vhodný software, jako je například OpenPowerNet nebo OpenTrack. Jalový výkon není nutné uvažovat, pokud se předpokládá zatížení moderními lokomotivami s výkonovými měniči s pulsně-šířkovou modulací a účinníkem blízkému 1. Více informací je uvedeno v příloze dokumentu, kapitola 11.3.



Obr. 6 Dvouhodinový profil sekundových hodnot zatížení trakční soustavy činným výkonem (vlevo), relativní četnost sekundových hodnot ve dvouhodinovém intervalu (vpravo).

6 Hodnocení zpětných vlivů dle PNE 33 3430-0

Metodika zaměřená v této části na posouzení připojení měničového napáječe do sítí vychází z PNE 33 3430-0 [6], s aplikací na DS **vvv (110 kV)**. Podkapitoly jsou členěny z hlediska relevantních rušivých jevů a požadavků PNE 33 3430-0. Z každé podkapitoly vyplývá postup, jak posoudit připojitelnost měniče z hlediska daného rušivého jevu. Pro každý rušivý jev je proces posouzení ukázán ve dvou stupních (viz Obr. 7). První (zjednodušený) stupeň vychází ze zkratového výkonu sítě v místě připojení (S_{kV}) a přípojného výkonu zařízení (S_A). Druhý stupeň (posouzení pomocí modelu) vychází ze simulace reálného provozu měniče, kde je využito modelu měniče a sítě. Ke každému rušivému jevu je navíc přiřazena nejmenší nutná úroveň detailu modelování sítě a měniče, v souladu s předchozími částmi metodiky.



Obr. 7 Obecné schéma procesu posouzení připojitelnosti pro všechny jevy [6]

6.1 Pomalé změny napětí

Hodnocení pomalých změn napětí je v případě měničového napáječe s DC meziobvodem vymezeno jako citlivostní analýza, pomocí které se hledá maximální dodávka/odběr jalového výkonu, s ohledem na plánovaný provoz trakční soustavy, a s ohledem na limit napětí uvedený v [6]. Provoz nad tento limit je možný pouze po dohodě s příslušným provozovatelem soustavy.

6.1.1 Minimální požadavky na model měniče

Nortonův/Theveninův model (úroveň modelu 3).

6.1.2 Minimální požadavky na model sítě vvn

Zkratová impedance (úroveň 3).

6.1.3 Scénář simulace

Pro $P = \{-100; -75; -50; -25; 0; 25; 75; 100\} \% S_n$ (nebo libovolný menší krok) měnit jalový výkon od Q_{min} do Q_{max} s vhodným krokem pro sensitivní analýzu (např. $0,1 \cdot S_n$). Q_{max} je maximální a Q_{min} je minimální jalový výkon pro daný činný výkon P podle P-Q diagramu měničového napáječe.

6.1.4 Vyhodnocení

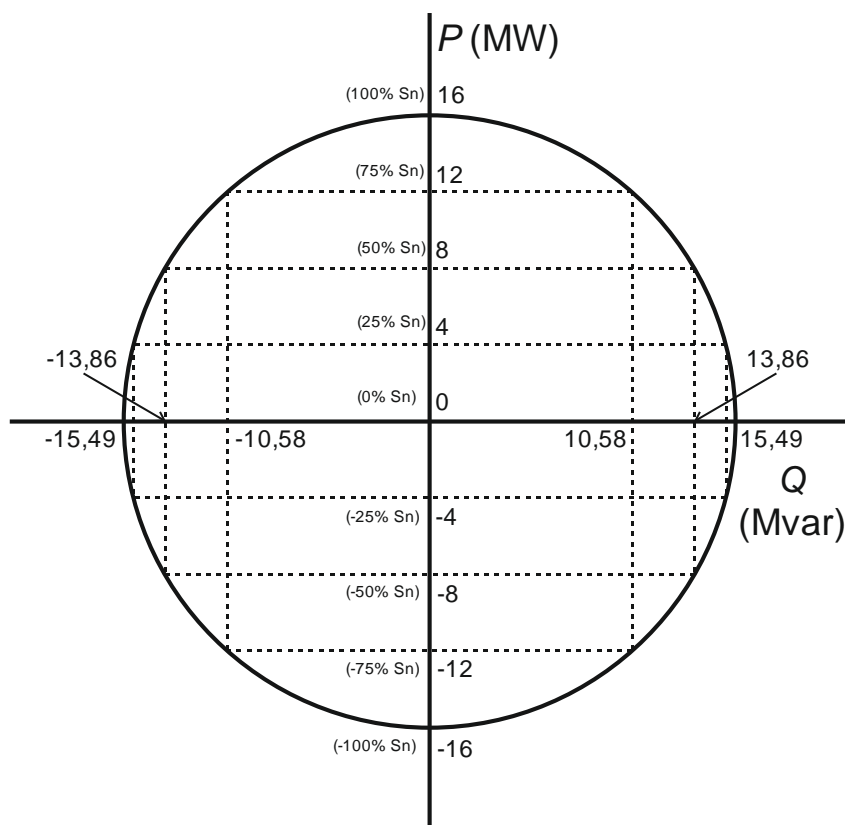
Podniková norma PNE 33 3430-0 ed.6 [6] předepisuje, že při normálním provozu sítě nesmí velikost pomalé změny napětí Δu způsobená všemi výrobními a/nebo akumulacími zařízeními v žádném společném napájecím bodě sítě vvn, ve srovnání s napětím bez výroby elektrické energie a/nebo akumulacími jednotkami, překročit hodnotu $\Delta u_{vvn\ lim} = 2\%$. Provozovatel sítě vvn však může stanovit odchylné mezní hodnoty pro pomalé změny napětí, pokud to typ a způsob provozu sítě umožňuje nebo vyžaduje.

V rámci pomalých změn napětí tedy nesmí dle [6] při normálním provozu dojít ke změně napětí ve stavu před a po připojení měniče k síti vvn (zvvn) o více než 2 %. Změna napětí je způsobena

- činným výkonem, který je důsledkem odběru/rekuperace TS, a
- jalovým výkonem, který je směrem do DS říditelný. V plánovací fázi provozu je nicméně možné vymezit provozní rozsah jalového výkonu měniče. Omezení jalového výkonu měniče je určeno s ohledem na fakt, že primárním úkolem měniče je napájení TS činným výkonem. Omezení však nemusí být dodrženo, pokud to způsob a provoz sítě umožňuje nebo vyžaduje, např. v rámci odpůrných služeb napětí [6].

6.1.5 Příklad vyhodnocení

V tomto příkladu je posuzován měničový napáječ se symetrickým kruhovým P-Q diagramem o nominálním výkonu $S_n = 16$ MVA, připojený do sítě vvn přes vstupní transformátor 110/22 kV.



Obr. 8 PQ diagram posuzovaného měničového napáječe.

Přestože je PQ diagram samotného měničového napáječe symetrický, PQ diagram v místě připojení napáječe (110 kV) je asymetrický z důvodu jalového odběru transformátoru, který není zahrnut do regulační smyčky jalového výkonu měničového napáječe. Tento fakt je vidět v Tab. 1 kde je výsledek sensitivní analýzy měničového napáječe, tzn. jsou uvedeny rozsahy jalového výkonu v místě připojení, při kterých je $\Delta u_{vvn\ lim} \leq 2\%$. Měničový napáječ však může

pracovat s jalovým výkonem mimo limity, pouze pokud to způsob a provoz sítě umožňuje nebo vyžaduje, tzn. na základě domluvy s provozovatelem soustavy [6].

Tab. 1 Maximální jalový výkon Q měničového napáječe při splnění $\Delta u_{vvn \text{ lim}} = 2\%$ při různém zatížení P (příklad). Pozn. Uvažuje se spotřebičová znaménkové konvence

P (% S_n)	Maximální rozsah Q (Mvar)
-100	0...0
-75	-9,809...6,414
-50	-13,081...6,358
-25	-14,690...6,348
0	-15,206...6,072
25	-14,732...5,926
50	-13,017...5,582
75	-9,702...5,304
100	0...0

6.2 Rychlé změny napětí

Tato kapitola se zaměřuje výhradně na rychlé změny napětí (RVC – Rapid Voltage Changes), které jsou způsobeny změnami činného výkonu trakční soustavy. Rychlé změny napětí způsobené dodávkou/odběrem jalového výkonu lze u měniče s DC meziobvodem v principu potlačit vhodným nastavením dynamické odezvy (např. časové konstanty regulátoru) na požadavek jalového výkonu (dále viz kap 8.1), neboť dodávka jalového výkonu do DS přímo nesouvisí s provozem TS a může být řízena. Vzhledem k algoritmu výpočtu rychlých změn napětí lze doporučit časovou konstantu v násobcích ~ 1 s (tj. 100násobek půlperiod v 50 Hz systému). Přesné určení časové konstanty dále ovlivňuje reálná četnost a velikost změn požadavku jalového výkonu, tzn. vývoj požadavku na jalový výkon v čase. Pokud je tento profil k dispozici (např. na základě reálného provozu nebo simulace chodu celé sítě), je vhodné ho spolu s plánovaným zatížením TS zahrnout do scénáře simulace a provést stejné vyhodnocení.

V kontextu měničového napáječe s DC meziobvodem mohou být rychlé změny napětí v místě připojení způsobeny:

- provozem TS, tzn. dynamickými změnami činného výkonu trakčních zátěží, nebo
- dynamikou dodávky/odběru jalového výkonu směrem do DS v místě připojení.

Tato kapitola ukazuje detailní analýzu vlivu dynamického zatížení trakční soustavy (činným výkonem) na základě algoritmu pro hodnocení rychlých změn napětí [16].

6.2.1 Minimální požadavky na model měniče

Univerzální dynamický model (úroveň 2).

6.2.2 Minimální požadavky na model sítě vvn

Zkratová impedance (úroveň modelu 3).

6.2.3 Scénář

Jalový výkon 3AC strany měniče je nastaven po celou dobu simulace konstantní (např. $Q = 0$), činný výkon P je v průběhu simulace variován dle předpokládaného profilu zatížení trakční

soustavy. Profil zatížení musí být dostatečně dlouhý, aby reprezentoval typické zatížení v čase, případně obsahoval reprezentativní cyklus zatížení. Prakticky je délka profilu v řádu jednotek hodin.

6.2.4 Vyhodnocení

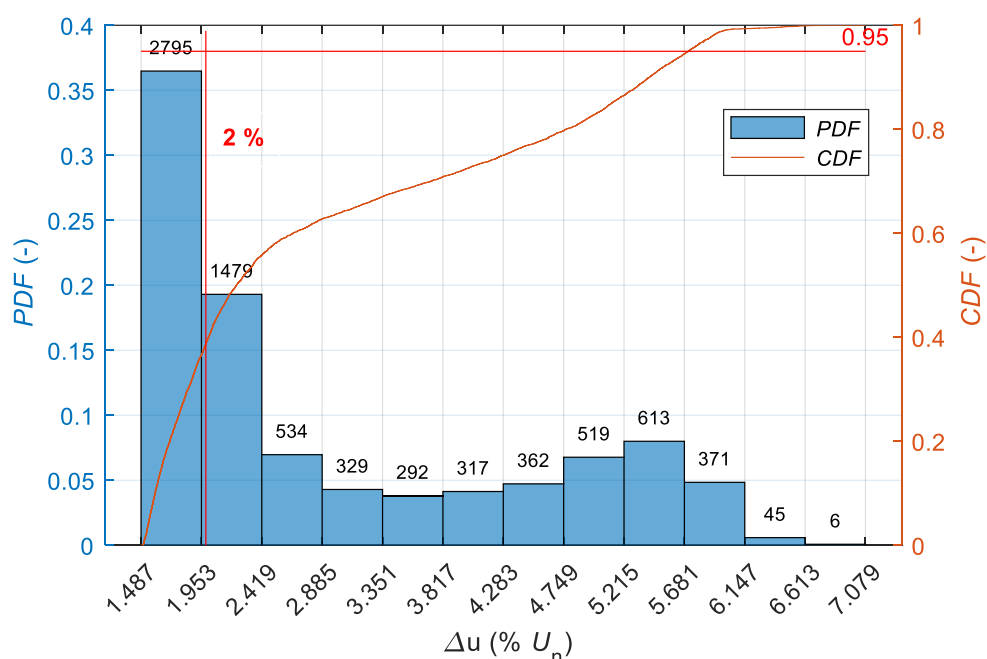
Algoritmus pro rychlé změny napětí vychází z [16] s parametry doporučenými v [6]. Pro síť vvn (zvn) je doporučeno uvažovat práh rychlých změn 1,5 % a hysterezi 0,75 %. Maximální změna napětí způsobená jedním měničovým napáječem v normálním provozu nesmí překročit 2 % (také viz kap. 6.1) a dále pro $\Delta u \leq 2\%$ definuje maximální četnost a minimální dobu přestávky mezi změnami dle Tab. 2.

Tab. 2 Přípustné změny napětí v závislosti na četnosti a době přestávky pro jednoho uživatele sítě vvn nebo zvn

Změna napětí Δu	Četnost n	Minimální doba přestávky z mezi změnami napětí
2 %	2 % 9krát za 2 hodiny	13 minut
$\leq 2\%$	$n = \frac{12 \cdot (0,25)^3}{\left(\frac{\Delta u}{7,36\%}\right)^3}$	$z = \frac{120 \text{ min}}{n}$

6.2.5 Příklad vyhodnocení

Obr. 9 je příkladem prezentace četnosti a rozdělení rychlých změn napětí podle velikosti změny. Je zjevné, jaká část změn napětí je větší než mez 2 % [6]. Pokud se objeví změny větší než 2 %, připojení je přípustné pouze se souhlasem provozovatele sítě.



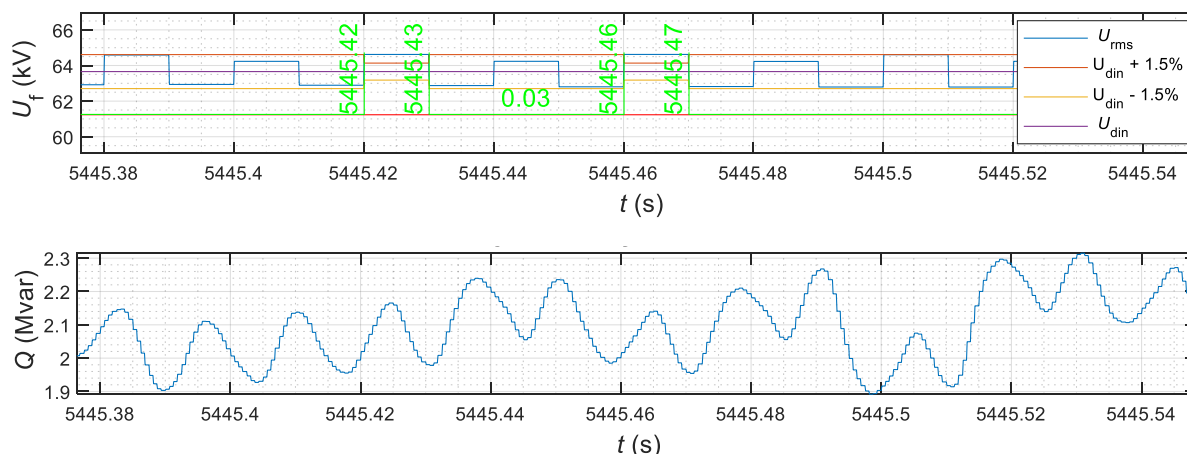
Obr. 9 Četnost velikosti rychlých změn napětí (Δu).

Vedle velikosti změn je nutné posoudit minimální přestávku mezi změnami, vycházející z jejich četnosti. Příklad vyhodnocení je v Tab. 3, kde je pro každý pokles na základě velikosti poklesu vypočítána minimální doba přestávky dle [6] ($t_{\text{přestávka,min}}$), se kterou je porovnává skutečná doba přestávky ze simulace ($t_{\text{přestávka}}$). Pokud je doba skutečné přestávky kratší než doba daná normou, nejsou dle [6] přípustné další změny napětí zákaznické instalace a je doporučeno zavést nápravná opatření.

Tab. 3 Příklad části tabulky pro vyhodnocení rychlých změn napětí.

ID RVC ()	dU (%)	t _{přestávka} (s)	t _{přestávka} (min)	t _{přestávka,min} (min)
1	1,672	0,01	0,0002	7,507
2	1,555	6,52	0,1087	6,031
3	1,609	0,42	0,0070	6,686
4	1,686	0,09	0,0015	7,690
5	1,616	1,86	0,0310	6,779
6	1,510	1,41	0,0235	5,532
7	1,559	0,41	0,0068	6,084
8	1,667	1,84	0,0307	7,443
9	1,591	1,29	0,0215	6,470
10	1,705	0,15	0,0025	7,958
11	2,144	0,05	0,0008	13,000
12	1,560	0,34	0,0057	6,095
13	1,555	0,86	0,0143	6,035

Na příkladu na Obr. 9 a Tab. 3 je ukázán případ, kde je na základě jak nedodržení minimální přestávky mezi změnami, tak z hlediska velikosti změn nad 2%, připojení nepřijatelné. V této simulaci byla záměrně zvolena dlouhá radiální síť (vedení vvn o délce 125 km) a byly odhaleny změny napětí související s kmitajícím regulátorem jalového výkonu, kde perioda kmitů je velmi blízká síťové půlperiodě (Obr. 10). V takovém případě jednotlivé půlperiodové efektivní hodnoty napětí kolísají a jsou klasifikovány jako rychlé změny. Nutno podotknout, že vzhledem k periodě kmitů blízkých 0,01s (100 Hz) tato fluktuace napětí však nebude detekována algoritmem míry vjemu flikru.



Obr. 10 Průběh půlperiodových efektivních hodnot napětí s limity pro vyhodnocování a detekované rychlé změny napětí (nahore), oscilace jalového výkonu (dole).

6.3 Flikr

Posouzení připojitelnosti pomocí simulace z hlediska flikru spočívá v porovnání úrovně flikru s mezními emisními hodnotami, které jsou stanoveny pro dané zařízení v konkrétním místě DS. Simulace vyhodnocuje úroveň flikru způsobenou odběrem činného výkonu, který je důsledkem plánovaného provozu trakční soustavy.

6.3.1 Minimální požadavky na model měniče

Univerzální dynamický model (úroveň 2).

6.3.2 Minimální požadavky na model sítě vvn

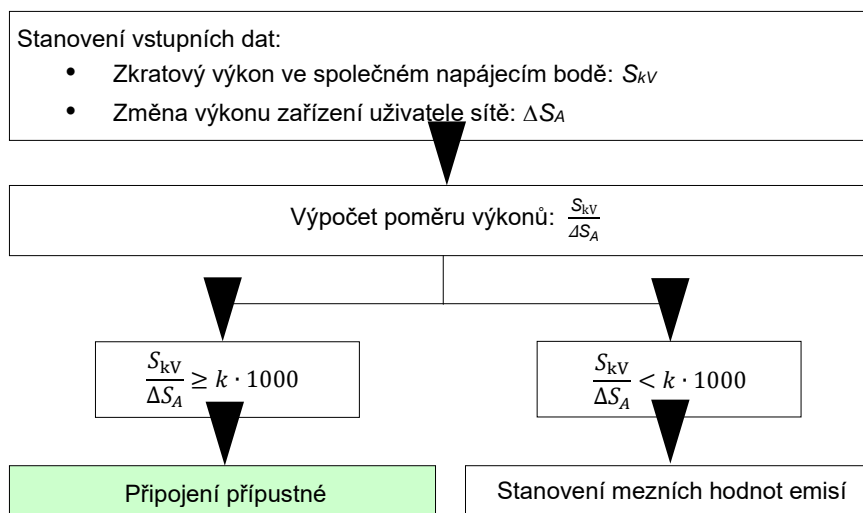
Nahrazení zkratovou impedancí (úroveň 3).

6.3.3 Scénář

Jalový výkon 3AC strany měniče je nastaven po celou dobu simulace konstantní (např. $Q = 0$), činný výkon P je v průběhu simulace variován dle předpokládaného profilu zatížení trakční soustavy. Profil zatížení musí být dostatečně dlouhý, aby reprezentoval typické zatížení v čase, případně obsahoval reprezentativní cyklus zatížení. Prakticky je délka profilu v řádu jednotek hodin.

6.3.4 Vyhodnocení

Postup posouzení připojitelnosti je znázorněn na Obr. 11.



Obr. 11 Vývojový diagram posouzení připojitelnosti z hlediska flickru dle [6].

Mezní hodnoty emisí jsou stanoveny následovně:

$$P_{st,vvn,lim} = G_{Pst,vvn} \cdot \sqrt{\frac{S_A}{S_{vvn}}} \quad (1)$$

$$P_{lt,vvn,lim} = 0.65 \cdot P_{st,vvn,lim} \quad (2)$$

$G_{Pst,vvn}$ – celkový přípustný krátkodobý flickr pro všechny uživatele sítě přímo připojené k síti vvn

$P_{st,vvn,lim}$ – přípustný maximální krátkodobý flickr zařízení uživatele sítě

$P_{lt,vvn,lim}$ – přípustný maximální dlouhodobý flickr zařízení uživatele sítě

S_A – přípojný výkon zařízení uživatele sítě

S_{vvn} – celkový dostupný připojitelný výkon sítě vvn.

Pro celkový přípustný krátkodobý flickr pro všechny uživatele sítě přímo připojené k síti vvn ($G_{Pst,vvn}$) platí:

$$G_{Pst,vvn} = \sqrt[3]{L_{Pst,vvn}^3 - (T_{Pst,zvn-vvn} \cdot L_{Pst,zvn})^3} \quad (3)$$

$T_{Pst,zvn-vvn}$ – koeficient přenosu mezi hladinami zvn-vvn $T_{Pst,zvn-vvn} = 1$ (tab. 5 v [6]),

$L_{Pst,vvn}$ – plánovací úroveň flickru pro hladinu vvn, $L_{Pst,vvn} = 0,70$ (příloha C v [6]),

$L_{Pst,zvn}$ – plánovací úroveň flickru pro hladinu vvn, $L_{Pst,zvn} = 0,45$ (příloha C v [6]),

Pro celkový dostupný připojitelný výkon S_{vvn} platí:

$$S_{vvn} = (k_B + k_E + k_S) \cdot S_{N,vvn} \quad (4)$$

$S_{N,vvn}$ – fiktivní výkon sítě (součet jmenovitého výkonu transformátorů a zdrojů v síti)

k_B – činitel spotřeby

k_E – činitel výroby

k_S – činitel akumulace.

POZNÁMKA: Činitelé k_B , k_E , k_S se určují nezávisle na jevu. Součet $k_B + k_E + k_S$ může být větší než 1.

Pro malé připojené výkony jsou výsledné mezní hodnoty rušivých emisí velmi nízké. Proto se každému zařízení uživatele sítě přidělí minimální hodnota $P_{st,vvn,lim,min} = 0,35$ a $P_{lt,vvn,lim,min} = 0,25$.

Pokud vedou výpočty podle rovnic (1) a (2) k mezním hodnotám emisí $P_{st,vvn,lim} > 0,5$ nebo $P_{lt,vvn,lim} > 0,35$, omezí se maximální přípustná emise rušení pro zařízení uživatele sítě na $P_{st,vvn,lim,max} = 0,5$ resp. $P_{lt,vvn,lim,max} = 0,35$.

Pro emise flickru od zařízení jednoho uživatele sítě vvn platí následující podmínka:

$$P_{st} \leq (0,35 \leq P_{st,lim} \leq 0,50) \quad (5)$$

$$P_{lt} \leq (0,25 \leq P_{lt,lim} \leq 0,35) \quad (6)$$

6.3.5 Příklad vyhodnocení

Daná síť a měničový napáječ mají parametry: $\Delta S_A = 32$ MVA, $k = 1$, $S_{kV} = 1570$ MVA. Pro poměr výkonů platí:

$$\frac{S_{kV}}{\Delta S_A} = \frac{1570}{16} = 49,06 \quad (7)$$

$$\frac{S_{kV}}{\Delta S_A} < 1000 \quad (8)$$

Dle Obr. 11 se v tomto případě přistoupí ke stanovení mezních hodnot flickru $P_{st,vvn,lim}$ a $P_{lt,vvn,lim}$. Pro výpočet jsou použity následující parametry:

$S_{N,vvn} = 350$ MVA

k_B – činitel odběru, určen jako $k_B = 0,8$

k_E – činitel výroby, určen jako $k_E = 0,5$.

k_S – činitel akumulace, určen jako $k_S = 0$.

$S_A = 16$ MVA.

Poté obdržíme hodnotu S_{vvn} :

$$S_{vvn} = 455 \text{ MVA} \quad (9)$$

Po dosažení pro mezní hodnoty:

$$P_{st,vvn,lim} = 0,107$$

$$P_{lt,vvn,lim} = 0,069.$$

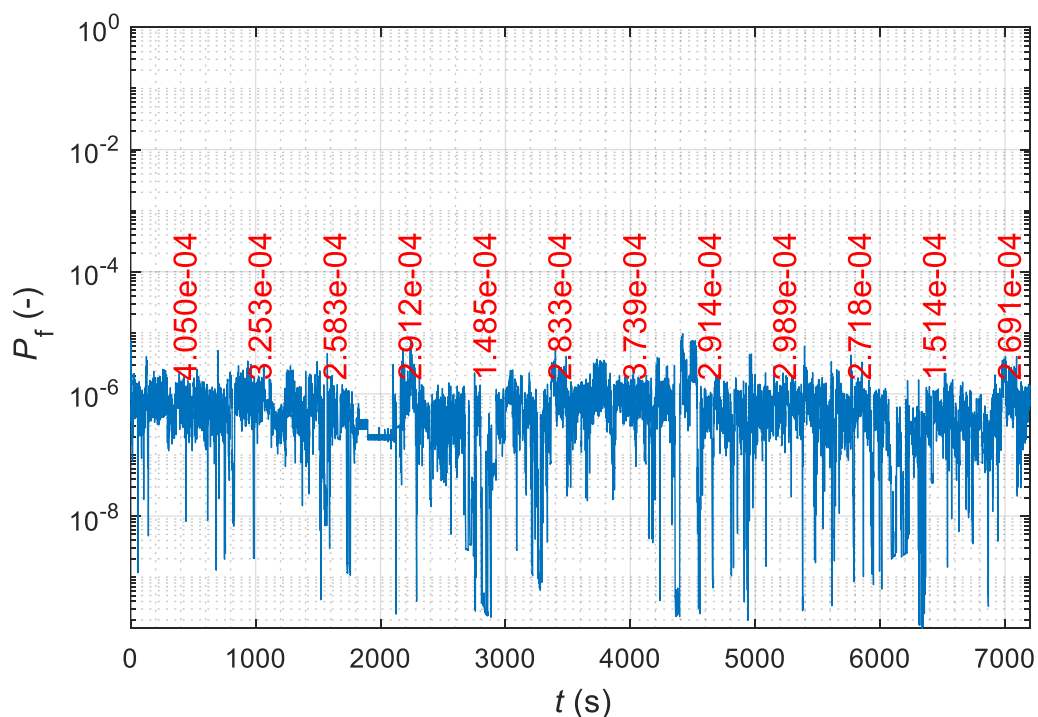
S ohledem na podmínky (5) a (6) jsou limity pro měničový napáječ:

$$P_{st,vvn,lim} = 0,35$$

$$P_{lt,vvn,lim} = 0,25.$$

Krátkodobá míra flickru (P_{st}) a dlouhodobá míra flickru (P_{st}) se vyhodnotí dle ČSN EN 61000-4-15 [17]. Je nutné podotknout, že při simulaci provozu nesmí dojít k časové kompresi při simulaci, tzn. pokud jsou vstupem realistické průběhy zatížení TS, absolutní délka simulace musí být rovna délce záznamu. Pokud je simulace zrychlena, nelze použít standardní flickrmetr dle ČSN EN 61000-4-15).

Průběh okamžitého flickru a úrovně krátkodobé míry vjemu flickru (P_{st}) je na Obr. 12, kde červené úrovně P_{st} jsou daleko pod limitem $P_{st,vvn,lim}$.



Obr. 12 Průběh okamžité hodnoty flickru (modrá křivka) a úrovně krátkodobé míry vjemu flickru (červené hodnoty, P_{st}) v místě připojení měničového napáječe.

Z vyhodnocení plyne, že mezních hodnot flikru není v tomto případě dosaženo. Na druhou stranu, řízené změny jalového výkonu také přispívají do úrovně emise flikru a budou snižovat pomyslnou rezervu mezi emisemi daných činným výkonem a mezními hodnotami. Aby v reálném provozu měničového napáječe (tj. současný odběr/dodávka činného a jalového výkonu) nebyly mezní hodnoty překročeny je nutné adekvátně upravit dynamickou odezvu na požadavek jalového výkonu v řízení měničového napáječe. To je však závislé na četnosti a hloubkách změn požadavků na regulaci jalového výkonu, které jsou však v plánovací fázi obtížně definovatelné. Podobně jako v předchozí kapitole, pokud je profil žádané hodnoty jalového výkonu k dispozici (např. na základě reálného provozu nebo simulace chodu celé sítě), je vhodné ho spolu s plánovaným zatížením TS zahrnout do scénáře simulace a provést stejné vyhodnocení úrovně míry flikru.

6.4 Nesymetrie

Měničové napáječe se stejnosměrným meziobvodem jsou do DS připojeny symetricky, při standardním provozu není odběr nesymetrický. Pomocí modelů měničového napáječe (úroveň 1 a úroveň 2) však lze modelovat chování měniče při nesymetrii napětí (není předmětem této metodiky).

6.5 Harmonické

Emise harmonických proudů a jejich zpětný vliv na napětí je nevyhnutelný jev všech spínaných měničů. V případě měničového napáječe s DC meziobvodem je propagování tohoto druhu rušení z trakční soustavy značně eliminováno, a proto je tato kapitola zaměřená na emisi třífázového front-endu připojeného do distribuční soustavy.

6.5.1 Minimální požadavky na model měniče

Detailní model (úroveň modelu 1).

6.5.2 Minimální požadavky na model sítě vvn

Detailní model (úroveň modelu 1).

6.5.3 Scénář

Cílem je prověřit emisi harmonických proudů měničového napáječe při kombinaci zatížení činným (P) a jalovým (Q) výkonem. P je definován, v poměru k instalovanému výkonu napáječe (S_n), a jalový výkon (Q) je definovaný v poměru k rozdílu příslušných Q_{max} a Q_{min} . Q_{max} je maximální a Q_{min} je minimální jalový výkon pro daný činný výkon P podle P-Q diagramu měničového napáječe.

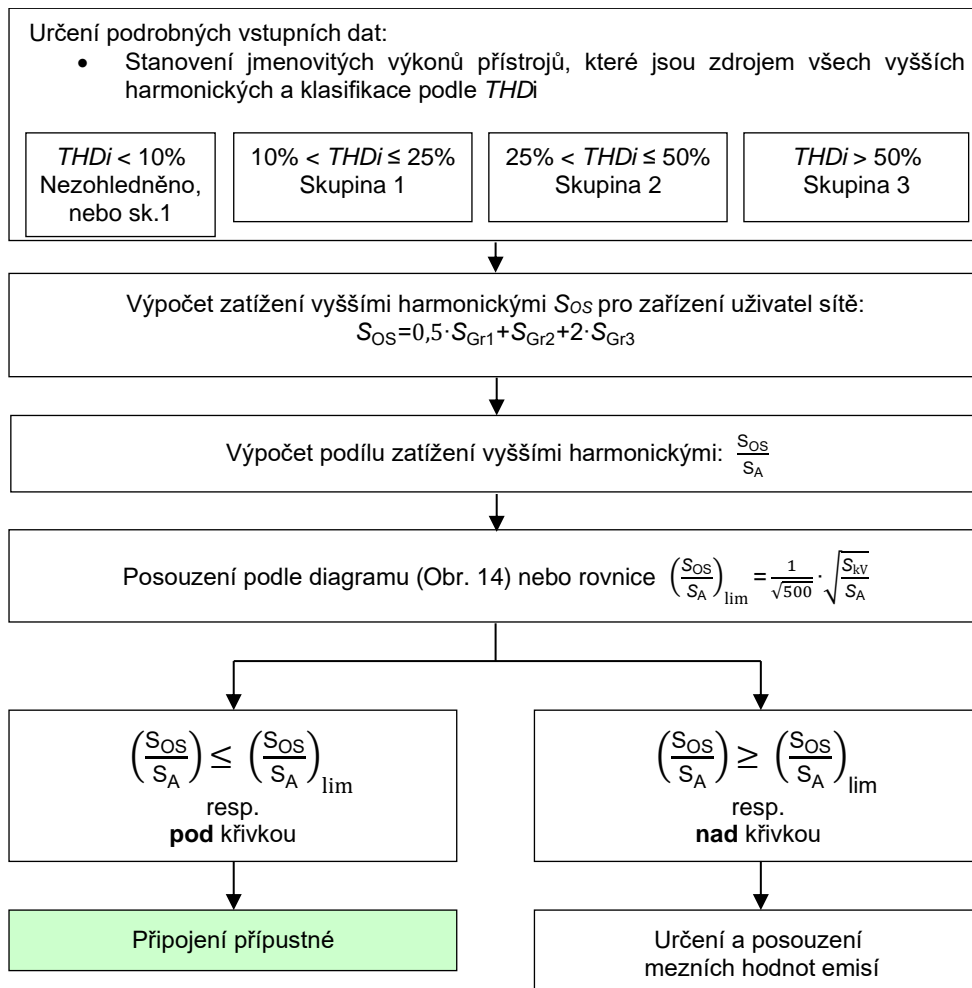
Trakční soustava je synchronní s DS, napětí napáječe je nominální (110 kV).

Tab. 4 Vybrané stavy měničového napáječe pro simulaci. Pozn. Uvažuje se odběrová znaménková konvence

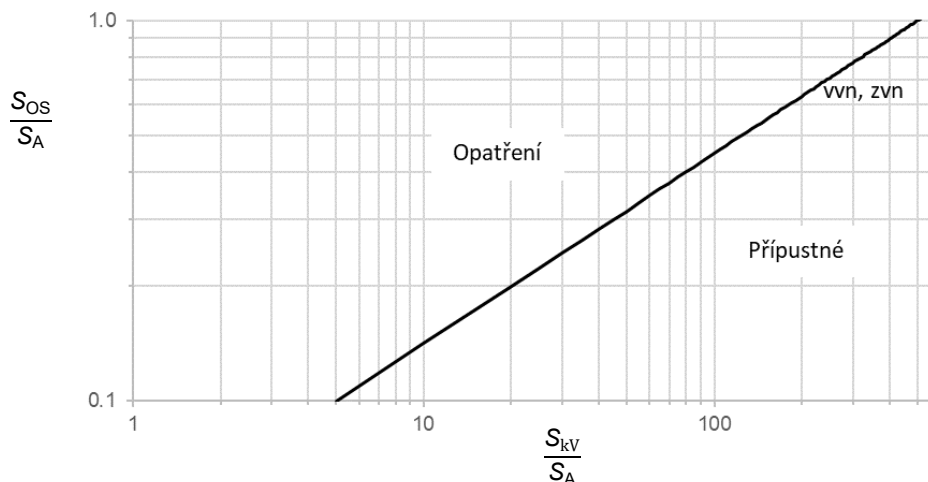
$P(\%S_n)$	100	75	50	25	0	-25	-50	-75	-100
Q (% z $(Q_{max} - Q_{min})$)	0								
	25								
	50								
	75								
	100								
	-25								
	-50								
	-75								
	-100								

6.5.4 Vyhodnocení

Postup posouzení připojitelnosti je znázorněn na Obr. 13 a Obr. 14. Měničový napáječ, vzhledem k prokládanému spínání a architektuře vycházející z 12ti pulzního usměrňovače, patří podle THDi při jmenovitém zatížení dle [6] do skupiny 1 (THDi < 25 %). THDi při jmenovitém zatížení lze během simulace sledovat a ověřit tak příslušnost zařízení ke skupině 1.



Obr. 13 Vývojový diagram posouzení připojitelnosti stupně 2 z hlediska harmonických dle [6].



Obr. 14 Diagram k posouzení podle stupně 2 z hlediska harmonických [6].

Mezní hodnoty emisí pro harmonickou proudů I_h řádu h , v poměru k proudu zařízení uživatele sítě vypočtenému z instalovanému výkonu I_A jsou určeny podle rovnice:

$$\left(\frac{I_h}{I_A}\right)_{\text{lim}} = \frac{p_h}{10000} \cdot \frac{1}{k_h} \cdot \sqrt{\frac{S_{kV}}{S_A}} \cdot \sqrt{\frac{S_{kV}}{(k_B + k_E) \cdot S_N}} \quad (10)$$

p_h – koeficient proporcionality pro harmonickou řádu h , dle [6]

k_h – činitel rezonance pro harmonickou řádu h

6.5.5 Příklad vyhodnocení

Pro měnič s výkonem 16 MVA připojený k síti $S_{kV} = 1570$ MVA jsou parametry:

$$S_{OS} = 0.5 \cdot S_{Gr1} + S_{Gr2} + 2 \cdot S_{Gr3} = 0.5 \cdot 16 \text{ MVA} = 8 \text{ MVA} \quad (11)$$

$S_A = 16$ MVA,

$S_{OS}/S_A = 0,5$,

kde S_{OS} je výkon zařízení uživatele sítě, která produkují harmonické a S_A je přípojný výkon zařízení uživatele sítě.

Kritérium mezní velikosti S_{OS}/S_A :

$$\left(\frac{S_{SO}}{S_A}\right)_{\text{lim}} = \frac{1}{\sqrt{500}} \cdot \sqrt{\frac{S_{kV}}{S_A}} = \frac{1}{\sqrt{500}} \cdot \sqrt{\frac{1570}{16}} = 0,443 \quad (12)$$

$$\frac{S_{SO}}{S_A} \geq \left(\frac{S_{SO}}{S_A}\right)_{\text{lim}} \quad (13)$$

Kritériu mezní velikosti měnič nevyhovuje, proto je přistoupeno k určení a posouzení mezních hodnot emisí pro harmonickou proudů I_h řádu h , v poměru k proudu zařízení uživatele sítě vypočtenému z instalovanému výkonu I_A podle (10).

Parametry rovnice:

p_h – koeficient proporcionality pro harmonickou řádu h , dle Tabulky 27 v PNE 33-3430 [6]

k_h – činitel rezonance pro harmonickou řádu h , dle Tabulky 21 v PNE ($h_{res} = 950$ Hz)

S_N – fiktivní výkon sítě (součet jmenovitého výkonu transformátorů a zdrojů v síti), $S_N = 350$ MVA

k_B – činitel odběru, určen jako $k_B = 0,8$

k_E – činitel výroby, určen jako $k_E = 0,5$,

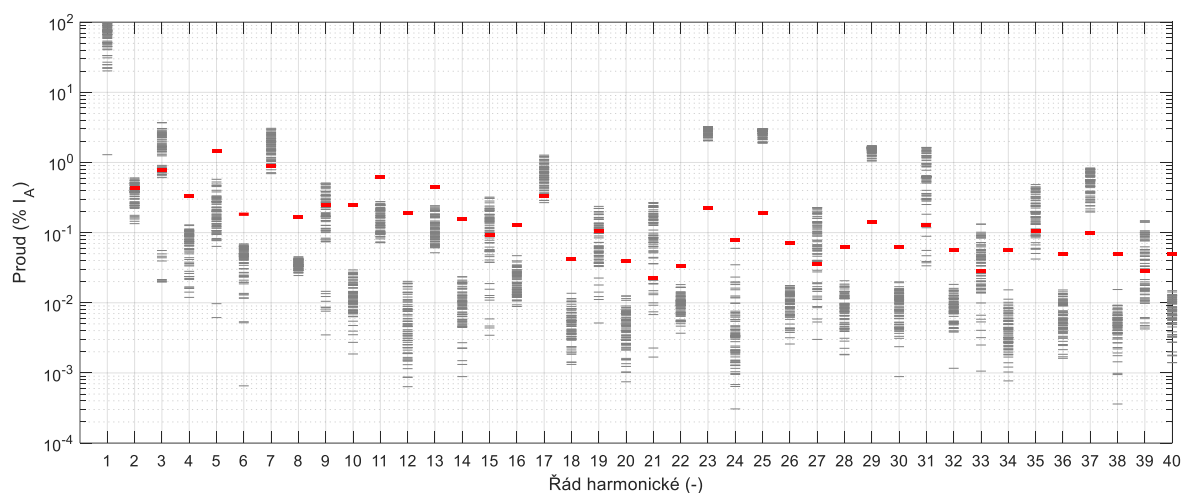
I_A – proud zařízení uživatele vypočtený z instalovaného výkonu, $I_A = 83,98$ A

Limitní hodnoty z rovnice (10) jsou pro jednotlivé harmonické uvedeny v Tab. 5.

Tab. 5 Limitní hodnoty emisí harmonických proudů pro měničový napáječ v % I_A

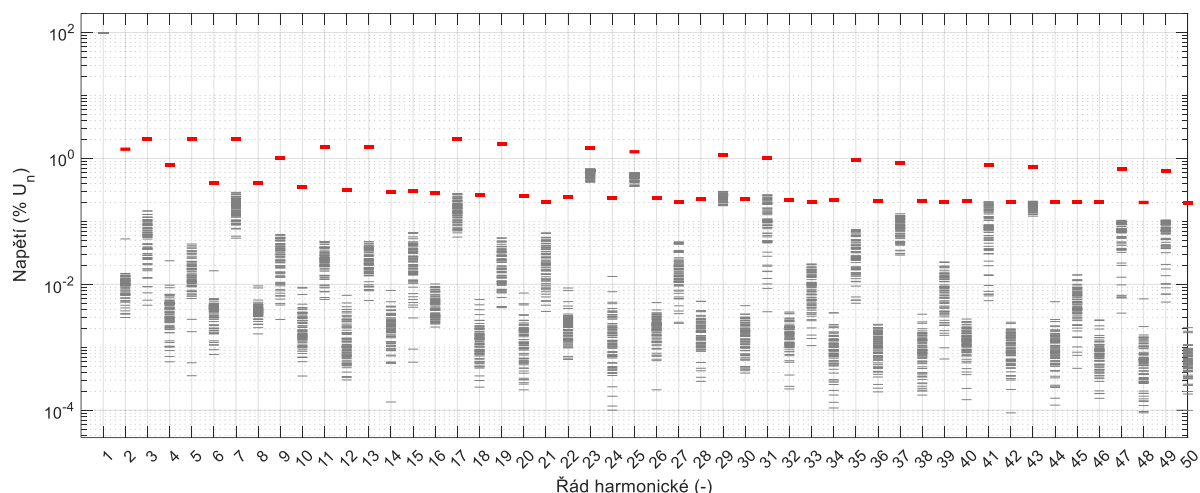
h	$\left(\frac{I_h}{I_A}\right)_{\text{lim}}$	h	$\left(\frac{I_h}{I_A}\right)_{\text{lim}}$	h	$\left(\frac{I_h}{I_A}\right)_{\text{lim}}$	h	$\left(\frac{I_h}{I_A}\right)_{\text{lim}}$
		11	0,619	21	0,023	31	0,127
2	0,429	12	0,190	22	0,034	32	0,056
3	0,774	13	0,450	23	0,225	33	0,028
4	0,338	14	0,155	24	0,077	34	0,056
5	1,470	15	0,091	25	0,190	35	0,106
6	0,183	16	0,127	26	0,070	36	0,049
7	0,879	17	0,338	27	0,035	37	0,098
8	0,169	18	0,042	28	0,063	38	0,049
9	0,246	19	0,107	29	0,141	39	0,028
10	0,246	20	0,039	30	0,063	40	0,049

Obr. 15 ukazuje emise harmonických složek proudu v kvazi-ustálených stavech dle Tab. 4 a jejich porovnání s mezními hodnotami (Tab. 5). Z obrázku je zřejmé, že měničový napáječ emituje určité harmonické proudy nad mezní hodnoty, a proto je nutné navrhnout nápravné opatření (např. vstupní filtry) a vyhodnocení opakovat. Pro výpočet harmonických složek je doporučeno aplikovat Fourierovu transformaci na každý kvazi-ustálený stav (10ti periodové okno) a dále slučovat s frekvenčními složkami ± 1 kolem dané harmonické – podskupina harmonické (např. v systému 50 Hz pro harmonickou řádu 2~100 Hz se provede sloučení frekvenčních složek (95, 100, 105) Hz).



Obr. 15: Emise harmonických složek proudu ve vybraných kvazi-ustálených stavech (rozptyl šedých úrovní) v porovnání s mezní hodnotou emisí dle [6] (červené úrovně).

Na Obr. 16 je zobrazen příspěvek měničového napáječe ke zkreslení napětí v místě připojení a porovnání s plánovacími úrovněmi harmonických napětí pro vvn (110 kV) dle přílohy C.1 [6]. Tím je kvantifikován zpětný vliv napáječe. Přestože by měničový napáječ z hlediska plánovacích úrovní v celé síti mohl být teoreticky připojen (harmonická napětí jsou pro každou harmonickou složku pod plánovací úrovní), z hlediska úrovně příspěvku od jednoho zařízení do celé sítě je však připojení bez opatření nepřijatelné (Obr. 15).



Obr. 16 Příspěvek měničového napáječe k harmonickému zkreslení napětí v místě připojení ve vybraných kvazi-ustálených stavech (rozptyl šedých úrovní) v porovnání s plánovacími úrovněmi dle [6] (červené úrovně).

Vyhodnocení na Obr. 15 a Obr. 16 dále může indikovat rezonance mezi DS a měničovým napáječem, které mohou být způsobené pasivními prvky topologie měničového napáječe (vč. filtrů) a nestabilitou řídicích smyček. Rezonance by ve frekvenčních spektrech byly indikovány vysokou úrovní některých složek. Podobně se rezonance mohou projevit i ve spektru meziharmonických (viz další kapitola).

6.6 Meziharmonické

Procesy v řízení měničového napáječe, které jsou nesynchronizované se síťovým napětím, způsobují emisi proudů, které se při Fourierově transformaci s oknem synchronizovaným se síťovou frekvencí, projeví jako meziharmonické proudy. Meziharmonické proudy, obzvláště do 2násobku systémové frekvence, navíc přispívají k modulaci napětí, tj. kolísání napětí, a přispívají tak do úrovně flikru v DS. Tato kapitola se obzvláště zaměřuje na emisi:

- a) Nízkofrekvenčních a vysokofrekvenčních meziharmonických, tj. meziharmonických s vyšší frekvencí než je základní frekvence (skupina meziharmonických řádu 1,5 a vyšší),
- b) subharmonických, tj. meziharmonických s nižší frekvencí než je základní frekvence (skupina meziharmonických řádu 0,5).

6.6.1 Minimální požadavky na model měniče

Dynamický model měniče (úroveň 1).

6.6.2 Minimální požadavky na model sítě vvn

Detailní model (úroveň 1).

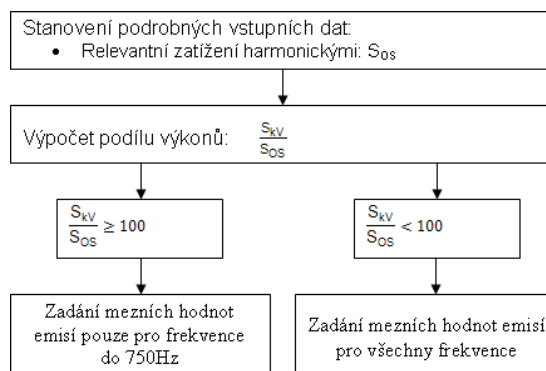
6.6.3 Scénář

Scénáře simulace jsou navrženy s cílem:

- a) odhalit nesynchronizovaného spínání měniče, základní frekvence trakční soustavy je shodná s frekvencí distribuční soustavy, napětí a frekvence napáječe je nominální (110 kV, 50 Hz), zatížení činným a jalovým výkonem dle Tab. 4,
- b) vyšetřit závislost emise meziharmonických na změně frekvence trakční soustavy od distribuční soustavy v rozmezí 48,0 – 52,0 Hz (vychází z [12] pro nesynchronně připojené TS), s krokem 0,2 Hz, napětí a frekvence napáječe je nominální (110 kV, 50 Hz), činný a jalový výkon je nastaven na konstantní hodnotu.

6.6.4 Vyhodnocení

Vyhodnocení připojitelnosti stupně 2 dle [6] z hlediska mezipharmonických popisuje vývojový diagram na Obr. 17.



Obr. 17 Vývojový diagram posouzení připojitelnosti stupně 2 z hlediska mezipharmonických dle [6].

Mezní hodnoty emisí proudu mezipharmonické I_m pro všechny mezipharmonické podskupiny řádu $m = \{0,5,1,5,2,5, \dots\}$ do 2 kHz a mezipharmonické 200 Hz podskupiny řádu b od 2 kHz do 9 kHz.

$$\left(\frac{I_m}{I_A}\right)_{\text{lim}} = \frac{1}{m} \cdot \frac{u_{m,\text{lim}}}{100} \cdot \frac{1}{k_m} \cdot \frac{S_{kv}}{S_{0s}} \quad (14)$$

$$\left(\frac{I_b}{I_A}\right)_{\text{lim}} = \frac{50}{b} \cdot \frac{u_{b,\text{lim}}}{100} \cdot \frac{1}{k_b} \cdot \frac{S_{kv}}{S_{0s}} \quad (15)$$

$u_{m,\text{lim}}$ – přípustná úroveň mezipharmonické řádu m (%), dle [6],

k_m – rezonanční činitel pro mezipharmonickou řádu m , dle [6],

$u_{b,\text{lim}}$ – přípustná úroveň pásma 200 Hz se střední frekvencí b (%), dle [6],

k_b – rezonanční činitel na střední frekvenci b daného pásma 200 Hz, dle [6].

I_A – proud zařízení uživatele vypočtený z instalovaného výkonu.

6.6.5 Příklad vyhodnocení

Pro měnič s výkonem 16 MVA připojený k síti se zkratovým výkonem $S_{kv} = 1570$ MVA je $S_{0s} = 16$ MVA (relevantní zátěž produkující mezipharmonické nebo rušení v pásmu 2-9 kHz) a podíl výkonů:

$$\frac{S_{kv}}{S_{0s}} = \frac{1570}{16} = 98,13 \quad (16)$$

$$\frac{S_{kv}}{S_{0s}} < 100. \quad (17)$$

Poměr výkonů je menší než 100, proto je přístupeno ke specifikaci mezních hodnot emisí proudu mezipharmonické I_m pro všechny mezipharmonické podskupiny řádu $m = \{0,5,1,5,2,5, \dots\}$ do 2 kHz dle (14) a mezipharmonické 200 Hz podskupiny řádu b od 2 kHz do 9 kHz dle (15).

Parametry rovnic:

$u_{m,\text{lim}}$ – přípustná úroveň mezipharmonické řádu m (%), dle Tabulky 33 v [6],

k_m – rezonanční činitel pro mezipharmonickou řádu m , $k_m = 1$ dle [6],

$u_{b,\text{lim}}$ – přípustná úroveň pásma 200 Hz se střední frekvencí b (%), dle Tabulky 33 v [6],

k_b – rezonanční činitel na střední frekvenci b daného pásma 200 Hz, $k_b = 1$ dle [6].

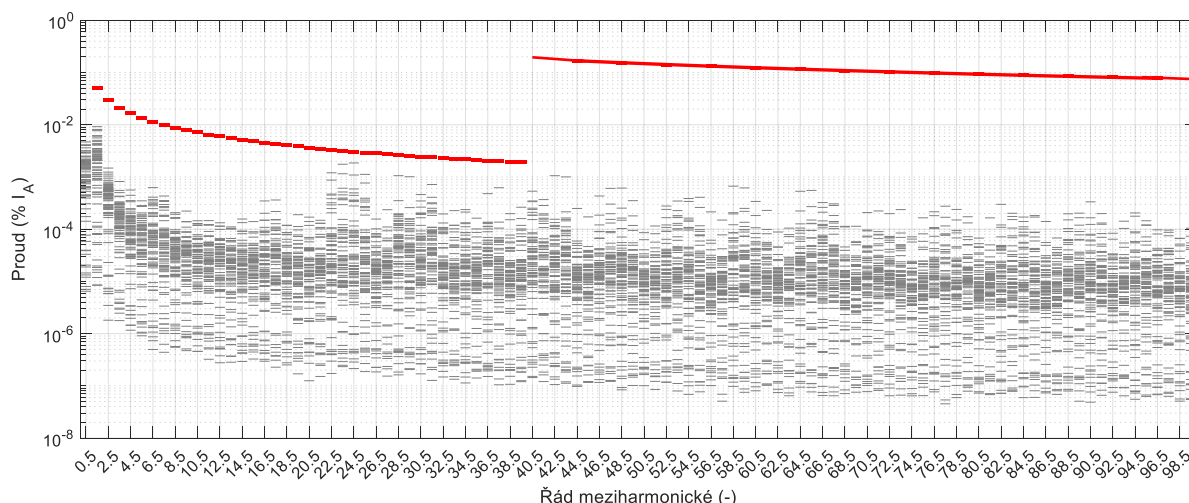
I_A – proud zařízení uživatele vypočtený z instalovaného výkonu, $I_A = 83,98$ A.

Limity jsou vypočteny v Tab. 6.

Tab. 6 Limitní hodnoty emisí mezipharmonických proudů pro měničový napáječ v % I_A .

m	$\left(\frac{I_m}{I_A}\right)_{\text{lim}}$	m	$\left(\frac{I_m}{I_A}\right)_{\text{lim}}$	m	$\left(\frac{I_m}{I_A}\right)_{\text{lim}}$	b	$\left(\frac{I_b}{I_A}\right)_{\text{lim}}$
0,5	0,1500	14,5	0,0052	28,5	0,0026	41,5	0,181
1,5	0,0500	15,5	0,0048	29,5	0,0025	45,5	0,165
2,5	0,0300	16,5	0,0045	30,5	0,0025	49,5	0,152
3,5	0,0214	17,5	0,0043	31,5	0,0024	53,5	0,140
4,5	0,0167	18,5	0,0041	32,5	0,0023	57,5	0,130
5,5	0,0136	19,5	0,0038	33,5	0,0022	61,5	0,122
6,5	0,0115	20,5	0,0037	34,5	0,0022	65,5	0,115
7,5	0,0100	21,5	0,0035	35,5	0,0021	69,5	0,108
8,5	0,0088	22,5	0,0033	36,5	0,0021	73,5	0,102
9,5	0,0079	23,5	0,0032	37,5	0,0020	77,5	0,097
10,5	0,0071	24,5	0,0031	38,5	0,0019	81,5	0,092
11,5	0,0065	25,5	0,0029	39,5	0,0019	85,5	0,088
12,5	0,0060	26,5	0,0028			89,5	0,084
13,5	0,0056	27,5	0,0027			93,5	0,080
						97,5	0,077

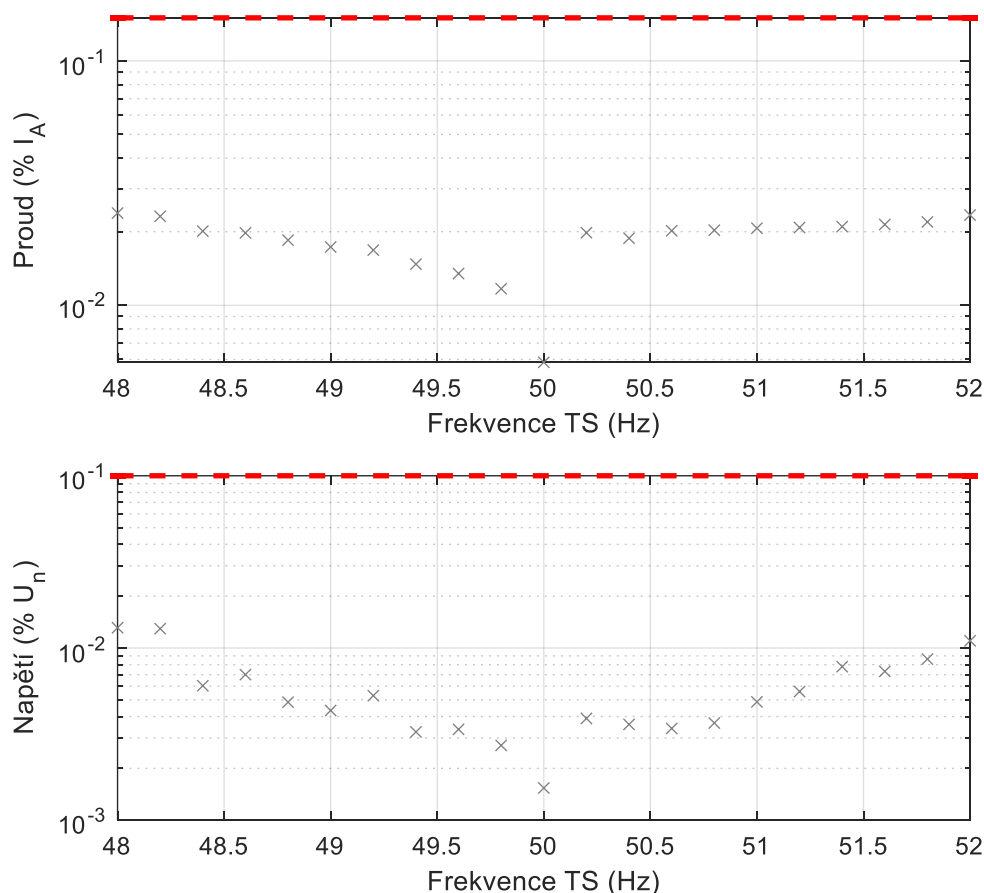
Vyhodnocení mezipharmonických je doporučeno pomocí Fourierovy transformace. Pro výpočet mezipharmonických složek je doporučeno aplikovat Fourierovu transformaci na každý kvazi-ustálený stav (10ti periodové, synchronizované, okno) a dále slučovat frekvenční složky do podskupin mezipharmonických m dle ČSN EN 61000-4-7 [18]. V systému 50 Hz pro mezipharmonickou řadu 1,5 (75 Hz) se provede sloučení frekvenčních složek (60, 65, 70, 75, 80, 85, 90) Hz. Pro řady 200 Hz skupin mezipharmonických se střední frekvencí b (nad 2 kHz, v 50 Hz systému odpovídá 40. harmonické) se provede sloučení frekvenčních složek v pásmu 200 Hz. Obr. 18 ukazuje mezipharmonické skupiny řádu 1,5 a výše v porovnání s limity (Tab. 6). Je zřejmé, že v rozsahu všech uvažovaných stavů je měničový napáječ připojitelný.



Obr. 18: Emise mezipharmonických složek proudu ve vybraných kvazi-ustálených stavech (rozptýl šedých úrovní) v porovnání s mezní hodnotou emisí dle [6] (červené úrovně) do 5 kHz.

Speciální důraz je kladen na vyhodnocení mezipharmonické skupiny řádu 0,5 (subharmonická skupina). Obr. 19 ukazuje vývoj proudů a napětí v subharmonickém pásmu při různých frekvencích TS (frekvence DS je po celou dobu konstantní, 50 Hz). V tomto případě provoz

TS s rozdílnou frekvencí (v rámci dovolených mezí daných [12]) nezpůsobí nadlimitní emise v oblasti subharmonických (tj. skupiny meziharmonických řádu 0,5). Je však nutné dodat, že emise subharmonických složek proudu způsobuje kolísání napětí, které může způsobit zvýšenou míru flikru.



Obr. 19 Emise subharmonických (skupiny meziharmonických řádu 0,5) složek proudu (nahore) a napětí (dole) v závislosti na frekvenci TS, porovnání s mezními hodnotami dle [6] (červené úrovně).

6.7 Komutační poklesy

Komutační poklesy jsou problémem zejména zařízení s přirozenou síťovou komutací. V případě měničového napáječe je komutace prvků aktivně řízena v rámci sinusové PWM a jejich vliv na komutační poklesy napětí v síti je prakticky zohledněn prostřednictvím harmonických v kap. 6.5.

6.8 Hromadné dálkové ovládání (HDO)

Při posouzení vlivu měničového napáječe na zařízení na signál HDO se vychází z podnikové normy [6]. Vzhledem k topologii a charakteru spínání měniče je doporučeno vlivy hodnotit pomocí simulace provozu na modelu, přestože norma připouští zjednodušené posouzení.

Hodnocení připojitelnosti se skládá ze dvou kroků (číselné označení informací v podkapitolách přísluší kroku hodnocení):

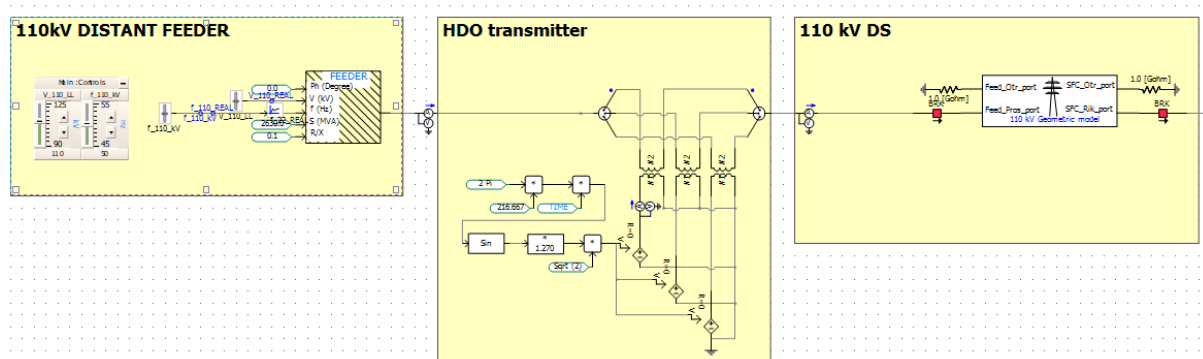
1. vyšetření rušivého napětí způsobeného měničovým napáječem v bezprostřední blízkosti kmitočtu HDO a
2. vyšetření zvýšení/snížení úrovně signálu HDO v místě připojení napáječe, porovnání stavu před a po připojením.

6.8.2 Minimální požadavky na model měniče

Detailní model (úroveň modelu 1).

6.8.3 Minimální požadavky na model sítě vvn

1. Detailní model (úroveň modelu 1).
2. Detailní model (úroveň modelu 1), k síťovému napáječi, který reálně představuje přípojnicí 400/110 kV je nutné přidat model vysílače: zdroj harmonického napětí s kmitočtem 216,7 Hz, napětí 2 % UL-G. (Obr. 20).



Obr. 20 Model vysílače HDO v simulačním SW PSCAD (sériová vazba).

6.8.4 Scénář

1. Model a scénář simulace je shodný s modelem a scénářem simulace pro studium harmonických (kap. 6.5).
2. Nejprve je nutné simulovat stav před připojením měničového napáječe, tzn. monitorování úrovně HDO v místě připojení měničového napáječe bez měničového napáječe. Dále se provede simulace s měničovým napáječem a se scénářem shodným v kap.6.5 (výkon měničového napáječe se mění dle Tab. 4), nicméně a s aktivním HDO vysílačem.

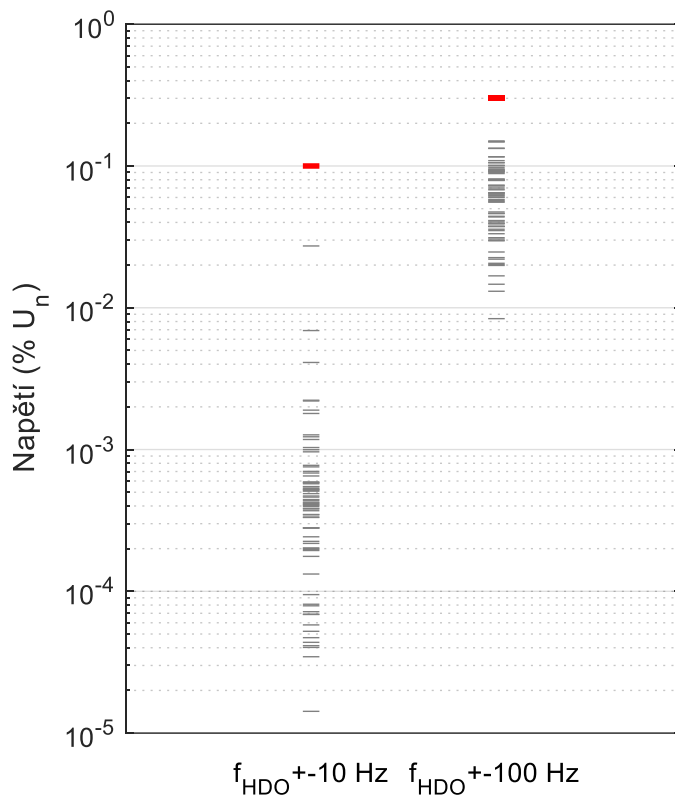
6.8.5 Vyhodnocení

1. Rušivé napětí na kmitočtu HDO a v jeho bezprostřední blízkosti (± 10 Hz), způsobené měničovým napáječem, nesmí v místě připojení překročit hodnotu 0,1 % U_n . V oblasti ± 100 Hz nesmí měničový napáječ způsobit rušivé napětí větší než 0,3 % U_n . Pokud je v dané oblasti rušení způsobeno zařízeními více zákazníků, musí být uvažováno s jejich sumačním účinkem. Pro posouzení je tedy nutné zmapovat oblast připojení a tato rušivá zařízení identifikovat.
2. Ve všech stavech nesmí dojít k poklesu signálu pod 2% původní hodnoty signálu HDO v místě připojení. Při rekuperaci měničového napáječe je k posouzení vlivu snížení signálu HDO přistoupeno jako k výrobnímu zařízení. Výrobní zařízení může způsobit snížení úrovně HDO maximálně o 5 % původní úrovně. Úroveň signálu HDO se hodnotí 1) v okolí ± 10 Hz frekvence HDO a b) v okolí ± 100 Hz.

Nutno podotknout, že použitím synchronizovaného 10ti periodového okna pro Fourierovu transformaci nelze získat přesně frekvenční složky v předepsaném okolí frekvence HDO, protože frekvence HDO je neceločíselným násobkem základní periody. Do skupin ± 10 Hz a ± 100 Hz je tedy nutné zahrnout nejbližší dostupné frekvenční složky. Například pro průběh se základní frekvencí 50 Hz vyhodnocený 10ti periodovým oknem lze získat frekvenční složky s rozlišením 5 Hz, při frekvenci HDO 216,66 Hz je rozmezí ± 10 Hz od 206,66 Hz do 226,66 Hz a do výpočtu se tak zahrnou složky 205 Hz, 210 Hz, 220 Hz a 230 Hz. Výsledná skupina je potom kvadratickým součtem těchto hodnot.

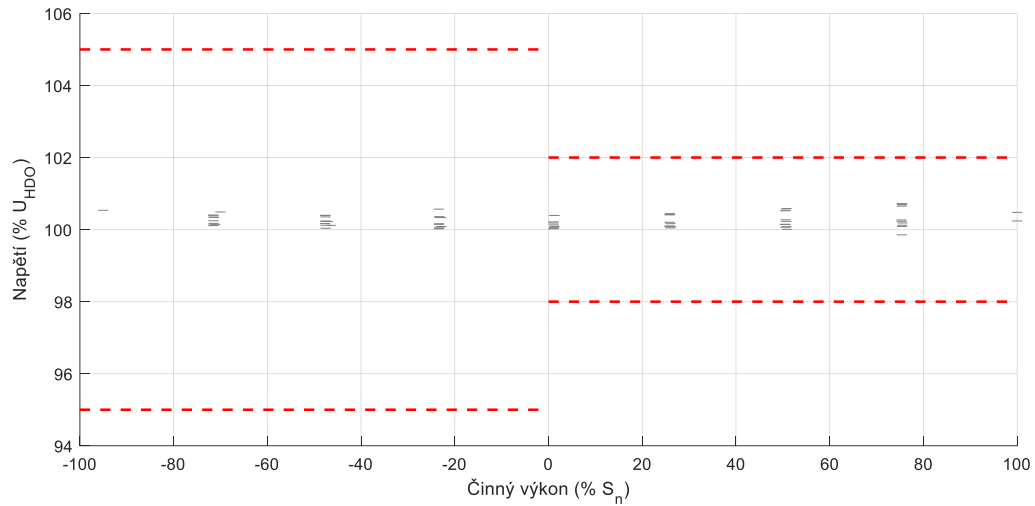
6.8.6 Příklad vyhodnocení

1. Příklad vyhodnocení rušení napětí způsobeném měničovým napáječem v okolí 1) ± 10 Hz a v okolí 2) ± 100 Hz frekvence HDO je na Obr. 21, který také vizualizuje porovnání s limity uvedenými v [6]. Je zřejmé, že měničový napáječ způsobuje rušení napětí pod limity a z tohoto hlediska je jeho připojení přípustné.

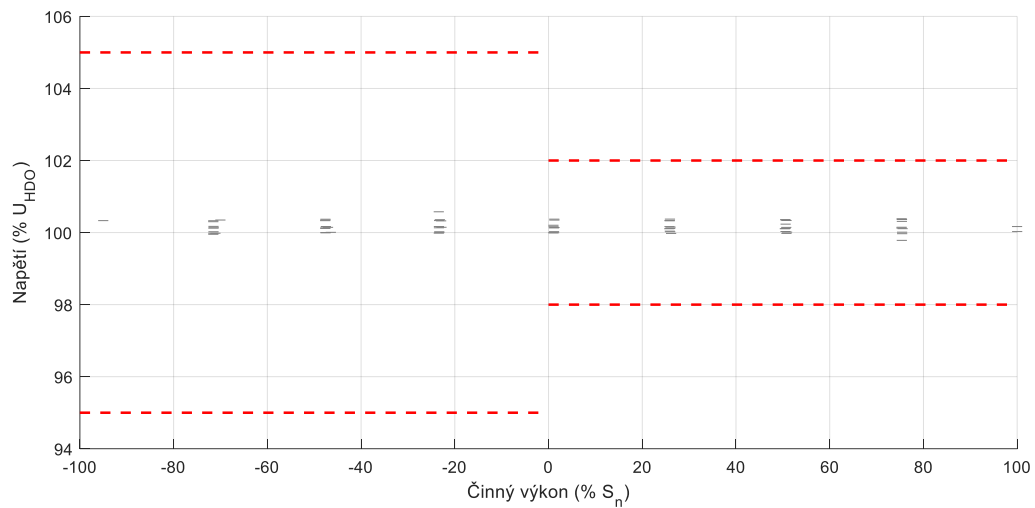


Obr. 21 Příspěvek měničového napáječe k rušení napětí v okolí frekvence HDO ve vybraných stavech (rozptyl šedých úrovní) a porovnání s mezními hodnotami (červené úrovně).

2. Ovlivnění úrovně signálu měničovým napáječem v místě připojení při vybraných provozních stavech ukazují Obr. 22 (okolí ± 10 Hz od frekvence HDO) a Obr. 23 (okolí ± 100 Hz od frekvence HDO). Je zřejmé, že změna úrovně napětí HDO v místě připojení měničového napáječe po jeho připojení a v uvažovaných provozních stavech v obou případech nepřekračuje dané limity a tudíž je připojení z tohoto hlediska přípustné.



Obr. 22 Změny úrovně signálu HDO v místě připojení od původní hodnoty (U_{HDO}) ve vybraných stavech (rozptyl šedých úrovní) v porovnání s limity (červené úrovně) pro okolí frekvence HDO ± 10 Hz



Obr. 23 Změny úrovně signálu HDO v místě připojení od původní hodnoty (U_{HDO}) ve vybraných stavech (rozptyl šedých úrovní) v porovnání s limity (červené úrovně) pro okolí frekvence HDO ± 100 Hz.

7 Další požadavky, povinná podpora sítě

Měničový napáječ je klasifikován jako odběrná jednotka, nevztahují se na ní požadavky na výrobní moduly. Měničový napáječ v principu dodávat energii do DS může při určitých provozních stavech, např.

- 1) při výkonu rekuperujících vozidel v TS větším, než je současný výkon všech odběrů, nebo
- 2) při záměrném přenosu výkonu přes trakční soustavu, pokud je úsek TS napájen z více stran.

Add 1) Dle rozložení výkonu v odběrovém diagramu trakční soustavy je zřejmé, že rekuperace energie je ve sledovaném období relativně krátkodobě trvající stav. Navíc, při rekuperaci vozidel není žádoucí regulovat rekuperační výkon ve velkém rozsahu. Proto není vhodné na měničový napáječ aplikovat požadavky stejné jako na výrobní moduly. Na druhou stranu, pokud se v budoucnu poměr rekuperace vůči odběru zvýší, je na rekuperující měničový napáječ doporučeno uplatnit povinnou podporu sítě, například adaptací pravidel pro výrobní elektrické energie a akumulčních zařízení [1].

Add 2) Záměrné využívání trakční soustavy pro přenos energie není v současné době v záměru provozovatele měničových napáječů. Pokud se však tento stav v budoucnu změní, je na měničový napáječ v režimu řízeného přenosu energie přes TS doporučeno uplatnit pravidla povinné podpory chování měničového napáječe, například adaptací pravidel pro výrobní elektrické energie, akumulčních zařízení [1].

Ze strany PPDS [24], PPS [20], DCC [3] – není definovaná povinná podpora. Pokud měnič poskytuje službu jalového výkonu, jedná se o čistě obchodní záležitost.

Existují však definované odolnosti, např. v sítích 110 a 220 kV podle Nařízení EU [3] a [1] a Kodexu PS [20] pro nová zařízení platí, že musí zůstat v provozu v rozsahu napětí 111,8 % až 115 % U_n s trváním nejvýše 60 minut.

8 Doplňující možnosti měničového napáječe, podpůrné služby

Měničový napáječ s DC meziobvodem disponuje vlastnostmi a funkcionalitami, které mohou být předmětem podpůrné služby. Tato kapitola se podrobněji zabývá metodickou specifikací nefrekvenční podpůrné služby (PpS-N), poskytováním jalového výkonu.

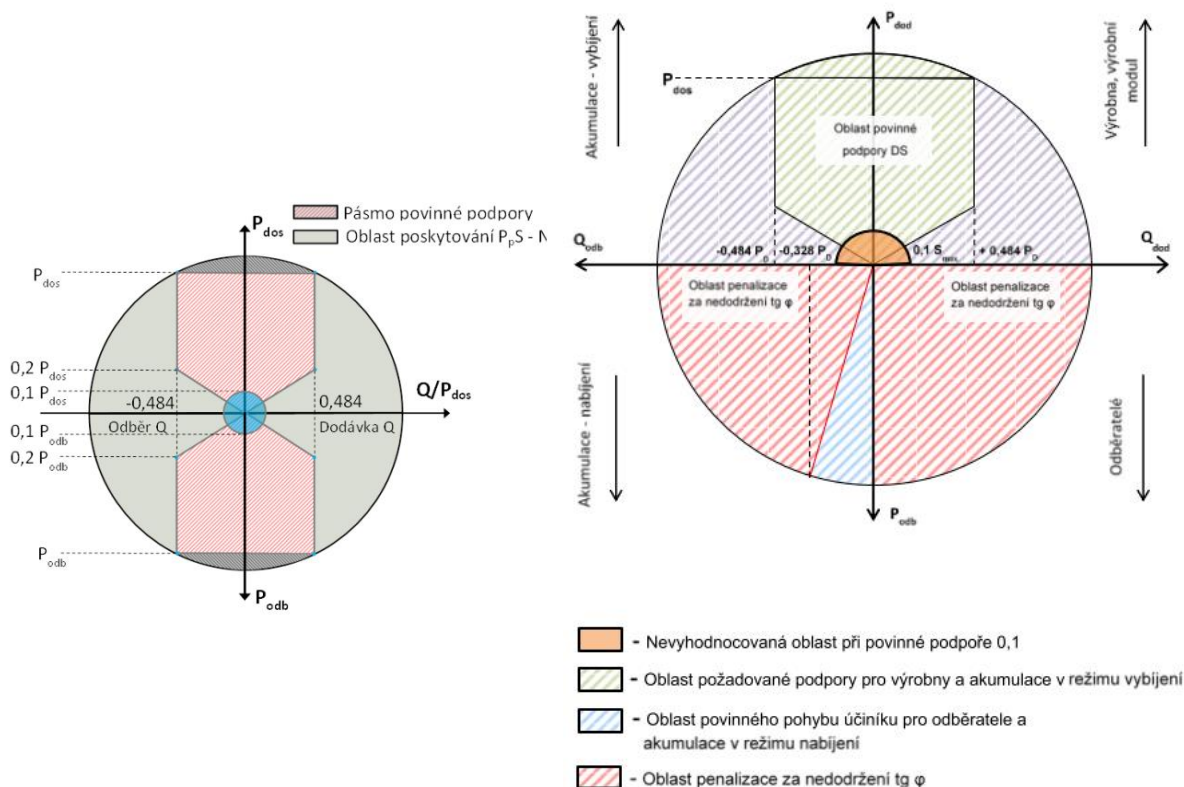
Ekonomickou výhodnost/nevýhodnost vybavení TNS střídači SFC z pohledu DS je v současné době obtížné určit, protože cenová pravidla pro regulaci nefrekvenční podpůrné služby neexistují. Oblasti použití aplikovatelné na provoz SFC (podpora sítě) specifikují DCC [3], RfG [1] a Pravidla provozování distribučních soustav, konkrétně Příloha 7 [24], která definuje požadavky na výrobní/výrobní moduly paralelně připojené k distribuční síti. Tyto podmínky mají charakter čistě technický s přenositelností na SFC a ekonomický benefit je otázkou smluvního ujednání mezi provozovatelem SFC a daným PDS, případně s provozovatelem PS (PPS), pokud by tento požadavek vzešel. V současné době můžeme tvrdit, že jednoznačným přínosem je plynulá regulace jalového výkonu s cílem snížit přenosové ztráty v DS a dále řídit profil napětí v síti, do které je SFC připojen. Nacacení takové služby by mělo zohledňovat amortizaci SFC při provozu v režimu napěťové regulace, doplněnou o cenu ztrát v SFC, které generování jalového výkonu prokazatelně vyvolává.

8.1 Služby jalového výkonu

Z nařízení pro připojení spotřeby DCC [3] plyne možnost zapojení nových odběrných jednotek do služeb jalového výkonu pro PDS a PPS. Nařízení DCC [3] dále uvádí, že zařízení nesmí dodat jalový výkon více než 48 % (účinník 0,9) rezervovaného příkonu/výkonu, pokud to není technicky, případně finančně výhodné na základě vypracované analýzy.

PPDS, Příloha 7 [24] navíc uvádí oblasti povinné podpory zdrojů a akumulčních zařízení v režimu vybíjení v PQ diagramu (Obr. 24 vlevo), tzn. že zdroje a akumulátory mohou pro poskytování služeb jalového výkonu využít i oblast nad rámec povinné podpory při aktivaci služby ze strany PDS. Na měničový napáječ poskytující služby jalového výkonu lze z technického hlediska aplikovat některé požadavky [24]. Měničový napáječ je však při standardním použití spotřebičů (primárně napájení TS), a proto se na něj například nevztahuje povinná podpora. Pro měničový napáječ poskytující služby jalového výkonu dále neplatí penalizace za nedodržení účinníku (Obr. 24 vpravo).

Technická a ekonomická kritéria a rozhodnutí o potřebě nefrekvenčních podpůrných služeb jsou plně v kompetenci PDS. Musí být prokázána ekonomická odůvodnitelnost, dispečerská říditelnost, a musí být prokázána dostupnost výkonu pro skutečné potřeby DS a musí být známá rychlost a rozsah odezvy na požadavky. Poskytování nefrekvenčních podpůrných služeb je založeno na tržních zásadách, tzn. není nárokové (není automatickou službou). Stanovení podmínek a rozsahu využití PpS-N je plně v kompetenci PDS. Technicky může být provedena různými způsoby: 1) autonomně, nastavením charakteristik $Q(U)$, 2) přímo požadavkem žádaného výkonu Q nebo 3) požadavkem na regulaci U jalovým výkonem Q na žádanou hodnotu U v definovaném uzlu DS.



Obr. 24 PQ diagram definující oblasti výroben a akumulátorů (vlevo) a navíc zátěží neposkytujících službu jalového výkonu (vpravo) [24].

8.2 Disponibilita jalového výkonu pro podpůrnou službu

Pro posouzení potřebnosti dle [24] je nutné stanovit reálnou dostupnost a rozsah jalového výkonu za určité období. Disponibilita jalového výkonu v případě měničového napáječe závisí především na zatížení činným výkonem a velikosti napětí v místě připojení měničového napáječe.

8.2.1 Minimální požadavek na model měniče

Nortonův/Theveninův model (úroveň 3).

8.2.2 Minimální požadavek na model vvn

Připojovací impedance (úroveň 3).

8.2.3 Scénář

Jalový výkon samotného měničového napáječe je po celou dobu simulace nastaven na konstantní (např. 0), činný výkon TS je v průběhu simulace variován dle předpokládaného profilu zatížení trakční soustavy, napětí a frekvence síťového napáječe jsou jmenovité (110 kV, 50 Hz).

8.2.4 Vyhodnocení

Výsledkem simulace je činný příkon ($P(k)$) a jalový výkon ($Q(k)$) v místě připojení měničového napáječe (znaménka dle spotřebičové konvence). Disponibilní jalový výkon (Q_{disp}) lze (při zanedbání zvýšení napětí v důsledku jalového výkonu měničového napáječe) přibližně určit v každém simulačním kroku k jako:

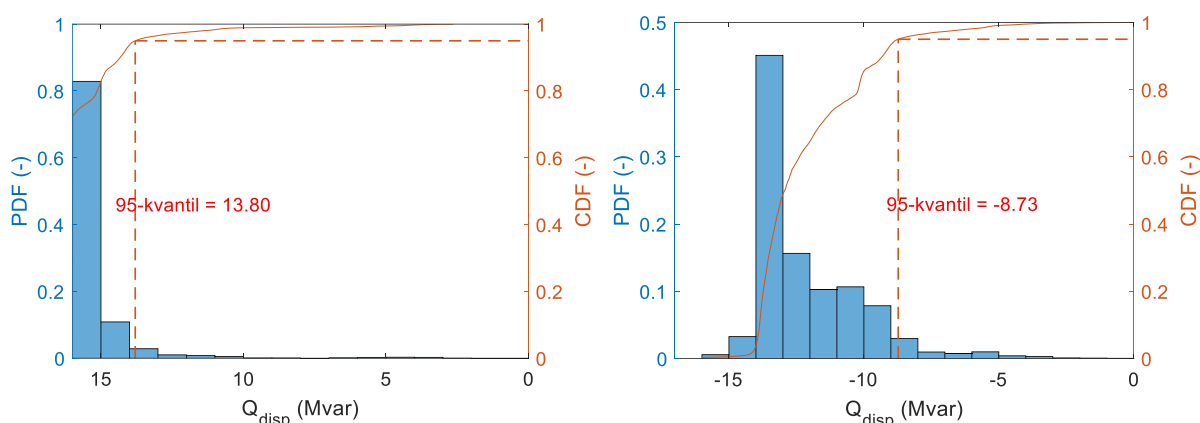
$$Q_{disp}(k) = \pm \sqrt{S_n^2 - P(k)^2} + Q(k) \quad (18)$$

S_n – je nominální zdánlivý výkon měničového napáječe

$P(k)$ – je činný příkon napáječe v simulačním kroku k

$Q(k)$ – je jalový výkon pasivních prvků měničového napáječe (transformátory, pasivní filtry) připojených mimo regulační smyčku jalového výkonu.

Příklad disponibilního jalového výkonu, který bude k dispozici 95 % času provozu měničového napáječe je zobrazen na Obr. 25. Z výsledků plyne, že měnič je schopen dosáhnout většího induktivního jalového výkonu ($+Q_{disp}$), což je způsobeno spotřebou induktivního jalového výkonu transformátoru (v tomto příkladu mimo regulační smyčku měniče).



Obr. 25 Vyhodnocení pravděpodobnosti disponibility induktivního (vlevo) a kapacitního (vpravo) jalového výkonu při konstantním napětí 110 kV. PDF – Probability Density Function (hustota rozdělení pravděpodobnosti), CDF – Cumulative Distribution Function (kumulovaná pravděpodobnost)

Pro detailnější určení disponibility jalového výkonu je nutné znát vývoj velikosti napětí v místě připojení vlivem provozu soustavy ($U_{L-L}(k)$, sdružené napětí). Pro limitní jalové výkony v simulačním kroku k platí:

$$Q_{disp}(k) = \pm \sqrt{\left(\frac{S_n}{U_{n,L-L}}\right)^2 - \left(\frac{P(k)}{U_{L-L}(k)}\right)^2} \cdot U_{L-L}(k) + Q(k) \quad (19)$$

$U_{n,L-L}$ – je nominální napětí měničového napáječe.

Pro zohlednění

- vlivu změny napětí v místě připojení v důsledku vlastní jalového výkonu měničového napáječe a
- vlivu spotřeby jalového výkonu pasivními prvky uvnitř regulační smyčky,

je nutné hledat maximální disponibilní výkon v každém stavu měniče. Takto detailní posouzení však není předmětem této metodiky.

8.3 Ztrátový výkon při poskytování služeb jalového výkonu

Pro ekonomické hodnocení provozu měničového napáječe může být vhodné odlišit používání zařízení pro účely napájení TS a pro účely služeb do DS. Vzhledem k topologii měničového napáječe je ztrátový výkon při poskytování jalového výkonu DS způsoben v 3AC/DC stupni měniče, včetně vybavení na AC straně, až po kapacitory v DC meziobvodu. Proto se nabízí

kvantifikovat využití pro služby jalového výkonu právě pomocí ztrátového výkonu v této části měniče.

8.3.1 Minimální požadavek na model měniče

Detailní model (úroveň 1).

8.3.2 Minimální požadavek na model vvn

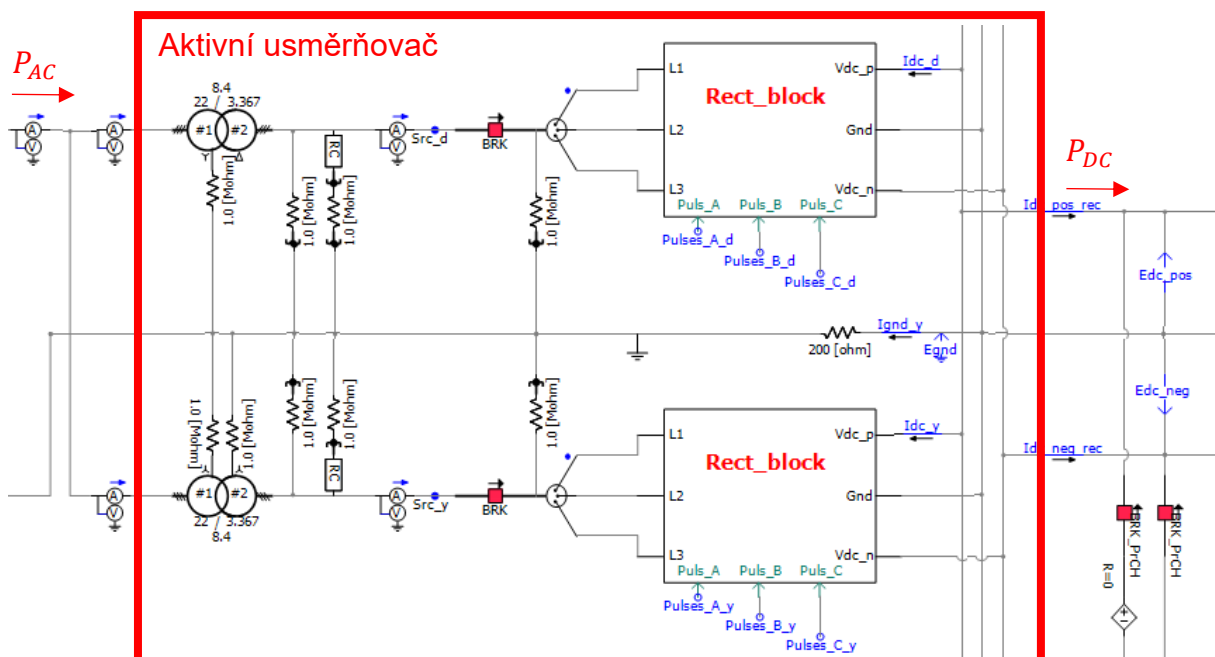
Zkratová impedance (úroveň 3).

8.3.3 Scénář

Činný jalový výkon TS se mění dle Tab. 4 v kap.6.5, napětí napáječe DS je konstantní.

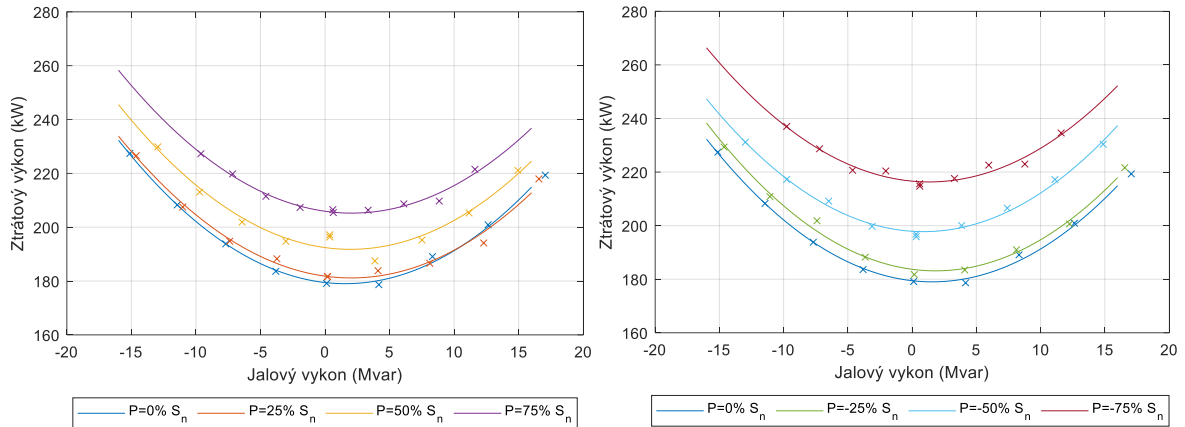
8.3.4 Vyhodnocení

Monitoruje se ztrátový činný výkon 3AC/DC stupně měniče včetně AC zařízení, které je nedílnou součástí. Předmětný ztrátový činný výkon (ΔP) se v každém kroku vypočítá jako absolutní hodnota rozdílu činného výkonu na vstupu (AC síť, P_{AC}) a výstupu (DC meziobvod, P_{DC}) usměřovače (Obr. 26).



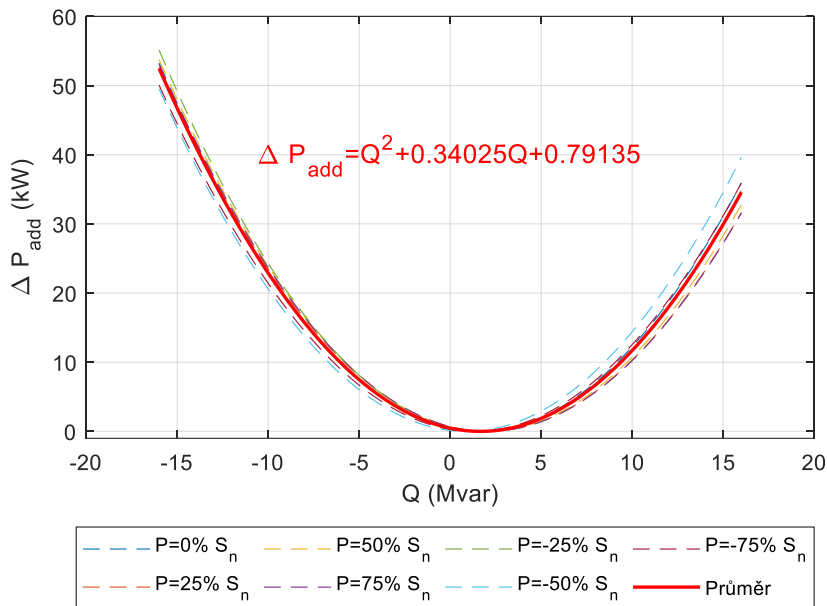
Obr. 26 Model aktivního usměřovače (část měničového napáječe).

Výsledkem jsou závislosti ztrátového výkonu aktivního usměřovače na jalovém výkonu (Q), a to při různém zatížení činným výkonem (Obr. 27). Diskrétní body představují jednotlivé stavy měniče a jsou proloženy kvadratickou funkcí (např. v SW MATLAB – funkce polyfit).



Obr. 27 Ztrátový výkon 3AC/DC stupně v závislosti na jalovém výkonu, parametrem je činný výkon odběru (vlevo) a dodávky (vpravo).

Minimální ztrátový výkon pro každou úroveň zatížení činným výkonem odpovídá situaci, kdy měničový napáječ negeneruje žádný jalový výkon. Ponížením křivky ztrátového výkonu právě o tuto hodnotu se přímo získají křivky příspěvku ke ztrátovému výkonu (ΔP_{add}) pro každé zatížení činným výkonem (Obr. 28). Z jednotlivých křivek je možné určit průměrnou křivku příspěvku ke ztrátovému výkonu a pomocí koeficientů kvadratické funkce lze analyticky určit jaký přídatný ztrátový výkon způsobí zatížení daným jalovým výkonem.



Obr. 28 Příspěvek ke ztrátovému výkonu usměřovače v závislosti na jalovém výkonu, parametrem je činný výkon, spotřebičová konvence.

Křivka příspěvku ke ztrátovému výkonu je poplatná nejen technologii měničového napáječe, ale také uspořádání dalších pasivních prvků v místě připojení a místu měření regulační smyčky jalového výkonu. Například vychýlení kvadratické funkce je způsobené odběrem jalového výkonu pasivních komponent mimo regulační smyčku jalového výkonu.

Integraci příspěvků ke ztrátovému výkonu v čase provozu lze vypočítat energii, která vyjadřuje ztráty způsobené generováním jalového výkonu, a která může sloužit pro ekonomické výpočty provozu měničového napáječe či nacenění služeb jalového výkonu.

9 Závěr

Metodika se zabývá hodnocením měničových napáječů pro napájení trakčních soustav (TS) z hlediska požadavků na jejich připojení k distribuční soustavě (DS). Předkládá metodický postup, jak aplikovat požadavky jednotlivých relevantních nařízení, kodexů a norem pro správnou integraci těchto (v oblasti trakčního napájení) nových zařízení do DS.

Metodika identifikuje technické požadavky a specifikuje konkrétní číselné limity související s návrhem libovolné trakční napájecí stanice (TNS) lokalizované v rámci ČR, včetně evaluace dalších funkcionalit poskytujících lokální podporu elektrizační soustavě či umožňujících ekonomický benefit z provozu měničových napáječů.

Metodika vychází z funkčního a praktického řešení SFC výkonových měničů použitých na úrovni konkrétního pilotního projektu provedení trakční napájecí stanice a je opřena o realizované dynamické modely SFC a simulace jejich provozu.

9.1 Novost předložené metodiky

Metodika předkládá nový způsob posuzování připojitelnosti měničových napáječů s DC meziobvodem. Na rozdíl od stávajících metod, které jsou založeny zejména na analýze specifického ustáleného stavu a které hodnotí připojitelnost v omezeném rozsahu kritérií, je prezentován postup hodnocení, který zohledňuje dynamické chování v čase odběru reakční soustavy na základě realistického předpokladu provozu a pomocí dynamických simulací v časové oblasti. Kritéria hodnocení z hlediska elektromagnetické kompatibility jsou převzata z podnikové normy energetiky PNE 333430-0, kde součástí hodnocení je i výpočet jednotlivých mezních hodnot, které přímo souvisí s místem připojení k distribuční síti, včetně ovlivnění konkrétní topologií měničového napáječe. Celé posouzení je demonstrováno na praktických příkladech. Součástí metodiky je i popis a kategorizace různých přístupů k modelování a to ve 3 úrovních, přičemž je popsána a na praktických příkladech demonstrována vhodnost jednotlivých přístupů v závislosti na konkrétním posuzovaném kritériu. Vedle posouzení připojitelnosti je popsán a analyzován potenciál měničového napáječe pro služby jalového výkonu, a to v souvislosti s odpovídajícími nařízeními EU a národní implementací v Pravidlech provozu distribučních soustav. Navržena je metodika pro stanovení reálné dostupnosti zařízení pro tyto služby bez omezení provozu trakční soustavy, jejíž napájení je primárním úkolem měniče. Nakonec je s využitím simulace navržena metodika pro stanovení využití napáječe pro službu poskytování jalového výkonu a předkládá tak vhodný vstup pro ekonomickou analýzu provozu.

Podobná ucelená pravidla vycházející z aktuálně platných norem, kodexů a relevantních nařízení není v současné době k dispozici.

9.2 Popis uplatnění metodiky

Metodika je určena pro provozovatele železnic, provozovatele distribučních soustav či provozovatele přenosové soustavy, projektanty či dodavatele technologií řešící připojení trakčních napájecích stanic s využitím měničových napáječů do distribuční soustavy.

Primární uplatnění metodiky se předpokládá u provozovatele železnic (Správa železnic, s.p.), který má povinnost spravovat železniční dopravní cesty, včetně zajištění napájení pro provozovatele elektricky hnaných vozidel (EHV). V ČR se předpokládá využití měničových napáječů na mezinárodních tratích, zajišťující interoperabilitu dopravy v rámci EU nebo pro napájení plánovaných nových úseků VRT, ve kterých vzniká požadavek na efektivní nakládání s energií, zejména při rekuperaci EHV (s nominálním příkonem až 20 MW).

Dále provozovatelé přenosových, distribučních soustav využijí metodický přístup pro integraci nových zařízení na bázi velkých frekvenčních měničů připojených k DS nebo PS nejen prvotně s využitím pro trakční napájení, ale obecně pro zařízení uživatele sítě, které vychází z koncepce měniče s DC meziobvodem.

Obecně lze konstatovat, že podobná pravidla s využitím příkladů výpočtu a vyhodnocením ocení také sféra projektantů a dodavatelů zařízení. Vzhledem k tomu, že většina pravidel vychází z nařízení Komise EU, případně přeneseně z pravidel D-A-CH-CZ, lze výsledky aplikovat i ve středoevropském prostoru, což představuje právě pro projektanty vítaný přínos.

9.3 Ekonomické aspekty metodiky

Ekonomické aspekty v podobě reálného peněžního příjmu z provozu měničových AC/AC napáječů TS jsou problematicky vyčíslitelné, protože obecná cenová pravidla pro regulaci nefrekvenční podpory sítí neexistují. Z pohledu investičních nákladů představuje instalace měničových napáječů vyšší finanční výdaj v porovnání s instalací klasické technologie s trakčními transformátory, avšak přináší jednoznačné benefity (kap. 4.2 a 4.5), které mohou být z hlediska proveditelnosti ve vazbě na požadavky (kap. 4.4) rozhodující.

Oblasti použití aplikovatelných na provoz SFC (podpora sítí) specifikují Pravidla provozování distribučních soustav, konkrétně Příloha 7 [24], která definuje požadavky na výrobní/výrobní moduly paralelně připojených k distribuční síti. Tyto podmínky mají charakter čistě technický a ekonomický benefit je otázkou smluvního ujednání mezi provozovatelem SFC a danou distribuční společností, případně s provozovatelem přenosové soustavy, pokud by tento požadavek vzešel. V současné době můžeme tvrdit, že jednoznačným přínosem je plynulá regulace jalového výkonu s cílem snížit přenosové ztráty v DS a dále řídit napětí v místě připojení SFC (viz kapitolu 8.1).

Nacenění takové služby doporučujeme realizovat na základě té části ztrát v SFC, které generování jalového výkonu prokazatelně vyvolává. Dále je třeba zohlednit skutečnost, že SFC oproti jednofázovým transformátorům nezatěžuje DS nesymetricky, eliminuje harmonické zkreslení proudu a umožňuje nepoužívání FKZ (filtračně kompenzačních zařízení), které mají ztráty wattového charakteru. Ekonomický přínos ale musí vycházet z realizované ceny za SFC a jeho amortizaci při provozu v režimu napěťové regulace, a dále finanční náhrady ztrát při provozu měniče (viz kapitola 8.3).

Ekonomické a monetizované přínosy metodiky lze potom spatřovat v několika rovinách:

- a) v rámci snížení nákladů na případné technické komplikace při řešení připojení měničových napáječů k DS nebo PS;
- b) při zadávání výběrových řízení na měničové napáječe, v jejichž zadávacích podmínkách může být požadavek na respektování předmětné metodiky, což může vést k nezanedbatelné úspoře nákladů na další studie připojitelnosti;
- c) při evaluaci provozních stavů napáječe, kdy je poptávána funkce kompenzace jalového výkonu nebo udržování napětí v síti provozovatelem DS nebo PS, viz kapitola 8.1. Pokud se provozovatel napáječe smluvně dohodne s provozovatelem DS, či PS, poté lze očekávat finanční plnění z poskytování podpurných služeb.

10 Příloha A – teoretický podklad pro vytvoření modelů komponent sítě 110 kV pro modelování v časové doméně

10.1 Venkovní a kabelová vedení

Modelování vedení je koordinováno v souladu se zásadami v [2]. V následujícím jsou popsány detaily tří přístupů k modelování vedení, 1) model s distribuovanými parametry 2) model se soustředěnými parametry a 3) model ve frekvenční oblasti. Model s distribuovanými (alternativně soustředěnými) parametry je doporučen jako základní volba, nicméně pro studie vlivů na napětí zapříčiněných ne příliš strmými změnami s časovou konstantou srovnatelnou s násobky základní periody (~20 ms), tzn. nerozeznávajícími rezonanční frekvence, lze použít model ve frekvenční oblasti.

Fyzické parametry vedení, které mají vliv na polohu rezonančních bodů ve frekvenční oblasti, a které je doporučeno zohlednit, jsou následující:

- délka vedení,
- průřez vodiče (u kabelů vodivého jádra),
- u kabelů tloušťka izolace,
- souběh s jinými vedeními,
- geometrické uspořádání vodičů na podpěrných bodech (u kabelů uložení),
- úseky transpozice. u kabelů navíc úseky uzemňování stínění).

Podle pravidel PPDS, Příloha 7 [24], která se zabývá ekonomickými vlivy a přínosy nových zařízení uživatelů sítě, je nutné se soustředit na:

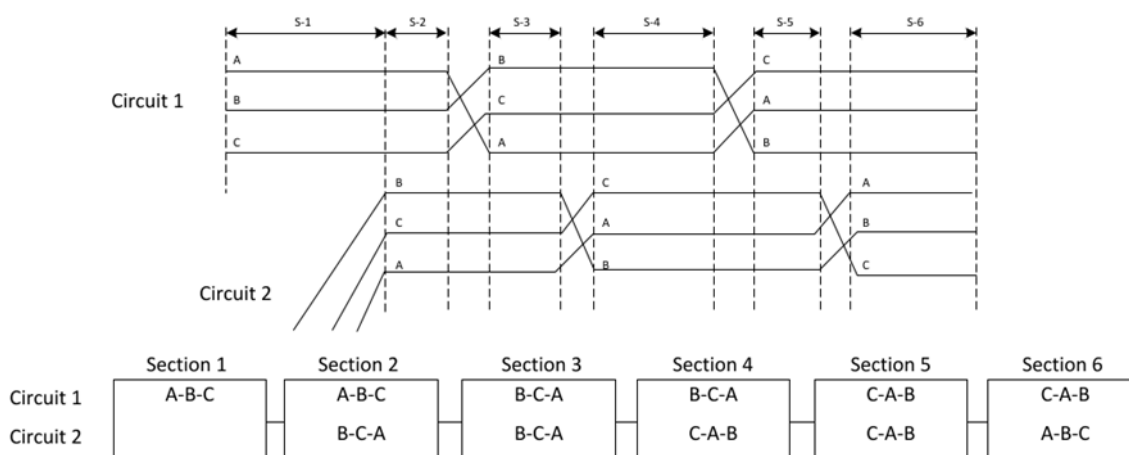
- možný rozptyl napětí na straně nadřazené soustavy, tj. PS i 110 kV;
- zkratový výkon na straně nadřazené soustavy, tj. PS i 110 kV;
- elektrické parametry příslušného napájecího transformátoru(ů) (PS nebo DS), včetně nastavení hladinového regulátoru transformátoru;
- elektrické parametry jednotlivých úseků vedení charakterizujících analyzovanou oblast;
- instalované výkony výroben/výrobních modulů připojených v dané napájecí oblasti 110 kV i vn, včetně dostupných regulačních nástrojů a jejich nastavení;
- plán odstávek výrobních zařízení, vč. jejich délek, technická omezení provozu výrobních zařízení;
- instalované/rezervované výkony/příkony připojených zařízení, včetně popisu jejich dynamického chování;
- naměřené hodnoty U , P , Q na napájecí transformaci, na napájených vývodech a na dalších měřených bodech v dané oblasti 110 kV, resp. vn, měření budou, po dohodě zadavatele se zpracovatelem, poskytnuta pro následující stavy v pracovních i mimopracovních dnech:
 - minimum zatížení – 24hodinový průběh v intervalu 1 minuta ve dni minima zatížení DS;
 - maximum zatížení – 24hodinový průběh v intervalu 1 minuta ve dni maxima zatížení DS;
 - minimum výroby – 24hodinový průběh v intervalu 1 minuta ve dni minima výroby;

- maximum výroby – 24hodinový průběh v intervalu 1 minuta ve dni maxima výroby;
- minimum bilance P – 24hodinový průběh v intervalu 1 minuta ve dni minima bilance P ;
- minimum bilance Q – 24hodinový průběh v intervalu 1 minuta ve dni minima bilance Q ;
- maximum bilance P – 24hodinový průběh v intervalu 1 minuta ve dni maxima bilance P ;
- maximum bilance Q – 24hodinový průběh v intervalu 1 minuta ve dni maxima bilance Q ;
- kritéria aplikovaného algoritmu řízení napětí dané části DS;
- požadavek PDS na parametry PpS-N (dostupnost, časové parametry apod.);
- definovaný rozsah a stavy DS.

10.1.1 Model s distribuovanými parametry

Pokud jsou k dispozici detailní parametry geometrie a délky vedení včetně úseků transpozice, je doporučeno uvažovat model vedení s distribuovanými parametry, které nejlépe popisuje šíření rušení v distribučním systému. Pro výpočet charakteristických parametrů (indukčnost, kapacita, odpor) je doporučeno využít simulačních programů, které tyto parametry vypočítají přímo z geometrického zadání, a to včetně vzájemných impedancí mezi fázemi, fázemi a zemí, a uvažováním skin efektu. Pro uvažování transpozice vedení a vazby mezi souběžnými vedeními je nutné vedení rozdělit na kaskádu úseků, ve kterých je uspořádání vodičů stejné [2].

Z modelu plyne, že ve frekvenční závislosti impedance není příliš kvalitativní rozdíl mezi cestami napájení z jedné rozvodny (rozdíl na 1h ano, ale rezonanční body jsou +- ve stejné úrovni), ale spíše je rozdíl pokud se mění zatíženost sítě ostatními odběry (zatížená vs. nezatížená síť). Z toho plyne uvažovat maxima a minima, nicméně více nepříznivý stav je u méně zatíženého vedení z důvodu menšího tlumení. Proto je doporučeno uvažovat např. 5-kvantil zatížení (celkem 3 hodnoty, které se budou analyzovat). Zatížení je doporučeno modelovat v jednotlivých uzlech a dále obecné zatížení na hlavní přípojnici.



Obr. 29 Homogenní úsek vedení reprezentován jednotlivými sekcemi [2]

Rezistivita půdy je uvažována konstantní vzhledem k faktu, že je to parametr velmi závislý na okolních podmínkách, a navíc často nedostupný (vlhkost, okolní stavby apod.). Navíc, rezistivita půdy definuje cestu proudu zejména při asymetrických simulacích, což není standardní provoz měničového napáječe typu SFC.

10.1.2 Model se soustředěnými parametry

Soustředěné parametry lze aplikovat do modelů dvojbranů, které svou topologií emulují frekvenční závislost a vedení zjednodušují na pasivní RLC obvod s konstantními koeficienty. Standardně tedy není uvažována frekvenční závislost odporu, který má významný vliv na impedanci na rezonančních frekvencích. Nejprve je nutné, např. z geometrických parametrů nebo na základě měření, vypočítat soustředěné parametry vedení (měrný odpor, kapacita, indukčnost na kilometr). Některé simulační programy umožňují soustředěné parametry vypočítat z geometrického modelu.

Vzhledem k uvažování zapojování napáječů typu SFC primárně do napěťové hladiny vn a vvn, je pro model se soustředěnými parametry doporučeno používat jeden "π" článek pro vedení vn a krátká vedení vvn, pro dlouhá vedení vvn se doporučuje použít kaskáda několika "π" článků [6]. Dle [2] je použití jednoho dvojbranu vhodné do vedení délek 240/h (km), kde h je řád nejvyšší uvažované harmonické. Pro hodnocení harmonických složek do 10 kHz (h = 200) je tedy použití jednoho dvojbranu vhodné pro krátká vedení do 1,2 km. Dále, model se soustředěnými parametry relativně přesně reprezentuje frekvenci přibližně do prvního rezonančního bodu. Pro analýzu frekvenčních závislostí nad tento bod je nutné použít buďto kaskádní zapojení více dvojbranů, nebo model s distribuovanými parametry. Vedení mohou být nahrazena kaskádou dvojbranů pro analýzu nad frekvenci prvního rezonančního bodu. Pro většinu praktických případů je dostatečné použití kaskády 3 dvojbranů.

Dále lze použít symetrický nebo nesymetrický model vedení, symetrický ale předpokládá stejné parametry vedení včetně vzájemných impedancí v každé fázi. Je nutné upozornit, že použití symetrických modelů u netransponovaného nebo jinak nesymetrického vedení vede k nezanedbatelným odchylkám simulace a skutečnosti. Model vedení musí být kompatibilní s úrovní modelování ostatních komponent.

V rámci parametrů vedení lze dále zohlednit frekvenční závislost jejich parametrů. Frekvenční závislost indukčnosti a kapacity není významná, zatímco vliv skin efektu na odpor významný je. Aproximovaný vliv skin efektu je dle [2] vyjádřen jako:

$$R_f = R_{DC} \cdot [0.035 \cdot M^2 + 0.938] \text{ pro } M < 2.4 \quad (20)$$

$$R_f = R_{DC} \cdot [0.35 \cdot M + 0.3] \text{ pro } M \geq 2.4 \quad (21)$$

$$M = 0.05012 \cdot \sqrt{\frac{f \cdot \mu_r}{R_{DC}}} \quad (22)$$

R_{DC} – je odpor při stejnosměrném proudu,

f – je frekvence (frekvenční složka) procházejícího proudu vodičem,

μ_r – je relativní permeabilita materiálu vodiče.

Faktory, které ovlivňují frekvenční závislost odporu kabelu (skin efekt, efekt blízkosti – proximity effect), mají tendenci zvyšovat sériový odpor, což má pozitivní vliv na tlumení rezonančních špiček. Použitím takové metody modelování (nebo simulačního software), která tyto faktory neuvažuje, dojde k zanedbání tlumicího odporu, a to povede ke konzervativním výsledkům simulace, např. pro potřeby studie zpětných vlivů. V případě simulací pro jiné účely je nicméně nutné individuálně posoudit, jaký vliv může mít zanedbání na závěry konkrétní studie (např. návrh nápravného opatření, nebo studie nastavení odezvy řízení aktivních filtrů).

10.1.3 Frekvenční charakteristika sítě

Na základě předchozích modelů lze frekvenčním skenem získat závislost impedance vedení (impedanční křivka) ve frekvenční oblasti (typicky do 5 kHz), která je v místě připojení měniče.

Tato závislost, tj. vektor impedancí pro každou frekvenční složku, je potom využitelná pro úroveň 3 modelování měniče a na první pohled ukazuje polohu rezonančních bodů.

Při neznalosti parametrů sítě lze frekvenční závislost impedance také určit pomocí empirických vztahů vycházejících ze zkušenosti v reálných sítích. Lze využít např. metodu zohlednění prvního rezonančního bodu [6], která vychází ze zkratového výkonu, určení frekvence podélné a příčné impedance a tlumivého odporu v bodě připojení. Metoda výpočtu je poměrně rozsáhlá a je detailně popsána v [6].

Dále pro supraharmonické pásmo (rozmezí 2-9 kHz) lze např. použít empirický vztah dle [20]:

$$Z_b = k_b \cdot Z_{ref,b} \cdot \left(r + (1 - r) \cdot \frac{S_{k,ref}}{S_k} \right) \quad (23)$$

$$Z_{ref,b} = 10,25\Omega - \frac{(9kHz - f_b)}{kHz} \cdot \Omega \quad (24)$$

k_b – činitel rezonance supraharmonických se středovou frekvencí f_b

Z_b – aproximovaná impedance supraharmonických se středovou frekvencí f_b

$Z_{ref,b}$ – referenční impedance supraharmonických se středovou frekvencí f_b

r – činitel zohlednění vlivu zkratového výkonu

$S_{k,ref}$ – referenční zkratový výkon (odpovídá 570 kVA)

S_k – zkratový výkon v místě posuzování

Význam a způsob určení jednotlivých koeficientů je dále podrobně popsán v [20].

10.2 Transformátory

Magnetický obvod reprezentovaný příčnou indukčností a odporem může být zanedbán, pokud není transformátor dlouhodobě v saturaci vlivem zvýšeného napětí (dle konkrétního typu transformátoru, typická mez je $>1,15 U_n$).

Přepínač odboček mění v principu podélnou impedanci a pokud v uvažované síti může dojít ke změně odbočky vlivem simulovaných stavů sítě, je nutné přepínání odboček zohlednit. Přepínání odboček může být buď manuální, tzn. před simulací je nutné posoudit, zda vlivem změn stavů v simulaci dojde k přepnutí, nebo automatické, tzn. je vhodné funkci automatického přepínače nasimulovat (zejména při studii vlivu zařízení na napětí v síti).

Parazitní kapacita – do cca 5 kHz nemá zásadní dopad na impedanci [2].

Topologie transformátorů musí být zohledněna. Například v kontextu studie šíření harmonických, transformátory typu Yy0d11 způsobují vlivem posunu napětí sekundárních vinutí o 30° (na systémové frekvenci) eliminaci $(6(2n-1))\pm 1$ násobku harmonických proudů (tzn. eliminují dvojice 5,7; 11,13; 17,19; atd.). Dále, způsob zapojení a uzemnění vinutí je nutné zohlednit, protože ovlivňuje šíření harmonických a nesymetrii. Například vinutí zapojené do trojúhelníku přirozeně eliminují harmonické přispívající do netočivé složky, tj. $3(2n-1)$ násobky harmonických proudů (tj. 3,9,15, atd.).

Ztráty transformátoru se dělí na ztráty nakrátko (způsobeno sériovým odporem) a ztráty naprázdno (vlivem příčného odporu). Ztráty je nutné korektně rozlišit, protože následně sériový odpor určený výhradně ze ztrát nakrátko má zásadní vliv na tlumení vyšších harmonických. U transformátorů, které jsou součástí napáječe to může být navíc součástí návrhu opatření pro omezení emise harmonických – návrhu vstupních filtrů. Je doporučeno, aby model transformátoru zohledňoval všechny výše uvedené aspekty.

V případě omezených informací o frekvenční závislosti parametrů transformátoru lze např. dle [2] použít empirický model (Obr. 30), kde podélný odpor (R_s) je doporučeno uvažovat frekvenčně závislý dle (25) a to zejména kvůli vlivu na tlumení vyšších harmonických. Podélnou (rozptylovou) indukčnost (L) lze uvažovat na frekvenci lineárně závislou (do cca 5 kHz), nebo lze použít empirický vzorec popisující frekvenční závislost (26).

$$R_s(h) = R_{f_n} \left(1 + A_R \left(\frac{f}{f_n} - 1 \right)^{B_R} \right) \quad (25)$$

$$L = L_{f_n} A_L \left(\frac{f}{f_n} \right)^{B_L} \quad (26)$$

R_{f_n} – je sériový odpor (odpor nakrátko) při nominální frekvenci,

L_{f_n} – je sériová (rozptylová) indukčnost,

f_n – nominální frekvence a

koefficienty A_R , B_R , A_L , B_L nabývají hodnot v rozmezí dle Tab. 7.

Tab. 7 Hodnoty koeficientů A_R , B_R , A_L , B_L .

Příklad transformátoru	A_R	B_R	A_L	B_L
20/0,4 kV, 250 kVA	0,2	1,5	1	-0,03
108/10,5 kV, 40 MVA	0,2	1,4	1	-0,02
220/110 kV, 200 MVA	0,2	1,6	1	≈ 0



Obr. 30 Model výkonového transformátoru dle [2]

Pokud je k dispozici naměřená závislost impedance na frekvenci (frekvenční sken, tovární přijímací zkouška), lze koeficienty obecného modelu transformátoru modifikovat tak, aby odezva ve frekvenční oblasti odpovídala. Obecný model tak lze takto fitovat do frekvence cca 5 kHz.

10.3 Zátěže

Je doporučeno zahrnout všechna významná zařízení připojená do ostatních odběrných míst.

Detailní informace o každém zařízení však obvykle nejsou k dispozici a bylo by časově náročné je získat. Proto je možné skupiny běžných zařízení nahradit (agregovanými) modely, které nejvíce odpovídají kategorii:

- Statické zátěže;
- Rotační zátěže (synchronní i asynchronní);
- Kombinace statických a rotačních zátěží;
- Velké množství asynchronních strojů;
- Nelineární zátěže (zátěže s výkonovou elektronikou).

Mimo modely samotných zařízení, uvedených v následujících podkapitolách, je silně doporučeno do modelů zahrnout jejich výzbroj obsahující pasivní L a C prvky (typicky

transformátory, filtry nebo kompenzační zařízení atd.). Výzbroj může velmi významně ovlivňovat frekvenční závislost impedance sítě (např. vstupní filtry vnáší do obvodu další RLC členy).

Úroveň detailu modelování ostatních zátěží je doporučeno udržovat vyšší, čím je zátěž elektricky blíže posuzovanému místu.

10.3.1 RL statické a rotační zátěže

Pro zátěže, které mají rezistivně-indukční charakter, je dostatečně reprezentující sériová nebo paralelní RL zátěž. Je vhodné nicméně rozlišovat statické zátěže, např. velké odporové zátěže nebo soubor menších blíže neidentifikovatelných zátěží nahraditelných pouze R zátěží, a rotační zátěže, tj. především velké asynchronní motory nahrazované RL zátěží. Motory je možné uvažovat v nominálním stavu, tzn. neuvažuje se studie rozběhů. Na druhou stranu je u velkých strojů doporučeno uvažovat další výzbroj, např. motor s transformátorem, je doporučen nahradit dvěma paralelně zapojenými sériovými RL zátěžemi. Konkrétní parametrizace RL prvků je detailně uvedena v [2], spolu s dalšími (komplexnějšími) náhradními schémata, např. zohledňujícími skin-efekt. Obecně platí, že při kombinovaném zatížení statickými i rotačními zátěžemi lze použít RL zátěž, kde část R reprezentuje statické a L rotační zátěže. [2] dále uvádí speciální empirické vzorce pro stanovení parametrů náhradního schématu velkých souborů asynchronních strojů.

10.3.2 Model sítí vn

Zátěže na nižších napěťových hladinách ovlivňují frekvenční závislost nadřazené sítě. Nižší napěťová úroveň tedy musí být modelována včetně transformátoru vvn/vn a model musí respektovat převažující druh spotřebičů, podobně jako v případě nadřazené hladiny. Pokud jsou v nižší hladině zapojena zařízení s významným jednotkovým instalovaným výkonem (ve vn řádově jednotky MVA), je doporučeno toto zařízení modelovat detailněji. Obecné zatížení vn lze modelovat pomocí obecné sériové R-L zátěže.

10.3.3 Sezónní skladba zátěží

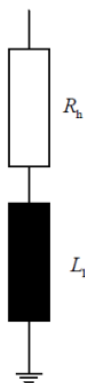
Je doporučeno rozlišit skladbu zařízení v ročních obdobích (zima vs. léto), změna ročního období může zapříčinit specifickou skladbu zátěží.

10.3.4 Řídící vrstva zátěží

V [2] jsou podrobně popsány modely řídicí struktury některých zátěží (a zdrojů) a vyplývá z nich, které parametry jednotlivých komponent je nutné znát a implementovat do modelu. Zohlednění řídicí struktury je v simulacích užitečné zohlednit u významných zátěží v malé elektrické vzdálenosti od analyzovaného místa připojení, zejména pokud jde o řízení pro velmi specifický speciální účel nebo proces.

10.4 Synchronní generátory

Synchronní generátory je možné nahradit zjednodušeným modelem Obr. 31, kde všechny parametry jsou odvozené od počáteční rázové reaktance X''_d při nominální frekvenci. R_h je frekvenčně závislý odpor, f_{nom} nominální frekvence a h je řád harmonické. Tento zjednodušený model je vhodný do 3 kHz, tzn. přibližně do oblasti první rezonanční frekvence sítě.



Obr. 31 Model synchronního generátoru [2]

10.5 Zařízení se vstupním měničem

Zařízení se vstupním měničem se obecně rozumí zátěže s výkonovými měniči, a to jak s pasivním (usměrňovač) tak i aktivně řízeným. Typicky se může jednat o:

- výrobní zařízení se střídači nebo pohony s frekvenčními měniči,
- bateriová úložiště,
- nabíječky elektrických vozidel,
- elektrolyzéry,
- trakční soustavy – zátěže v AC trakční síti napájené 1f transformátorem, měničové napáječe AC sítí, pasivní usměrňovače DC trakčních sítí,
- průmyslové zátěže, speciální řízení průmyslových procesů,
- frekvenční měniče pro řízení pohonů,
- výkonové měniče pro řízení sítí a kompenzaci (např. SVC, STATCOM),
- měniče vysokonapěťových DC vedení (HVDC).

Detaily modelování jsou v rámci kategorií zařízení uvedeny v kap. 4 dokumentu [2].

10.6 Paralelní a sériové kompenzátory a filtry

Kompenzátory a filtry jsou 1) jako nápravná opatření součástí instalací nebo zařízení pro spotřebu a výrobu elektrické energie, které samy o sobě neplní požadované emisní limity rušení, 2) funkční součástí výkonových měničů a 3) jako prvky pro koordinaci napětí připojené do regulačních uzlů sítí (vvn, zvn). V kontextu topologie a způsobu modelování se jedná o:

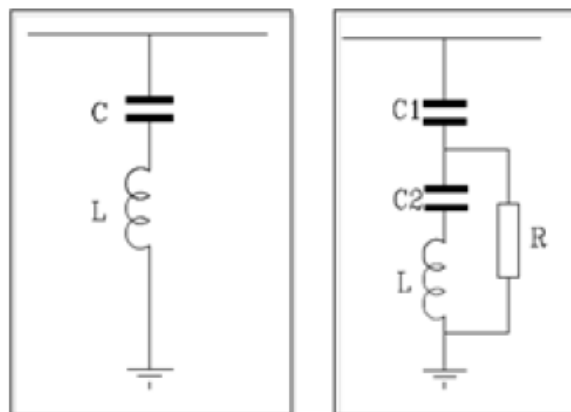
- paralelní kondenzátory a reaktory,
- sériové kondenzátory a reaktory a
- pasivní filtry harmonických.

Frekvenční závislost jednotlivých parametrů komponent kompenzátorů a filtrů může být zanedbána [2], nicméně pro zohlednění frekvenční závislosti odporu zejména sériových reaktorů, a tím pádem zohlednění vyššího tlumení vyšších harmonických, je doporučeno postupovat podobně jako v případě transformátorů.

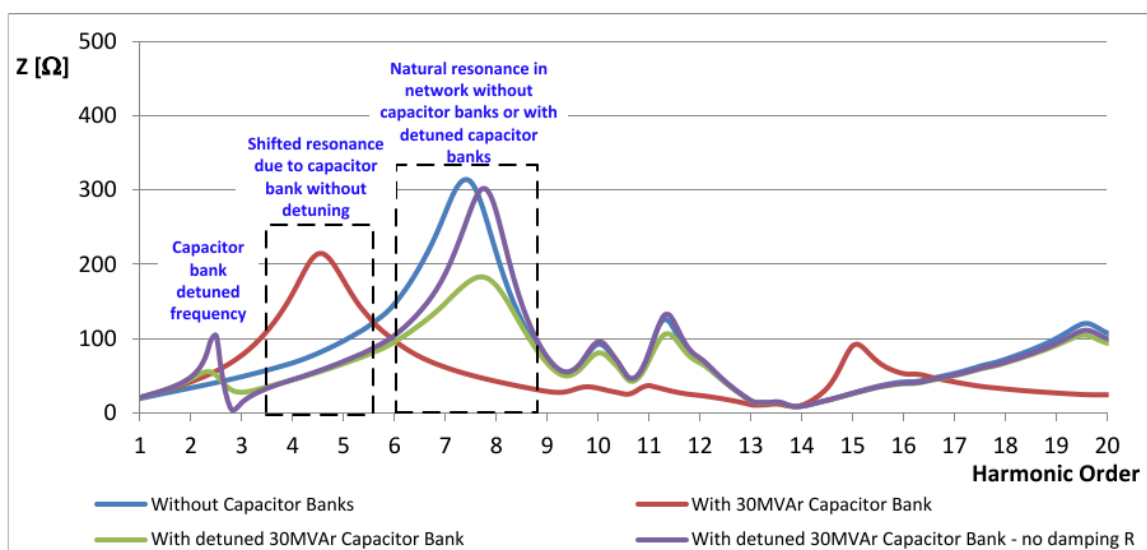
10.6.1 Paralelní kondenzátory a reaktory

Paralelní kondenzátory lze modelovat jako kondenzátor se soustředěnými parametry. Pro potlačení rezonance na nízkých frekvencích však může být přidán malý sériový reaktor pro

rozladění, případně tlumicí odpor (viz Obr. 32). Kondenzátor se tak de-facto stává filtrem, a to je silně doporučeno zohlednit, neboť hlavní rezonanční bod je vlivem přídavných komponent zásadně posunutý (viz Obr. 33). Paralelní reaktory, obvykle využívány pro řízení napětí v uzlech sítě nebo pro účely ochrany při jednopólovém zkratu, mohou být nahrazeny soustředěnými parametry, přičemž parazitní kapacity vinutí mohou být zanedbány.



Obr. 32: Paralelní kondenzátor s rozladovacím obvodem [2].



Obr. 33 Efekt připojení shuntovacího kondenzátoru v distribuční síti [2].

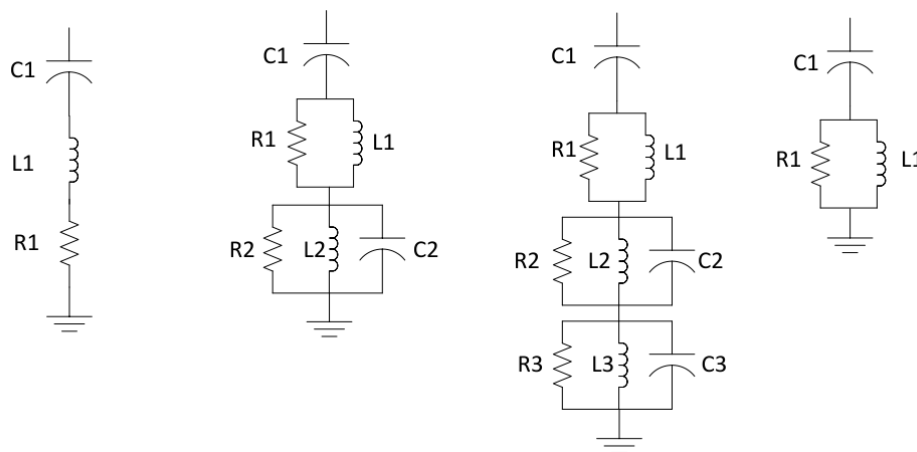
10.6.2 Sériové kondenzátory a reaktory,

Sériový kondenzátor lze modelovat jako kondenzátor se soustředěnými parametry. Pokud jsou známy výrobní tolerance a teplotní závislost kapacity, je nutné je vzít v úvahu. Ztráty kondenzátoru mohou být modelovány odporem zapojeným do série s kondenzátorem. Doplnkové vybavení sériových kondenzátorů (svodiče přepětí, jiskřiště, bypass obvod, tlumicí rezistor atd.) nemusí být uvažovány, nicméně bypassové obvody bývají naladěny s rezonanční frekvencí mezi 10. až 20. harmonickou. Pokud se tyto kondenzátory nachází v blízkosti zařízení s významnou emisí v této oblasti, doporučuje se toto doplnkové vybavení uvažovat.

Sériový reaktor, pokud se jedná o vzduchovou cívku bez feromagnetického jádra, lze modelovat podobným způsobem jako paralelní cívky.

10.6.3 Pasivní filtry harmonických

Pasivní filtry jsou RLC rezonanční obvody v soustavě, které jsou specificky naladěné pro tlumení vyšších harmonických a meziharmonických složek. Zpravidla se instalují přímo k zařízení, které nesplňuje limity emisí vyšších harmonických. Filtry mohou být zároveň kompenzačními zařízeními (Obr. 34 vlevo). Další příklad typických topologií filtrů je na Obr. 34 vpravo.



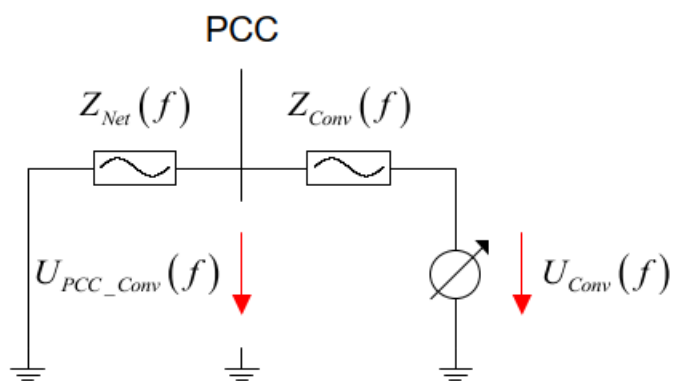
Obr. 34 Typická konfigurace filtrů v DS [2]

10.7 Model vzdáleného ekvivalentního napáječe

Ekvivalentní napáječ emuluje vzdálenou síť, určuje frekvenci sítě a je doporučeno ho umístit na sběrnice nadřazené soustavy (pokud existuje), případně do elektricky vzdálených rozvodů. Ekvivalentní napáječ udává frekvenci celé simulované sítě.

10.8 Ekvivalentní model distribuční sítě v místě připojení

Náhradní frekvenčně závislou impedancí s impedanční křivkou lze dále soustavu zjednodušit pro určité fáze studie, kde je upřednostněna rychlost simulace (odpovídá úrovni 2 úrovní simulace sítě 110 kV), např. prvotní studie vlivu harmonických na síť v ustálených stavech (Obr. 35). Náhradní impedanci $Z_{net}(f)$ lze získat zjednodušením impedančního schématu sestaveného z impedancí jednotlivých prvků. V simulačních programech může existovat možnost provést frekvenční sken určité části modelu, což je velmi efektivní způsob získání frekvenční charakteristiky určité části modelu. Je vhodné znovu zdůraznit, že takto získaná impedanční křivka věrně reflektuje a reprezentuje pouze pasivní chování všech uvažovaných zařízení v jednom ustáleném stavu, tj. vedení, transformátory, kompenzátory, ostatní nelineární zátěže včetně filtrů, samostatné filtry atd. a realisticky ukazuje polohu rezonančních bodů. Na druhou stranu, vliv aktivního řízení v prvcích není v celkové frekvenční charakteristice zohledněn. Při uvažování významných zátěží a výroben nelze tuto náhradu provést.

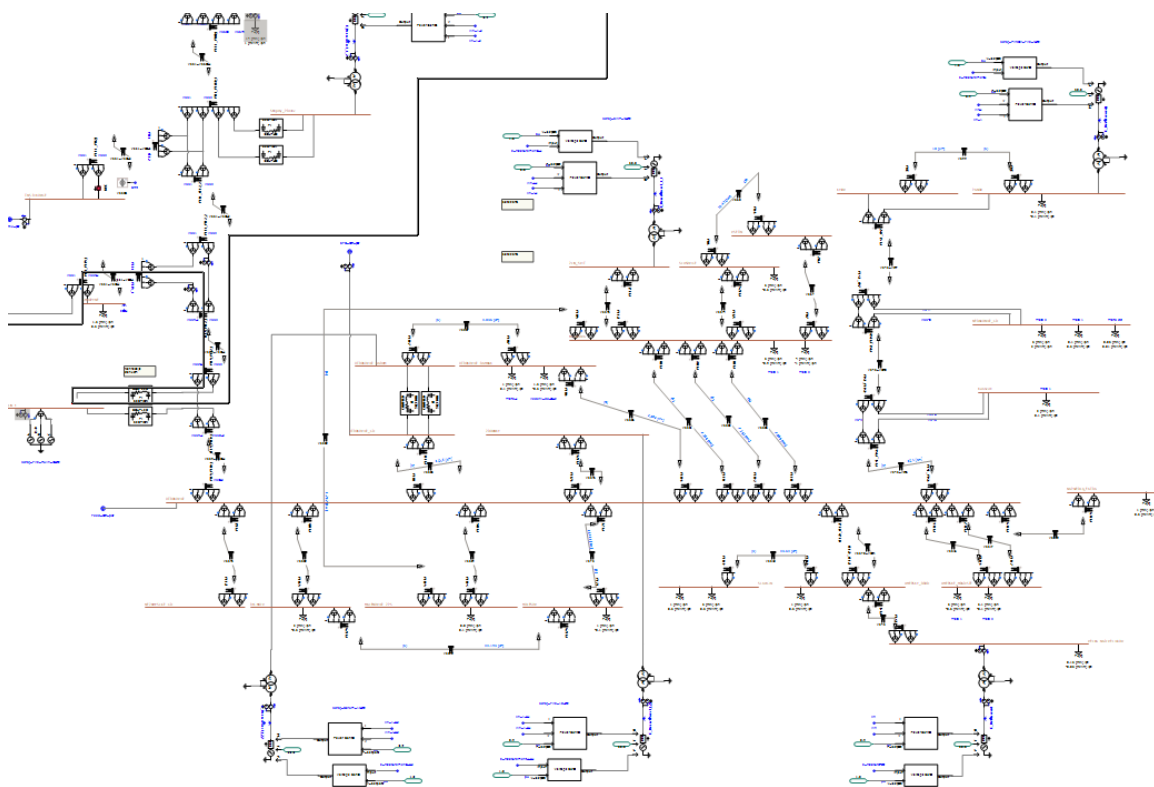


Obr. 35 Harmonický příspěvek měniče [2]

11 Příloha B – výchozí situace modelu při tvorbě metodiky

11.1 Model sítě vvn

Zkoumaná oblast zahrnuje vedení a významné zdroje v okolí trakčního napáječe. Model distribuční sítě vvn (110 kV) je vytvořen z dat poskytnutých společnostmi ČEZ distribuce a.s. a EG.D a.s. Jedná se o síť, jejíž vedení jsou modelována na základě geometrického zadání. To znamená, že model reflektuje skutečné vodiče (lana), skutečnou geometrii podpěrných bodů a v důsledku frekvenční závislost všech parametrů. Tento přístup je vhodný pro analýzu ustálených stavů, dynamických dějů a případně i přechodných jevů. Na Obr. 36 je schematicky znázorněna část sítě v okolí napáječe včetně výroby elektrické energie a zátěží zapojených do vvn.

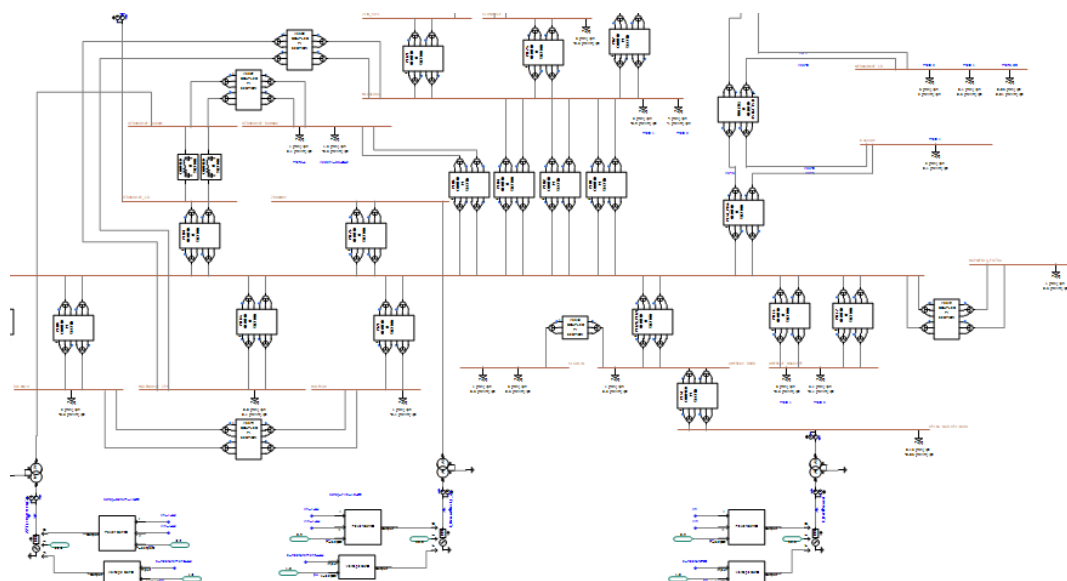


Obr. 36 Model části sítě 110 kV v okolí trakčního napáječe, geometrické zadání modelů vedení.

11.1.1 Parametry vedení

Typ lan, která se standardně vyskytují na vedení jsou kombinací nových typů s nižší vztažnou rezistancí a starších typů s vyšší vztažnou rezistancí, které jsou ale s ohledem na životnost vedení stále používána. Obecně lze uvažovat, že se jedná převážně o lana uvedená v Tab. 8. Jedná se o výčet parametrů, které je nutné pro sestavení modelu znát.

V případě uvažování vedení s náhradními parametry (soustředěnými parametry), lze vedení modelovat pomocí „II článků“. Schéma modelu s náhradou vedení dvojbrany je na Obr. 37.



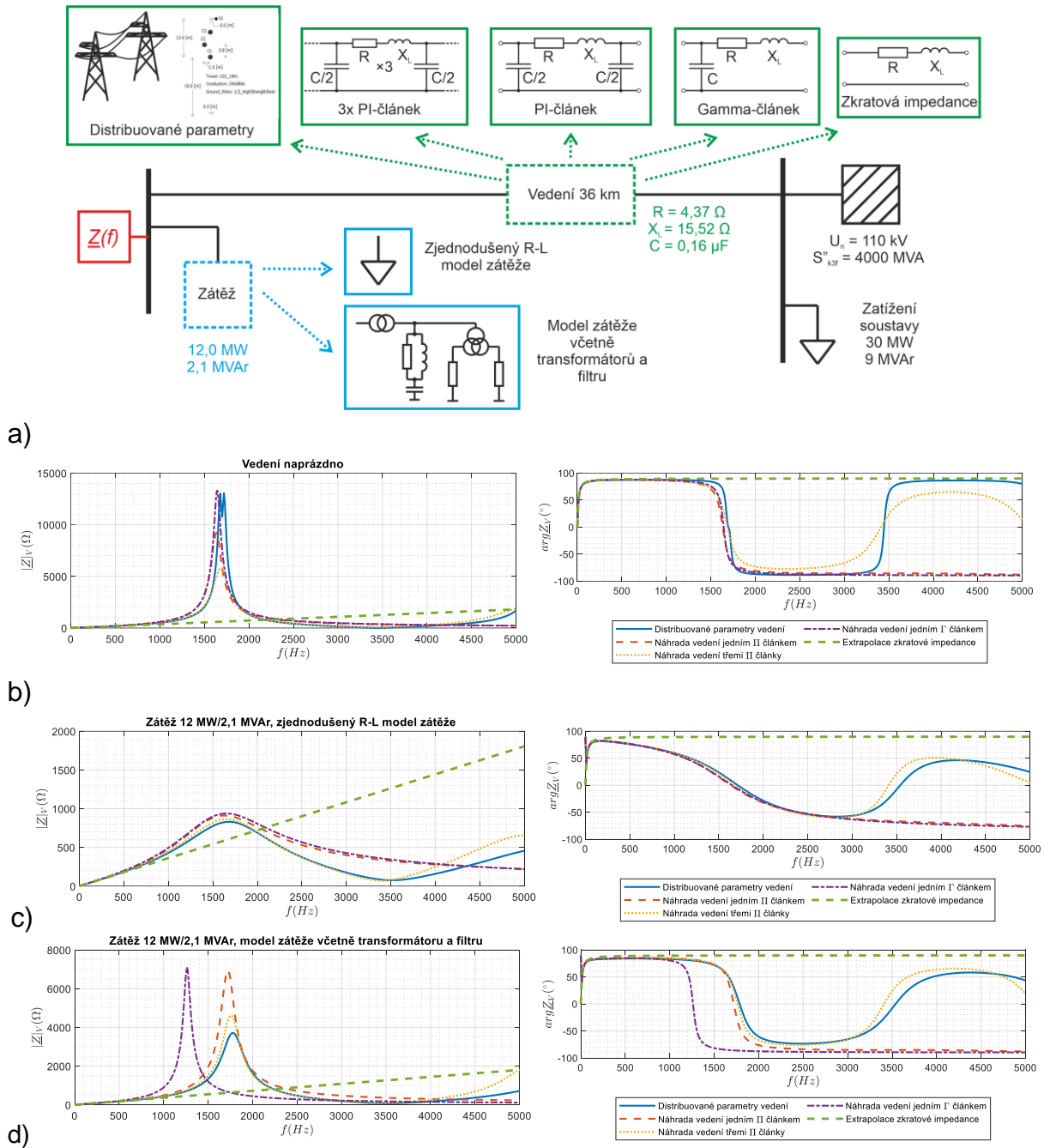
Obr. 37 Model sítě vytvořené „π“ články pomocí soustředných parametrů.

Tab. 8 Parametry nejčastěji používaných lan

Typ lana	Vnější průměr (m)	Celkový počet vláken (-)	Celkový počet vnějších vláken (-)	Průměr vlákna (m)	DC rezistance ($\Omega \cdot \text{km}^{-1}$)
434-AL1/56-ST1A	0.0144	61	24	0.00160	0.066
240-Alfe6	0.010675	33	16	0.001675	0.125
212-AL1/49-ST1A	0.009123	37	16	0.0015	0.1363
243-AL1/39-ST1A	0.009483	33	16	0.001725	0.1188
185-AL1/43-ST6c	0.010	37	14	1.40E-03	0.1565
185-AL4/43-ST6C	0.010	37	14	1.40E-03	0.1805
243-AL3	0.0101	61	15	0.001125	0.1373
185-Alfe6	0.0096	33	16	0.0015	0.1593
183-AL1/43-ST1A	0.0095	33	16	0.0015	0.1571
182-AL3	0.00875	37	12	0.00125	0.1827

Podle normy PNE [6] lze toto zjednodušení provést. „*Frekvenčně závislá impedance sítě se často extrapoluje jako přímka s přihlédnutím ke zkratové impedanci (impedanční přímka). Aby bylo možné při výpočtu mezních hodnot emisí také zohlednit rezonance, zavádí se rezonanční činitel k , který znázorňuje odchylku skutečného průběhu frekvenčně závislé impedance sítě od extrapolované impedanční přímky.*“

Na Obr. 38 je ukázáno srovnání vlivu venkovního vedení 110 kV o délce 36 km (což je řádově délka shodná s délkou vedení napájející TNS, tzn. do 50 km), ve třech možnostech přístupu: 1) dvojbran s podélnou impedancí, 2) náhrada „I“ článkem, 3) náhrada jediným „II“ článkem, 4) náhrada kaskádou třech „II“ článků a 5) modelování pomocí distribuovaných parametrů (geometrické zadání) reprezentující vlnové vlastnosti vedení.



Obr. 38 Vliv kvality a detailu modelu vedení pro určení frekvenční závislosti síťové impedance ve společném napájecím bodě V na hladině 110 kV; a) schéma modelu sítě se zátěží, b), c) a d) vliv zátěže a jejího detailu, kdy parametrem (legenda) je kvalita modelu (vedení) sítě [6]

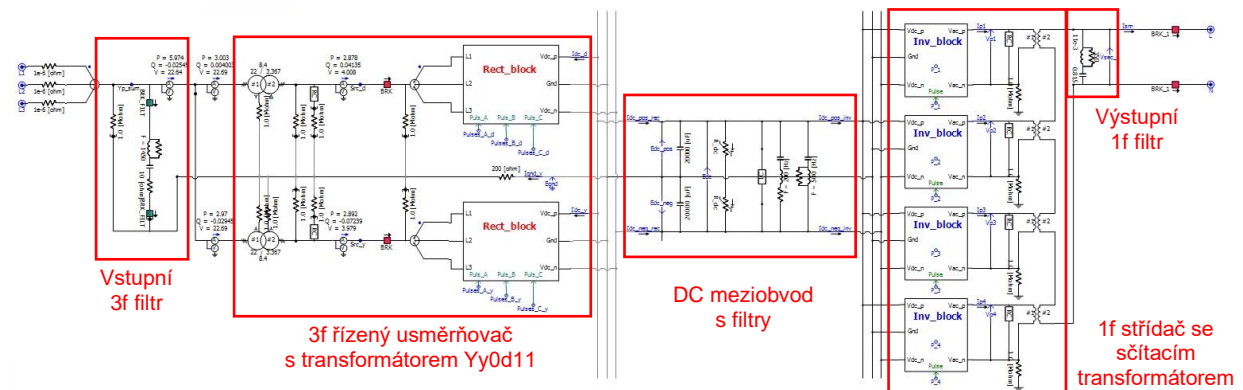
11.2 Model měniče SFC

V této části je popsán model konkrétního měniče typu SFC, který byl odvozen od reálného zařízení dle dostupných informací. Vzhledem k omezené znalosti všech konstrukčních detailů a detailu architektury řízení včetně nastavení, což podléhá obchodnímu tajemství výrobce, je model sestaven tak, aby vykazoval vnější vlastnosti typické pro danou topologii. Tyto vlastnosti byly validovány porovnáním reálných průběhů (měřené na reálném zařízení) a průběhů ze simulace. Výsledkem je model, který je svým chováním velmi podobný reálnému zařízení, nicméně může vykazovat odlišnou odezvu při specifických událostech, a to zejména při poruchových stavech nebo při přechodných dějích doprovázených oscilacemi. Pro účely metodiky slouží tento model především jako metodická pomůcka a příklad, jakého detailu

modelování je nutné pro jednotlivé druhy simulací dosáhnout. Metodika předpokládá, že model bude zpracovávat buď přímo výrobce nebo třetí strana znalá všech detailů návrhu.

11.2.1 Topologie

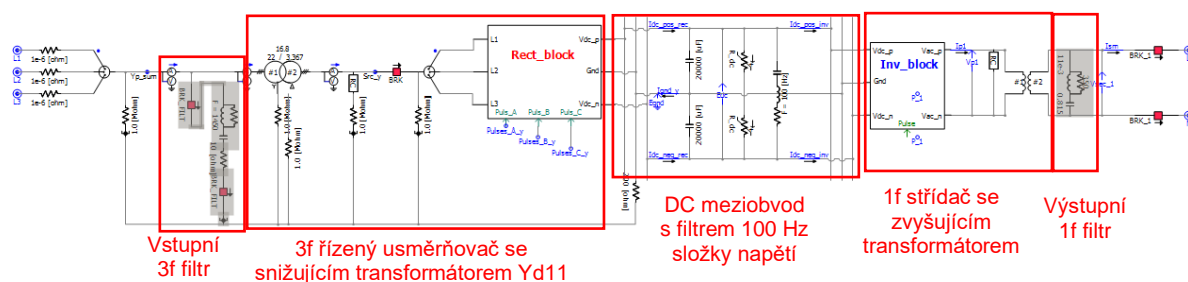
Topologie měniče pro úroveň modelování 1 je znázorněna na Obr. 39, který ukazuje kompletní (detailní) model SFC v simulačním programu PSCAD. Z hlediska topologie se jedná (zleva) o vstupní filtr, trojvlnuťový transformátor se dvěma 3f řízenými usměrňovači typu „3-level Neutral-Point-Clamping“ (3-level NPC), tříúrovňový stejnosměrný meziobvod s filtry potlačující jak harmonické z provozu tak přirozené 100 Hz zvlnění, výstupní 1f střídač s pětivlnuťovým sčítacím transformátorem a výstupní 1f filtr. Detailní model na Obr. 39 svým uspořádáním vychází z reálného komerčního měniče a umožňuje tak demonstrovat jeho realistickou odezvu na 3f i 1f straně. Model je tedy vhodný pro studium emise frekvenčních složek proudu (harmonických a meziharmonických proudu), dynamicky v různých provozních stavech, posouzení zpětných vlivů na DS, analýzu ztrát v jednotlivých částech měniče apod. Nevýhoda detailního modelování je však komplexita, v jejíž důsledku jsou simulace hardwarově i časově poměrně náročné.



Obr. 39 Detailní model v simulačním programu PSCAD, topologie měničového napáječe, úroveň modelování 1.

Pro některé simulace je však možné topologii SFC (Obr. 39) zjednodušit na úroveň modelování 2 (Obr. 40). Zjednodušení vychází z obecného uspořádání měniče napětí a frekvence se stejnosměrným meziobvodem a de facto se jedná o zjednodušení topologie aktivních front-endů. Zjednodušení vede na podstatně rychlejší simulace se zachováním dynamické odezvy měniče danou nastavením řídicích smyček a také je umožněno sestavení modelu bez relativně detailní znalosti všech komponent měniče a s využitím obecných komponent z knihovny simulačního programu. Dále, pro zachování rychlosti odezvy je spínací frekvence upravena tak, aby odpovídala výsledné spínací frekvenci, která je v detailním modelu výsledkem prokládaného spínání. Pro 3f usměrňovač je to v tomto případě 25. harmonická (1250 Hz při 50 Hz) a pro 1f střídač je to 48. harmonická (2400 Hz při 50 Hz). Nutno však podotknout, že zjednodušený model není vhodný pro studium emise harmonických a meziharmonických, protože změnou topologie je změněno charakteristické spektrum vyšších harmonických měniče. Hlavní předností zůstává možnost simulace dynamické odezvy měniče s menšími nároky na výpočetní výkon nebo s kratším simulačním časem. Tento model je vhodný například pro studii příspěvku SFC k úrovni flikru v DS vlivem změn zatížení a jalového výkonu, a to na delším časového intervalu (např. profil odběru trakční soustavy v rádech hodin).

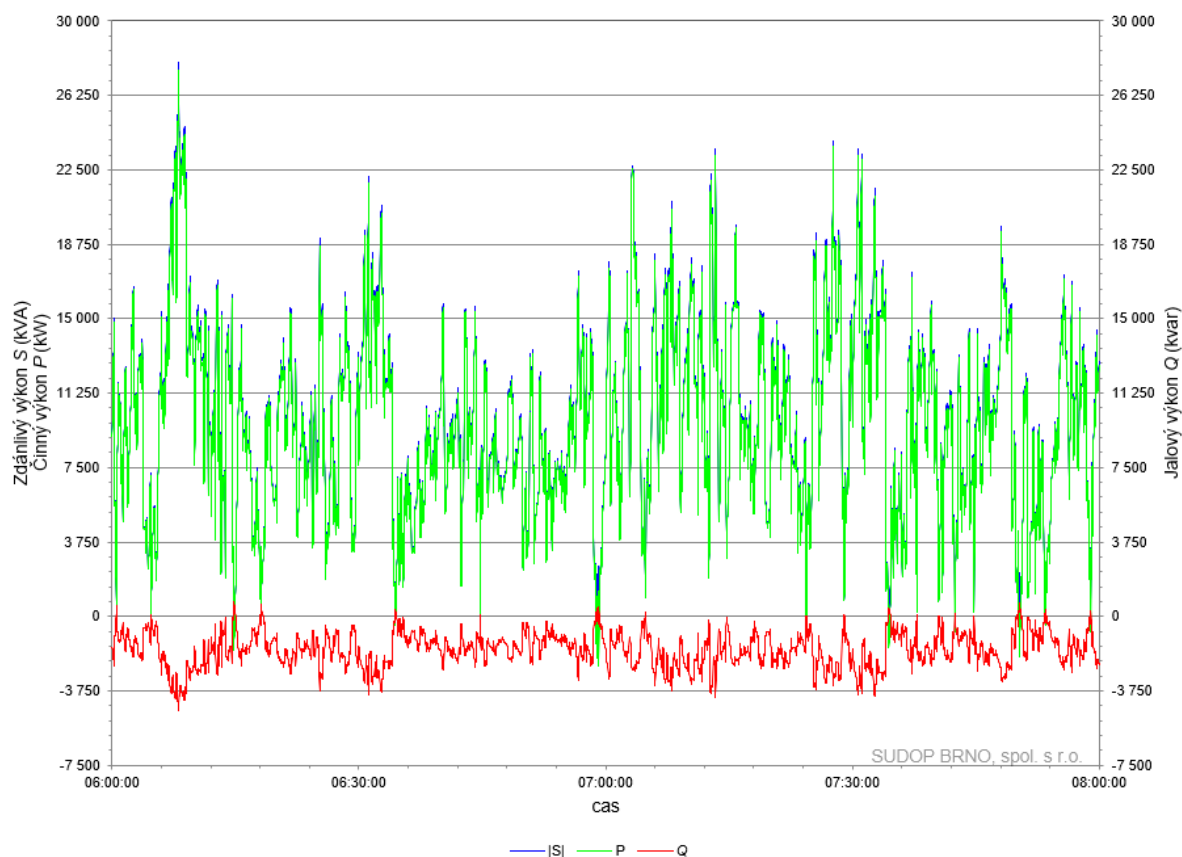
Detaily modelu SFC, jeho jednotlivých komponent, řídicích smyček a PWM generátorů, včetně procedur pro zjednodušení na úroveň modelu 2 a 3, jsou v technické zprávě [25].



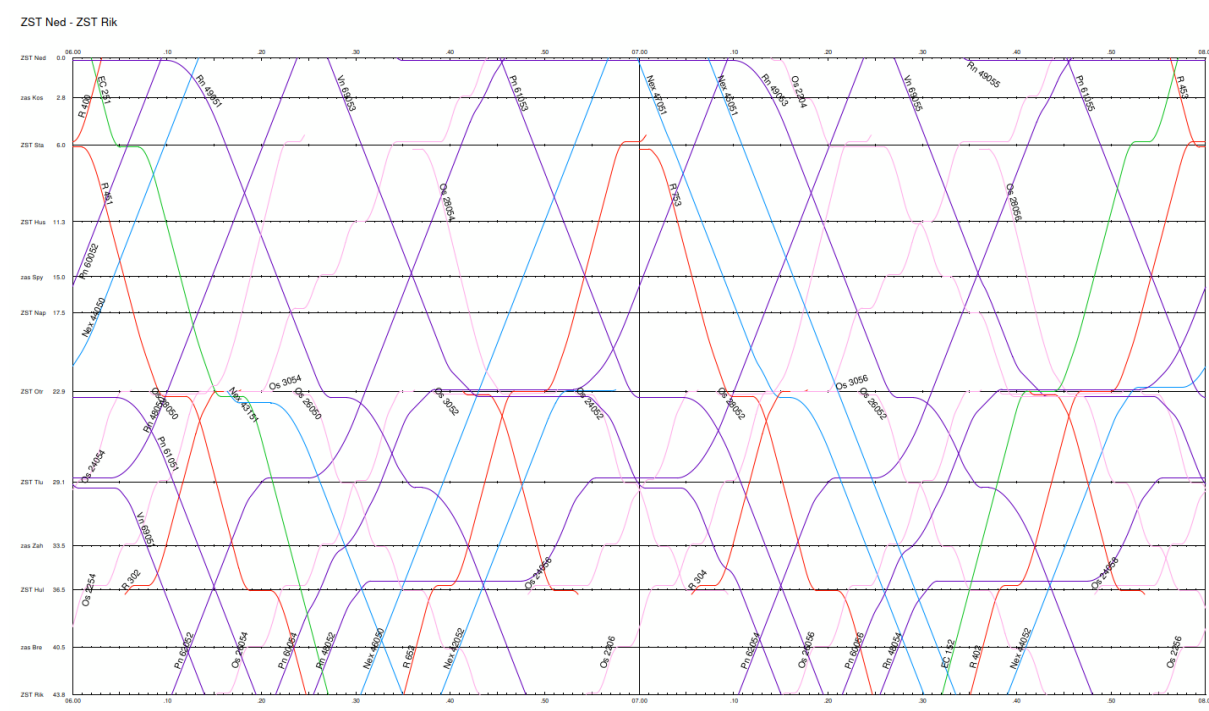
Obr. 40 Zjednodušený model v simulačním programu PSCAD, úroveň modelování 2.

11.3 Model trakční zátěže

Zatížení trakčního napáječe je ve skutečnosti důsledkem provozu elektrických trakčních vozidel na uvažovaném napájecím úseku. Pro detailní simulaci provozu včetně pohybu vozidel, jejich detailní výbroje a v detailu okamžitých hodnot je však simulování velmi náročné (detailní simulování je popsáno např. v [26]). Protože model trakční zátěže není v kontextu této metodiky určen pro detailní analýzu samotné trakční soustavy, je možné zatížení koncentrovat do modelu jedné zátěže, jejíž odběrový profil reprezentuje zatížení celé trakční soustavy. Pro vytvoření profilu zatížení tratí (časový profil činného, potažmo jalového výkonu, Obr. 41) je vhodné využít k tomu vhodný simulační program, který vychází z reálného (předpokládaného) jízdního řádu (grafikonu, Obr. 42). Vhodná je například kombinace OpenTrack (mechanický výpočet, grafikon) a OpenPowerNet (profil elektrických výkonů). Další nezbytné vstupní parametry pro simulace v těchto programech jsou uvedeny v Tab. 9.



Obr. 41 Příklad výstupu ze simulačního programu OpenPowerNet.



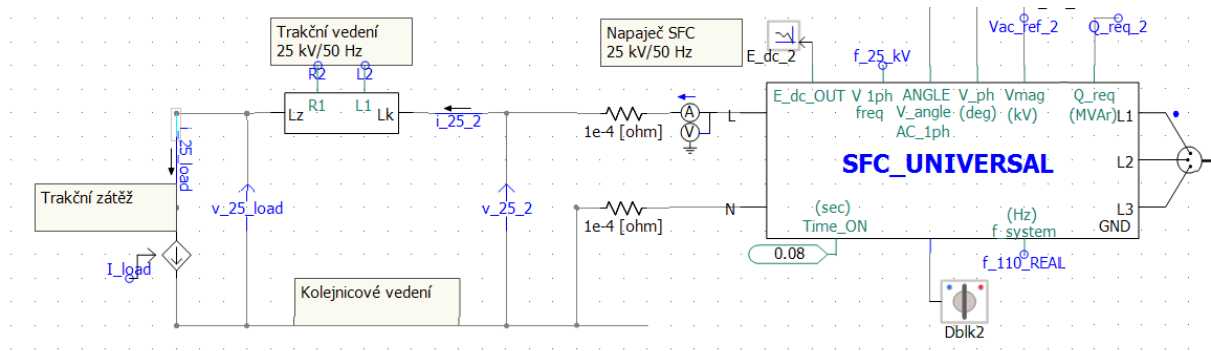
Obr. 42 Příklad grafikonu, simulační program OpenTrack.

Tab. 9 Technické parametry jednotek (zde je uveden příklad Siemens Vectron)

Maximální rychlost	200 km/h
Hmotnost	85 t
Adhezní hmotnost	80 t
Adheze	80 %
Maximální tažná síla	300 kN
Délka jednotky	19 m
Maximální výkon	6,4 MW
Max. napětí při rekuperaci	29 kV
Skutečný účinník	0,98
Regulace výkonu dle TSI ENE	ANO

Model trakční zátěže v simulačním programu PSCAD je na Obr. 43. Jedná se o zdroj harmonického proudu, který je řízen na žádanou hodnotu činného, potažmo jalového výkonu dle zátěžového profilu. Reprezentace trakční zátěže zdrojem harmonického proudu je v tomto případě možná, protože model je určený pro simulaci s měničovým napájecím s DC meziobvodem (SFC), který navíc disponuje dostatečným opatřením (např. filtry v DC meziobvodu) pro šíření rušení z trakční sítě do DS. Trakční vedení je reprezentováno podélným odporem a rektancí s parametry ($\underline{Z}_{km} = (0,26 + j 0,45) \Omega/\text{km}$) [9]. V modelu s koncentrovanou zátěží je však impedance trakčního vedení především z důvodu robustnosti simulace.

Metodika určující podmínky a parametrizaci provozu měničů AC/AC



Obr. 43 Model trakční zátěže v simulačním programu PSCAD.

Reference

- [1] Nařízení Komise (EU) 2016/631 ze dne 14. dubna 2016, kterým se stanoví kodex sítě pro požadavky na připojení výroben k elektrizační soustavě. Dostupné z: <https://www.eru.cz/-/narizeni-komise-eu-2016-631-kterym-se-stanovi-kodex-site-pro-pozadavky-na-pripojeni-vyroben-k-elektrizacni-soustave>.
- [2] Network modelling for harmonic studies - Reference: 766 - 2019. URL: <https://www.e-cigre.org/publications/detail/766-network-modelling-for-harmonic-studies.html>.
- [3] Nařízení Komise (EU) 2016/1388 ze dne 17. srpna 2016, kterým se stanoví kodex sítě pro připojení spotřeby.
- [4] Zákon č. 458/2000 Sb. o podmínkách podnikání a výkonu státní správy v energetických odvětvích a o změně některých zákonů (Energetický zákon)
- [5] VYHLÁŠKA ERÚ č. 16/2016 Sb. ze dne 13. ledna 2016 o podmínkách připojení k elektrizační soustavě.
- [6] PNE 33 3430-0 ed.6:2024. Výpočetní hodnocení zpětných vlivů odběratelů a zdrojů distribučních a přenosové soustavy. Platnost od 1.1.2024.
- [7] PNE 33 3430-6 ed.3:2011. Parametry kvality elektrické energie, Část 6: Omezení zpětných vlivů na hromadné dálkové ovládání. Platnost od 1.1.2011.
- [8] ČSN 34 1530 ed.2:2010. Drážní zařízení - Elektrická trakční vedení železničních drah celostátních, regionálních a vleček; Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví.
- [9] SŽDC (ČSD) SR34(E). Nastavování, provoz a údržba reléových ochranných obvodů trakčního napájecího obvodu.
- [10] ČSN EN 50388-1. Drážní zařízení – pevná trakční zařízení a drážní vozidla – Technická kritéria pro koordinaci mezi elektrickými trakčními napájecími soustavami a drážními vozidly pro dosažení interoperability.
- [11] Nařízení Komise (EU) č. 1301/2014 ze dne 18. listopadu 2014 o technické specifikaci pro interoperabilitu subsystému energie železničního systému v Unii Text s významem pro EHP.
- [12] ČSN EN 50163 ed. 2:2005. Drážní zařízení – Napájecí napětí trakčních soustav.
- [13] ČSN EN 50388 ed. 2:2013. Drážní zařízení – Napájení a drážní vozidla – Technická kritéria pro koordinaci mezi napájením (napájecí stanice) a drážními vozidly pro dosažení interoperability.
- [14] ČSN EN 60870-5-101. Systémy a zařízení pro dálkové ovládání - Část 5-101: Přenosové protokoly - Společná norma pro základní úkoly dálkového ovládání
- [15] ČSN EN 60870-5-104. Systémy a zařízení pro dálkové ovládání - Část 5-104: Přenosové protokoly - Síťový přístup pro IEC 60870-5-101 používající normalizované transportní profily
- [16] ČSN EN 61000-4-30 ed.3:2017. Elektromagnetická kompatibilita (EMC) – Část 4-30: Zkušební a měřicí technika – Metody měření kvality energie
- [17] ČSN EN 61000-4-15 ed.2:2011. Elektromagnetická kompatibilita (EMC) - Část 4-15: Zkušební a měřicí technika - Flikmetr - Specifikace funkce a dimenzování.
- [18] ČSN EN 61000-4-7 ed.2:2003. Elektromagnetická kompatibilita (EMC) - Část 4-7: Zkušební a měřicí technika - Všeobecná směrnice o měření a měřících přístrojích harmonických a meziharmonických pro rozvodné sítě a zařízení připojovaná do nich.

- [19] IEC TR 61000-3-13:2008. Electromagnetic compatibility (EMC): Limits – Assessment of emission limits for the connection of unbalanced installations to MV, HV and EHV power systems.
- [20] KODEX PŘENOSOVÉ SOUSTAVY, platné vydání.
- [21] Technická pravidla pro posuzování zpětných vlivů na síť, EMC & Power Quality (D-A-CH-CZ), 3. vydání, 2021
- [22] Pravidla provozování distribučních soustav, Příloha 4. platné vydání.
- [23] Pravidla provozování distribučních soustav, Příloha 6. platné vydání.
- [24] Pravidla provozování distribučních soustav, Příloha 7. platné vydání.
- [25] Podmínky a parametrizace provozu výkonových měničů AC/AC v nových nebo rekonstruovaných TNS 25 kV, 50 Hz. Technicko-výzkumná zpráva projektu CK02000099, Brno, 2023
- [26] BUREŠ, J.; KLUSÁČEK, J. Modelling of Electric Traction Vehicles with Regard to the Power Quality and Dynamics of Operation. In PROCEEDINGS II OF THE 28TH STUDENT EEICT 2022 Selected Papers. Proceedings II of the Conference STUDENT EEICT. 1. Brno: Brno University of Technology, Faculty of Electrical Engineering and Communication, 2022. p. 13-16. ISBN: 978-80-214-6030-0. ISSN: 2788-1334.
- [27] Podklady řešitelského konsorcia