

9 TECHNOLOGIE NAPÁJENÍ 25kV

9.1 Obsah

9	TECHNOLOGIE NAPÁJENÍ 25kV	1
9.1	Obsah	1
9.2	Všeobecně	2
9.3	Zpětné vlivy na distribuční síť	2
9.3.1	Nesymetrické zatěžování třífázové soustavy	2
9.3.2	Zatěžování distribučního systému odběrem jalového výkonu	3
9.3.3	Zatěžování distribučního systému odběrem deformačního výkonu	3
9.3.4	Dvoustranné napájení	3
9.4	Trakční transformovny	3
9.4.1	Transformovna zapojená do T	4
9.4.2	Transformovna zapojená do V	5
9.4.3	Transformovna zapojená do T s FKZ	7
9.4.4	Trakční napájecí stanice – zapojení do „V“ s FKZ	8
9.4.5	Aktivní balancér	8
9.4.6	Kaskáda měničů	9
9.4.7	Kaskáda tříúrovňových měničů	10
9.4.8	Kaskáda modulárních multilevel měničů	11
9.5	Řízení	13
9.6	Údržba	15
9.7	Přílohy ke kapitole 9	16

9.2 Všeobecně

Myšlenka napájet elektrické železnice jednofázovým systémem využívajícím elektrickou energii odebíranou ze všeobecné distribuční sítě lákala techniky již v období před druhou světovou válkou, intenzivně se ji věnovali zejména v Maďarsku (Budapest – Hegyeshalom, 1932, 15 kV 50 Hz) a v Německu (Höllenthalbahn, 1936, 20 kV 50 Hz). Po druhé světové válce se stala vedoucím tohoto trendu Francie, což mělo dvě příčiny:

- neudržetelnost dalšího pokračování elektrizace hlavních tratí systémem 1,5 kV DC (nízký výkon, vysoké ztráty, nízká přenosová schopnost vedení a z ní vyplývající malá vzdálenost a tím velký počet trakčních napájecích stanic),
- cenné zkušenosti s vozidly na experimentální německé trati 20 kV, 50 Hz, ležící na území v Černém Lese, které se po druhé světové válce stalo francouzskou okupační zónou.

V souvislosti s vývojem v oblasti usměrňovací techniky (zpočátku rotační motorgenerátory, následně krátce rtuťové ignitrony a poté polovodiče) se podařilo zvládnout techniku vozidel napájených jednofázovým napětím 25 kV 50 Hz. To se stalo impulsem pro rozvoj systému 25 kV 50 Hz nejen v evropské, ale i v celosvětové dimenzi.

9.3 Zpětné vlivy na distribuční síť

Z hlediska návaznosti na všeobecnou třífázovou distribuční síť se však ukázaly čtyři systémové nedokonalosti jednoduchých trakčních napájecích stanic se snižovacími transformátory, které byly v počátečním období poněkud podceněny, avšak postupem času se projevovaly stále silněji:

- nesymetrické zatěžování třífázového distribučního systému,
- zatěžování distribučního systému odběrem jalového výkonu,
- zatěžování distribučního systému odběrem deformačního výkonu,
- nemožnost dvoustranného napájení (obava ze vzniku vyrovnávacích proudů v důsledku odlišnosti vektorů napětí v různých místech připojení trakčních napájecích stanic k distribuční soustavě.

9.3.1 Nesymetrické zatěžování třífázové soustavy

Zatěžování třífázové soustavy nesymetrickým jednofázovým odběrem proudu vede k nerovnoměrným úbytkům napětí na vnitřní impedanci sítě (v souhrnu: zdroje, transformátory, vedení), v jejichž důsledku je v distribuční síti třífázové napětí nesymetrické. Tradiční metodu rovnoměrného rozložení jednofázových spotřebičů na všechny tři fáze, praktikovanou například v bytových domech, na železnici použít nelze, neboť spotřebiče (vozidla) jsou spolu propojena jednostopým trakčním vedením. Ani aplikace různých speciálně uspořádaných transformátorů (V, Scott, ...) určených k napájení více traťových úseků nevedla k úspěchu, neboť tento způsob symetrizace funguje jen při určitém poměru zatížení obou traťových úseků. Důsledky nesymetrického zatěžování třífázové sítě jsou neblahé:

- nerovnoměrné zatížení komponent distribuční sítě (transformátory, vedení, ...) vede k tomu, že nelze využívat celý disponibilní výkon sítě ($\sqrt{3} \cdot U_s \cdot I_f$), ale jen jeho část ($U_s \cdot I_f$) na úrovni 58 % celkového disponibilního výkonu třífázové sítě,
- nesymetrií odebíraného proudu vyvolaná nesymetrie napětí v distribuční síti vytváří v točivých strojích ostatních odběratelů opačně rotující složku magnetického pole. Ta vyvolává nežádoucí ztráty, které zvyšují oteplení točivých strojů.

Proto je aktuálním trendem použití elektronických zařízení v trakčních napájecích stanicích (aktivní balancéry, kaskáda měničů), které jednofázový odběr trakce rozkládají do všech tří fází.

9.3.2 Zatěžování distribučního systému odběrem jalového výkonu

Jednofázově napájená trakční vozidla se stejnosměrnými trakčními motory odebírají ze sítě proud, který je vlivem zpoždění komutace můstkového usměrňovač rozptylovou indukčností transformátoru zpožděn za napětím, má tedy kromě činné i jalovou (magnetizační) složku typická hodnota účinníku je u vozidel s diodovými usměrňovači cca 0,8. To znamená, že zdánlivý proud je 1,25 násobkem proudu činného a jeho kvadratické (tepelné) účinky jsou zvýšeny na 1,56 násobek. U vozidel s tyristorovými usměrňovači a fázovým řízením je typická hodnota účinníku cca 0,7. Jejich zdánlivý proud je 1,4 násobkem proudu činného a jeho kvadratické (tepelné) účinky jsou zvýšeny na 2 násobek.

Moderní vozidla používající vstupní čtyřkvadrantové měniče odebírají proud ve fázi s napětím, tedy pracují s účinníkem cca 1,0.

9.3.3 Zatěžování distribučního systému odběrem deformačního výkonu

Jednofázově napájená trakční vozidla se stejnosměrnými trakčními motory odebírají ze sítě proud, který není sinusový, ale přibližně obdélníkový. Proto obsahuje na základě Fourierova rozvoje kromě základní složky s frekvencí 50 Hz i liché vyšší harmonické složky (3. harmonická 150 Hz, 5. harmonická 250 Hz, 7. harmonická 350 Hz, 9. harmonická 450 Hz, ...)

Moderní vozidla používající vstupní čtyřkvadrantové měniče odebírají prakticky sinusový proud s minimálním obsahem vyšších harmonických složek.

Vyšší harmonické složky proudu jsou nežádoucím elementem nejen z důvodu Jouleových ztrát (RI^2), které na odporu vodičů v cestě od zdroje ke spotřebě způsobují, ale i proto, že obdélníkovým úbytkem napětí na vodičích deformují nežádoucím způsobem výchozí sinusový tvar průběhu napětí v distribuční síti do nesinusové podoby.

9.3.4 Dvoustranné napájení

U stejnosměrných systémů lze snadno uskutečnit dvoustranné napájení, neboť výstupní diodové usměrňovače brání vzniku a průchodu vyrovnávacích proudů. S pomocí vazby napáječových rychlovypínačů lze uskutečnit i spojitě dvoustranné napájení velkého počtu na sebe navazujících traťových úseků. Totéž lze uskutečnit i u střídavých systémů při použití měničů se stejnosměrnou vazbou.

9.4 Trakční transformovny

Na železničních tratích elektrizovaných napětím 25 kV 50 Hz byly v bývalém Československu zavedeny typově jednotné trakční napájecí stanice (trakční transformovny) se dvěma jednofázovými transformátory 110 kV/25 kV (respektive 110 kV/27 kV, což je jiné označení pro totožný produkt, zohledňující nikoliv jmenovitou hodnotu napětí elektrizační soustavy, ale pracovní napětí využívající kladnou toleranci této jmenovité hodnoty), typicky o výkonu 12,5 MVA.

Na výstupu této transformovny je rozvodna 25 kV (respektive 27 kV) ve tvaru H, která svými spínacími prvky umožňuje dvě základní zapojení mezi dvojicí transformátorů a dvojicí traťových úseků, a to T a V:

- při zapojení do T je funkční jen jeden transformátor a napájí oba traťové úseky (na obě strany od trakční napájecí stanice). Toto zapojení je zpravidla používáno na dopravně méně zatížených tratích, na kterých stačí jeden transformátor napájet oba traťové úseky po cca 20 až 25 km,

- při zapojení do V jsou funkční oba transformátory, každý z nich napájí jeden traťový úsek (na jednu stranu od trakční napájecí stanice). Toto zapojení je zpravidla používáno na dopravně silněji zatížených tratích.

9.4.1 Transformovna zapojená do T

Nejjednodušší způsob napájení trakčního vedení 1 x 25 kV 50 Hz z distribuční sítě 3 x 110 kV 50 Hz představuje jednofázový transformátor, připojený na primární straně na dvě fáze třífázového systému 3 x 110 kV a na sekundární straně k vrchnímu trakčnímu vedení a ke kolejnici (zapojení T) – viz obr. 9.1. V reálném uspořádání trakčních napájecích stanic na tratích SŽDC jsou používány transformátory dva – jeden je provozní a druhý je záložní (studená záloha), což naplňuje princip redundance N -1.

Výhodou trakčních napájecích stanic v zapojení T je jednoduchost, avšak ta je vykoupena určitými nedokonalostmi:

- a) pro třífázovou distribuční síť představuje trakční napájecí stanice v zapojení T nesymetrický odběr (proud protéká pouze dvojicí fázových vodičů), který nerovnoměrně zatěžuje fázové vodiče, transformátory a další komponenty proudového okruhu distribuční soustavy. Na vnitřní impedanci sítě vznikají úbytky napětí, které nejsou v jednotlivých fázích stejné. Vlivem toho vzniká nesymetrie třífázového napětí v distribuční síti. Z důvodu dodržení přípustných mezí nesymetrie třífázového napětí v distribuční síti je nesymetrický odběr příkonu pro jednotlivého spotřebitele limitován na 0,7 % zkratového výkonu distribuční soustavy (viz kapitola 6.1 a 6.2 této zprávy).
- b) pro rozložení jednofázového odběru do více fází jsou jednotlivé trakční napájecí stanice připojeny na různé dvojice fázových vodičů distribuční sítě. Při hustém provozu vlaků v těsném sledu se odběry z jednotlivých fází jakž-takž doplňují, při řídkém provozu těžkých či rychlých vlaků nikoliv (vlak je napřed v jednom, pak v druhém úseku). Každopádně však je výsledkem jednostranné napájení do poloviny úseku mezi sousedními trakčními napájecími stanicemi (viz obr. 9.2), kde místo střídání fází s neutrálním polem a se spínací stanicí, která je v základní poloze (pokud jsou obě sousední trakční napájecí stanice funkční) rozepnuta.
- c) jednostranné napájení do poloviny úseku má ve srovnání s dvoustranným napájením řadu nevýhod:
 - vyšší úbytky napětí,
 - vyšší ztráty,
 - krátký napájený úsek s malým počtem vlaků, tedy časově rozkolísaný odběr s nepříznivě velkým poměrem $P_{\max}/P_{\text{stř.}}$,
 - krátký napájený úsek s malým počtem vlaků, tedy nízká pravděpodobnost využití rekuperovaného výkonu ostatními vozidly,
 - nespojitě napájení trakčního vedení s nutností vypínání proudu při přejíždění neutrálního pole, provázené řadou negativních jevů (přerušování trakčního výkonu, zamezení rekuperačního brzdění, přerušování činnosti pomocných pohonů, přerušování vytápění, ventilace a klimatizace, ...),

Stojí za povšimnutí, že neutrální pole jsou v trakčním vedení standardně vložena a vybavena pevnými návěstmi prikazujícími vypnutí proudu nejen u spínacích stanic přibližně v polovině úseků mezi trakčními napájecími stanicemi, ale bezprostředně i u trakčních napájecích stanic. V normálním provozním stavu je tedy u transformovny (zapojení T) tato návěst zbytečná, neboť obě strany trakčního vedení jsou napájeny stejným vektorem napětí,

- d) používané transformátory jsou poměrně měkké (mají dosti vysoké poměrné napětí nakrátko, cca kolem 12%). V důsledku toho je napětí na výstupu trakční napájecí stanice silně proměnné – klesá při zatěžování proudem (viz obr. 9.3), a to zejména při nižší hodnotě účinnosti (viz obr. 9.4). Úbytek napětí na transformátoru dosahuje velkých hodnot. Navíc nelze, s ohledem na kolísání napětí v distribuční síti 110 kV a na relativně hrubou odbočkovou

regulací transformátoru, zcela využívat horní toleranční mez napětí (27 500 V) pro chod transformátoru naprázdno. Výsledkem je, že již při zatížení jmenovitým proudem klesá napětí na výstupu trakční napájecí stanice k hodnotě kolem 25 000 V.

Ve vztahu k požadavkům TSI ENE a ČSN EN 50 388 na kvalitu napájení, které snížily původní rozsah využitelného napětí z rozpětí 10 000 V (27 500 V až 17 500 V) na současné rozpětí 5 000 V (27 500 V až 22 500 V), se již velká část využitelného úbytku napětí vyčerpá v samotné trakční napájecí stanici a na vlastní trakční vedení již zbývá jen nevelký úbytek napětí. To významně omezuje dosah napájení.

Tato skutečnost je velmi závažná i při posuzování krátkodobých proudových přetížení. Transformátor je díky své velké tepelné kapacitě a tedy dlouhé časové konstantně, schopen snášet velká proudová přetížení. Avšak napětí na jeho výstupu při zatěžování velkými proudy silně klesá. V minulosti, při posuzování hodnot napětí jen podle ČSN EN 50 163 (minimum 17 500 V) bylo možno transformátory v tomto režimu provozovat. Avšak v současnosti, kdy ustanovení TSI a ČSN EN 50 388 omezují minimální využitelnou hodnotu na sběrači vozidla na 22 500 V (začátek intenzivního snižování trakčního výkonu vozidel podle TSI LOC & PAS) je proudová přetížitelnost transformátorů prakticky nevyužitelná. Dochází při ní totiž k hlubokému poklesu napětí, který na vozidlech aktivuje zařízení pro automatické snižování výkonu.

Starší vozidla s diodovými usměrňovači a se stejnosměrnými trakčními motory již v současnosti nelze přes prosté jednofázové transformátory připojovat (bez dodatečných opatření) k distribuční síti, neboť mají nízký účinník a velký obsah vyšších harmonických složek proudu, což distributoři nedovolují.

9.4.2 Transformovna zapojená do V

Ve snaze snížit namáhání distribuční soustavy nesymetrickým odběrem je v trakčních napájecích stanicích určených k napájení trakčního vedení 1 x 25 kV 50 Hz z distribuční sítě 3 x 110 kV 50 Hz využíváno zapojení V (otevřený trojúhelník). Taková trakční napájecí stanice 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 trakční napájecí stanice a druhý transformátor napájí trakční vedení na druhou stranu od trakční napájecí stanice – viz obr. 9.5.

Obě části vrchního vedení jsou v bezprostřední blízkosti trakční napájecí stanice navzájem odděleny dělením s neutrálním polem – viz obr. 9.6. V reálném uspořádání trakčních napájecích stanic na tratích SŽDC jsou tyto zpravidla vybaveny jen dvěma transformátory. Oba jsou v běžném stavu provozní, každý z nich napájí trakční vedení na jednu stranu od trakční napájecí stanice. Záložní transformátor není, princip redundance N -1 není naplněn. V případě odstavení (nefunkčnosti) jednoho z transformátorů (porucha, revize, ...) jsou oba úseky trakčního vedení napájeny z jednoho transformátoru a trakční napájecí stanice přechází do režimu odpovídajícímu zapojení T. Nemá-li transformátor pro tuto situaci odpovídající výkonovou rezervu je přetěžován, respektive musí dojít k omezení provozu (k zavedení jízdy vlaků ve sledu odpovídajícím elektrickému následnému mezidobí).

Technické řešení trakčních napájecích stanic zapojených do T a trakčních napájecích stanic zapojených 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).

Výhodou trakčních napájecích stanic v zapojení do V je ve srovnání s trakčními transformovnamí zapojenými do T poněkud menší nesymetrie odběru příkonu z distribuční soustavy (zatěžovány jsou dvě dvojice fází), avšak symetrie docílena není. K vytvoření symetrie by musely být v trakční napájecí stanici společně provozovány nikoliv dva, ale tři jednofázové transformátory a musely by být zatěžovány nikoli různým, ale stejným dopravním provozem.

Naopak nevýhodou trakčních transformoven zapojených do V jsou ve srovnání s trakčními transformovny zapojenými do T kratší napájené úseky (nikoliv společně na obě strany od trakční napájecí stanice ke spínací stanici v polovině napájeného úseku, ale jen na jednu stranu od trakční napájecí stanice 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 distribuční sítě.

To má závažné technické dopady, zejména by to způsobilo další zvyšování nesymetrie napětí. Tyto důvody vedou distributora k úplnému odmítnutí přebytků rekuperovaného brzdového výkonu, tedy k zákazu rekuperace, který znemožní i předávání rekuperovaného brzdového výkonu mezi vozidly.

Další dopady jsou ekonomické: energie předaná do distribuční sítě má mnohem menší (v současnosti nulovou) cenu, než energie odebíraná z distribuční sítě, která se ušetří předáním rekuperovaného brzdového výkonu mezi vozidly. Potenciál úspor plynoucích z plného využití rekuperované energie jinými vozidly je velmi velký.

Trakční transformovny zapojené do V trpí podobnými nedokonalostmi, jako trakční transformovny zapojené do T:

- a) pro třífázovou distribuční síť představuje trakční napájecí stanice v zapojení V nesymetrický odběr (proud je do fázových vodičů rozložen nerovnoměrně), který nerovnoměrně zatěžuje fázové vodiče, transformátory a další komponenty proudového okruhu distribuční sítě. Na vnitřní impedanci sítě vznikají úbytky napětí, které nejsou v jednotlivých fázích stejné. Vlivem toho vzniká nesymetrie třífázového napětí v distribuční síti. Z důvodu dodržení přípustných mezí nesymetrie třífázového napětí v distribuční síti je nesymetrický odběr příkonu pro jednotlivého spotřebitele limitován na 0,7 % zkratového výkonu distribuční soustavy (viz kapitola 6.1 a 6.2 této zprávy).
- b) pro rozložení jednofázového odběru do více fází jsou jednotlivé trakční napájecí stanice připojeny na různé dvojice fázových vodičů distribuční sítě. Při hustém provozu vlaků v těsném sledu se odběry z jednotlivých fází jakž-takž doplňují, při řídkém provozu těžkých či rychlých vlaků nikoliv (vlak je napřed v jednom, pak v druhém úseku). Každopádně však je výsledkem jednostranné napájení do poloviny úseku mezi sousedními trakčními napájecími stanicemi (viz obr. 9.2), kde místo střídání fází s neutrálním polem a se spínací stanicí, která je v základní poloze (pokud jsou obě sousední trakční napájecí stanice funkční) rozepnuta, neboť k ní z obou stran přicházejí napětí s odlišnou fází,
- c) jednostranné napájení do poloviny úseku má ve srovnání se dvoustranným napájením řadu nevýhod:
 - vyšší úbytky napětí,
 - vyšší ztráty,
 - krátký napájený úsek s malým počtem vlaků, tedy časově rozkolísaný odběr s nepříznivě velkým poměrem $P_{\max}/P_{\text{stř}}$,
 - krátký napájený úsek s malým počtem vlaků, tedy nízká pravděpodobnost využití rekuperovaného výkonu ostatními vozidly,
 - nespojité napájení trakčního vedení s nutností vypínání proudu při přejíždění neutrálního pole, provázené řadou negativních jevů (přerušování trakčního výkonu, zamezení rekuperačního brzdění, přerušování činnosti pomocných pohonů, přerušování vytápění, ventilace a klimatizace, ...),

Neutrální pole jsou v trakčním vedení vložena a vybavena pevnými návěstmi prikazujícími vypnutí proudu jak u spínacích stanic přibližně v polovině úseků mezi trakčními napájecími stanicemi, tak i bezprostředně u trakčních napájecích stanic. Je to nutností, neboť obě strany trakčního vedení jsou napájeny různým vektorem napětí,

- d) používané transformátory jsou poměrně měkké (mají dosti vysoké poměrné napětí na krátko, cca kolem 12%). V důsledku toho je napětí na výstupu trakční napájecí stanice silně proměnné – klesá při zatěžování proudem (**viz obr. 9.3**), a to zejména při nižší hodnotě účinníku (**viz obr. 9.4**). Úbytek napětí na transformátoru dosahuje velkých hodnot. Navíc nelze, s ohledem na kolísání napětí v distribuční síti 110 kV a na relativně hrubou odbočkovou regulaci transformátoru, zcela využívat horní toleranční mez napětí (27 500 V) pro chod transformátoru na prázdko. Výsledkem je, že již při zatížení jmenovitým proudem klesá napětí na výstupu trakční napájecí stanice k hodnotě kolem 25 000 V.

Ve vztahu k požadavkům TSI ENE a ČSN 50 388 na kvalitu napájení, které snížily původní rozsah využitelného napětí z rozpětí 10 000 V (27 500 V až 17 500 V) na současné rozpětí 5 000 V (27 500 V až 22 500 V), se již velká část využitelného úbytku napětí vyčerpá v samotné trakční napájecí stanici a na vlastní trakční vedení již zbývá jen nevelký úbytek napětí. To významně omezuje dosah napájení.

Tato skutečnost je velmi závažná i při posuzování krátkodobých proudových přetížení. Transformátor je díky své velké tepelné kapacitě a tedy dlouhé časové konstantě, schopen snášet velká proudová přetížení. Avšak napětí na jeho výstupu při zatěžování velkými proudy silně klesá. V minulosti, při posuzování hodnot napětí jen podle ČSN EN 50 163 (minimum 17 500 V) bylo možno transformátory v tomto režimu provozovat. Avšak v současnosti, kdy ustanovení TSI a ČSN EN 50 388 omezují minimální využitelnou hodnotu na sběrači vozidla na 22 500 V (začátek intenzivního snižování trakčního výkonu vozidel podle TSI LOC & PAS) je proudová přetížitelnost transformátorů prakticky nevyužitelná. Dochází při ní totiž k hlubokému poklesu napětí, který na vozidlech aktivuje zařízení pro automatické snižování výkonu.

Starší vozidla s diodovými usměrňovači a se stejnosměrnými trakčními motory již v současnosti nelze přes prosté jednofázové transformátory připojovat (bez dodatečných opatření) k distribuční síti, neboť mají nízký účinník a velký obsah vyšších harmonických složek proudu, což distributoři nedovolují.

9.4.3 Transformovna zapojená do T s FKZ

Aby bylo možno i starší vozidla s diodovými usměrňovači a se stejnosměrnými trakčními motory, která mají nízký účinník a velký obsah vyšších harmonických složek proudu napájet přes jednofázové transformátory z distribuční sítě i v současnosti, kdy je požadován vysoký účinník ($\cos \phi > 0,95$) a nízký obsah vyšších harmonických složek proudu, byla do trakčních napájecích stanic (do trakčních transformoven) uspořádaných do T dodatečně doplněna filtračně kompenzační zařízení (FKZ) – **viz obr. 9.7**, 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 usměrňovačů a stejnosměrných trakčních motorů (rok výroby 1965 až 1990, tedy aktuální stáří 27 až 52 let) budou tato zařízení demontována (u nových instalací FKZ nelze naplnit předpoklad jejich využívání po dobu 30 let, jak předepisuje metodika ekonomického hodnocení dopravních staveb zveřejněná ve Věstníku dopravy č. 11/2013).

Pozitivním přínosem FKZ je, že zlepšují podmínky zatížení nejen pro distribuční síť, ale i pro transformátor 110 kV/25 kV, tedy že snižují jeho namáhání jalovým a deformačním výkonem a zvětšením účinníku snižují úbytek napětí.

Nepříjemnou skutečností je fakt, že provoz některých typů trakčních vozidel s vysokým výkonem a vybavených technikou čtyřkvadrantových vstupních měničů, tedy vozidel, která funkci FKZ nepotřebují, neboť již samy o sobě odebírají proud který je ve fázi s napětím a který má sinusový průběh, vede ke vzniku rezonančních jevů, které FKZ poškozují.

9.4.4 Trakční napájecí stanice – zapojení do „V“ s FKZ

Ze stejných důvodů a se stejnými důsledky, jak je popsáno výše v kapitole 9.3, byla filtračně kompenzační zařízení doplněna i k trakčním napájecím stanicím (k trakčním transformovným) s jednofázovými transformátory zapojenými do V (viz obr. 9.8).

9.4.5 Aktivní balancér

K odstranění systémového nedostatku jednofázové elektrické vazby při napájecím napětím 25 kV 50 Hz, spočívajícím v nesymetrickém zatěžování třífázové distribuční soustavy 3 x 110 kV, byla vytvořena technika aktivních balancérů (viz obr. 9.9, 9.10). Jejím základním cílem je převedení nesymetrického zatěžování fázových vodičů na symetrické:

- a) výchozí stav (jednofázový transformátor v zapojení T):

$$I_1 = I_t$$

$$I_2 = I_t$$

$$I_3 = 0$$

- b) výsledný stav (třífázový transformátor s balancérem)

$$I_1 = 2/3 \cdot I_t$$

$$I_2 = 2/3 \cdot I_t$$

$$I_3 = 2/3 \cdot I_t$$

Ve výše uvedených vztazích jsou proudy fázových vodičů označeny I_1 , I_2 , I_3 a I_t je označen proud v trakčním vedení přepočtený v poměru sekundárního ku primárnímu napětí transformátoru.

Aktivní balancér je tvořen trojicí do trojúhelníku zapojených antiparalelních polovodičových spínačů a tlumivek (rektorů). Balancér zajišťuje dvě základní funkce:

- symetrizace fázových proudů (odčerpává část proudu ze dvou fázových vodičů, které napájejí trakční vedení a předává jej do třetí fáze, která není spojená s trakčním vedením,
- produkování kladného či záporného jalového výkonu, potřebného buď ke kompenzaci nízkého účinníku příkonu starších vozidel nebo ke stabilizaci napětí na výstupu trakční napájecí stanice (natáčením vektoru úbytku napětí přidávaným jalovým proudem induktivní či kapacitní povahy).

Balancér tedy dokáže symetrizovat příkon odbíraný jednofázovými vozidly do všech tří fází distribuční soustavy (respektive přebytek rekuperačního výkonu) a vykompenzovat jich případný nízký účinník. V určité míře též balancér dokáže stabilizovat výstupní napětí trakční napájecí stanice. Pokud je to z místních důvodů potřebné (provoz starších vozidel), lze balancér doplnit filtračními LC členy pro potlačení vozidly odebíraných vyšších harmonických složek proudu (3., 5. a 7.).

Díky schopnosti řídit v určitých mezích změnou jalového proudu výstupní napětí trakční napájecí stanice umožňují balancéry paralelní spolupráci, avšak jen za podmínky, že je v distribuční síti (v místech připojení sousedních trakčních napájecích stanic k distribuční síti) stejný fázový úhel.

EGU Brno provedl pro prověřovanou oblast elektrického napájení železnic v trojúhelníku Brno – Přerov - Břeclav analýzu na síťovém modelu podle skutečnosti roku 2015 (8 760 záznamů skutečných hodnot fázových úhlů v uzlových bodech přenosové a distribuční soustavy). Z této analýzy

vyplývalo, že mezi některými sousedními z 8 posuzovaných míst připojení trakčních napájecích stanic (5 současných: Říkovice, Otrokovice, Nedakonice, Břeclav a Modřice a 3 nové: Brno-Černovice, Vyškov a Kyjov) dochází v distribuční síti 3 x 110 kV k rozdílu fázových úhlů, a to několik stupňů. Tyto by při prosté paralelní spolupráci transformátorů 110 kV/25 kV vyvolaly mezi místy připojení napájecích stanic k distribuční síti přetoky činného výkonu, vedené přes trakční napájecí stanice a trakční vedení. Oba v daném území působící distributoři (E.ON a ČEZ) možnost přímého paralelního provozu trakčních napájecích stanic (dvoustranné napájení) odmítli (viz studie EGU a zápisy z porad).

Distributoři trakční napájecí stanice s 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) a to z důvodu symetrizace proudů do všech tří fází. Avšak připouštějí je pouze v ostrovním provozu (jednostranné napájení s dělením trakčního vedení v místě spínacích stanic, přibližně uprostřed mezi trakčními napájecími stanicemi).

9.4.6 Kaskáda měničů

Pro umožnění dvoustranného spojitého napájení, které je na tratích SŽDC standardem u systému 3 kV, též na tratích elektrizovaných systémem 25 kV 50 Hz, je podmínkou paralelní provoz trakčních napájecích stanic.

Tuto podmínku splňují trakční napájecí stanice s kaskádou dvou měničů: 3 AC/DC plus DC/1 AC (viz obr. 9.11 a 9.12). Tvoří je čtyři části:

- vstupní třífázový snižovací transformátor (primární napětí 110 kV),
- vstupní třífázový měnič AC/DC
- vstupní jednofázový měnič DC/AC
- výstupní jednofázový zvyšovací transformátor (sekundární napětí 25 kV).

Přenos energie mezi sítěmi 3 x 110 kV 50 Hz a 1 x 25 kV 50 Hz přes stejnosměrný meziobvod dává této struktuře výhodné vlastnosti:

- mezi 1 AC výstupem a 3 AC vstupem kaskády měničů je přenášen jen činný výkon,
- výstupní měnič generuje na výstupu trakční napájecí stanice, který napájí trakční vedení, jednofázové přibližně sinusové napětí. Je možno jej zatěžovat jak sinusovým proudem ve fázi s napětím (ideální případ – nová vozidla se vstupním čtyřkvadrantovým měničem), tak i nesinusovým proudem s obsahem vyšších harmonických složek proudu a to fázově posunutým (starší vozidla s diodovými usměrňovači a se stejnosměrnými trakčními motory). Určité fázové posunutí proudu za napětím vytváří i indukčnost trakčního vedení. S vyššími harmonickými složkami proudu spojený deformační výstupní výkon, jakožto i s fázovým posunem proudu za napětím spojený jalový výstupní výkon měnič vytvoří a do jednofázového trakčního vedení dodá ($P = \sqrt{P_c^2 + P_j^2 + P_d^2}$), avšak do vstupního měniče se přes stejnosměrný meziobvod přenáší jen jeho činná složka – viz obr. 9.13.
- není-li požadováno jinak, odebírá vstupní měnič z třífázové sítě jen činný příkon, tedy přibližně sinusový proud ve fázi s napětím a to rovnoměrně ze všech tří fází ($I_1 = I_2 = I_3$),
- přenos činného výkonu přes kaskádu měničů a jeho rovnoměrná symetrizace do všech tří fází distribuční soustavy probíhá obousměrně. Tedy jak při odběru příkonu pro vozidla z distribuční soustavy, tak při navrácení přebytku rekuperačního výkonu od vozidel do distribuční soustavy
- díky vzájemnému propojení vstupní a výstupní strany kaskády měničů 3 AC/DC a DC/1 AC přes stejnosměrný meziobvod se mohou výstupní a vstupní střídavá napětí trakční napájecí stanice navzájem lišit nejen počtem fází a napětím (příslušnou napěťovou redukcí společně zajišťují vstupní třífázový transformátor a výstupní jednofázový transformátor), ale i kmitočtem a fázovým úhlem,

- u trakčních napájecích stanic 3 x 110 kV 50 Hz / 1 x 25 kV 50 Hz není důvod měnit kmitočet (avšak možné to je, zařízení to umožňuje), ale s výhodou lze využít možnost generovat výstupní napětí 25 kV s určitým fázovým posunem vůči vstupnímu napětí 110 kV, tedy s jiným fázovým úhlem vůči ose času. Tento princip umožňuje synchronizovat trakční napájecí stanice tak, aby mohly paralelně spolupracovat. A to bez vzniku nežádoucích vyrovnávacích proudů, které by byly iniciovány rozdílnými fázovými úhly vstupního napětí 110 kV, tak je to v distribuční síti realitou (viz výše uvedené analýzy, které provedl EGU Brno).

Trakční napájecí stanice s kaskádou měničů 3 AC/DC a DC/1 AC tedy umožňují užívat systém 25 kV 50 Hz s jednotnou a stabilizovanou fází. 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 nutno ani vypínat proud, ani stahovat sběrač.

To vytváří ideální podmínky jak pro jízdu vlaku (není přerušován výkon), tak i pro rekuperační brzdění i pro činnost pomocných zařízení, vytápění, větrání a klimatizace. Spínací přístroje netrpí vysokou četností použití, pozornost strojvedoucího není odpoutávána od sledování tratě a řízení vozidla.

Dlouhé spojitě napájené úseky zároveň vytvářejí podmínky pro uklidnění příkonu (nízký poměr $P_{\max}/P_{\text{stř}}$), tedy pro hospodárné dimenzování a pro nízké platby za rezervovaný příkon, i pro prioritní předávání rekuperovaného výkonu mezi vozidly s minimálními zpětnými přetoky do distribuční soustavy – viz. též odst. 9.5 - řízení.

Vlastní realizace měničové techniky se v průběhu času vyvíjí spolu s pokrokem v elektrotechnice. Logická snaha uskutečnit měniče na náležitě vysoké napěťové hladině a vyhnout se tak nutnosti dimenzovat zařízení na hodně velké proudy (velké průřezy vodičů) naráží na možnosti polovodičových součástí, zejména spínacích prvků. Dalším tématem je víceúrovňové spínání. Jde o to, jak přejít od obdélníkového tvaru napětí, který je produktem jednoúrovňového spínání stejnosměrného napětí, k sinusovému průběhu a to bez potřeby používat mohutné pasivní LC filtry. Cestou k tomu je víceúrovňové spínání. Postupným spínáním více napěťových hladin je vytvořen schodovitý průběh, který je blíže k výslednému sinusovému tvaru napětí.

Vlastní kaskáda měničů podle **obr.9.11** se tak v praktické realizaci liší ve vnitřní struktuře měničů 3 AC/DC a DC/1 AC.

9.4.7 Kaskáda tříúrovňových měničů

Jak pro vstupní měnič 3 AC/DC, tak i pro výstupní měnič DC/1 AC jsou použity dílčí tříúrovňové měniče (**viz. obr. 9.14**). Stejnosměrný meziobvod má symetricky uzemněný střední potenciál, vůči kterému působí kladný pracovní vodič (například + 3 000 V) a záporný pracovní vodič (například - 3 000 V).

Jak na vstupní straně, tak na výstupní pracuje několik dílčích měničů. Dílčí vstupní měniče 3 AC/DC i dílčí výstupní měniče DC/1 AC jsou na svých stejnosměrných stranách připojeny ke stejnosměrnému meziobvodu paralelně. Střídavé strany dílčích vstupních měničů 3 AC/DC jsou ke vstupnímu transformátoru připojeny samostatnými sekundárními vinutími. Střídavé strany dílčích výstupních měničů DC/1 AC jsou k výstupnímu transformátoru připojeny samostatnými primárními vinutími. Měniče jsou řízeny přesazeně, účinky jimi vyvolaných magnetických toků se v jádře transformátorů sčítají, což vstupní transformátor v součtu přenáší ze sekundárních vinutí do vinutí primárního a výstupní transformátor v součtu přenáší z primárních vinutí do vinutí sekundárního.

9.4.8 Kaskáda modulárních multilevel měničů

Technika polovodičových měničů pro trakční napájecí stanice prošla v uplynulých létech velkým vývojem. Ten v zásadě odpovídá vývoji polovodičových měničů pro energetiku. Energetika řeší, zejména v oboru přenosových sítí, velmi podobná témata a vytváří k tomu nástroje v podobě stavebnicově pojatých měničových bloků (včetně příslušných HW a SW produktů), které lze s výhodou aplikovat i v oboru pevných trakčních zařízení. Přednostmi unifikace trakční a přenosové techniky jsou výhody plynoucí z velkého rozsahu výroby, tedy modernost a přitom vývojová a funkční vyzrálост, cenová dostupnost, kontinuální výroba náhradních dílů s krátkými dodacími lhůtami, funkční a rychlý servis. V neposlední řadě je výhodou i vzájemné sepetí dopravy s elektroenergetikou, které již je a bude stále silnější a to zejména v oblasti řízení.

V počátcích aplikace polovodičových měničů v energetice (a přeneseně i v napájení trakce) byly používány jednoúrovňové spínače, které umožňovaly prosté zapnutí a vypnutí. To pochopitelně vedlo k velkému zvlnění proudu, které se i za cenu použití mohutných pasivních LC filtrů dařilo vyhladit jen z části. Důsledkem byly potíže s elektromagnetickou kompatibilitou (jak na straně energetiky, tak na straně dráhy), hlukem a přídatnými ztrátami.

Dalším krokem proto bylo víceúrovňové spínání, realizované pomocí vícevinuťových transformátorů. Tím došlo k dílčímu zlepšení, ale za cenu mohutných složitých transformátorů s množstvím vývodů s vodiči o velkém průřezu, neboť polovodičové spínače pracovaly s relativně nízkým napětím a s vysokými proudy.

S dalším rozvojem techniky vznikla ke splnění požadavků na tato zařízení kladená (nízká úroveň rušení, nízká úroveň hluku, nízké ztráty, vysoká účinnost, vysoká spolehlivost, údržbová nenáročnost, okamžitá reakce na řídicí povely, ...) technologie modulárních mnohaúrovňových (multilevel) spínačů (**viz obr. 9.15**). Ta je v současné době široce aplikována v energetice i v trakci.

Její podstatou je modulární konstrukce vysokonapěťových polovodičových měničů, řešených na principu použití řetězců v sérii řazených IGBT spínačů s kondenzátorovými děliči. Z univerzálně použitelných modulů jednotného typu jsou sestaveny jednotlivé větve měničů (počet modulů závisí na velikosti pracovního napětí, typická hodnota je cca 15kV) a vzájemným propojením větví pak vznikají příslušné měniče. Ze stejných stavebních prvků a s využitím stejných principů je vytvořeno konkrétní potřebné obvodové uspořádání (schéma) měniče, v případě trakčních napájecích stanic 3 x 110 kV / 25 kV jde o měniče typu 3 AC/DC a DC/1 AC. Napětí stejnosměrného meziobvodu (zhruba 10 až 15 kV) je voleno tak, aby bylo dosaženo optimálního poměru mezi proudem (určuje průřez vodičů) a napětím (určuje vzdálenosti vodičů) s cílem vytvořit kompaktní investičně i provozně výhodné řešení. Napěťové přizpůsobení na vstupu (s distribuční sítí 3 x 110 kV 50 Hz) a na výstupu (s trakčním vedením 1 x 25 kV 50 Hz) zjišťují transformátory. Na výstupu není nutné galvanické oddělení a proto je možno použít menší a lehčí zvyšovací autotransformátor. Díky použití výstupního autotransformátoru je možno trakční napájecí stanici s kaskádou měničů 3 AC/DC a DC/1 AC velmi snadno modifikovat na systém 2 x 25 kV 50 Hz (s negativním napájecím vodičem). Jedinou změnou je doplnění dalšího (negativního) vinutí do výstupního autotransformátoru.

Zásadní výhodou modulární multilevel technologie je rozložení spínání sinusové vlny do mnoha dílčích malých postupných kroků, které vede k velmi malému zvlnění proudu (analogie: javorový list s hrubým zoubkováním versus březový list s jemným zoubkováním). To je příznivé jak z hlediska elektromagnetické kompatibility (na vstupu ve vztahu k distribuční síti, na výstupu ve vztahu k trakční síti), tak i z hlediska ztrát i hlučnosti.

Modulární multilevel měniče jsou koncipovány s cílem dosáhnout vysokou spolehlivost a nízkou údržbovou náročnost:

- vysokonapěťová polovodičová zařízení jsou situována v čistém uzavřeném prostoru,

- bezpotenciálové kapalinové chlazení odvádí teplo z měničů do venkovních prostor, kde může být předáváno do ovzduší bez potíží plynoucích z přítomnosti elektrického napětí,
- měniče mají vnitřní redundanci. V každé větvi měniče je z hlediska napěťového dimenzování zařazen jeden rezervní spínací IGBT modul navíc. Při případné poruše některého z modulů dojde k jeho přemostění stykačem a zařízení pracuje dál,
- měniče vyššího výkonu jsou rozděleny do dvojic, což představuje další možnost vnitřní redundance,
- zařízení je opatřeno monitorováním a diagnostikou,
- zařízení je schopno nouzového provozu bez funkčních měničů a to při přímém propojení vstupního transformátoru s výstupním transformátorem (**viz obr. 9.16**),
- rozsáhlé provozní zkušenosti – modulární multilevel měniče jsou široce používány v energetice a v trakci (ve funkci kaskádních měničů 3 AC 50Hz/DC a DC/ 1 AC 50Hz, ve funkci aktivních balancérů i ve funkci přímých měničů počtu fází a kmitočtu (3 AC 50 Hz/1 AC 16,7 Hz) – v zásadě jde o stejný HW s jiným SW) v řadě evropských zemí i mimo Evropu.

Přednosti modulárních multilevel měničů ve srovnání s předchozí technikou lze shrnout do následujících bodů:

- perspektivní technologie široce využívaná v energetice versus výběhová technologie bez perspektivy další dlouhodobé výroby (jednotnost stylu do dalších let),
- téměř sinusové výstupní napětí s minimálním obsahem vyšších harmonických (minimální úroveň rušivých proudů na straně železnice),
- téměř sinusový vstupní proud s minimálním obsahem vyšších harmonických (minimální úroveň rušivých proudů na straně distribuční sítě),
- vnitřní redundance (možnost provozu při poruše jednoho spínače, u vyšších výkonů též s polovinou výstupních měničů),
- vysoká účinnost,
- nízká úroveň hluku,
- jednoduché propojení vodiči nevelkého průřezu - prostorová volnost konfigurace, možnost přizpůsobení zástavby disponibilnímu prostoru,
- jednoduchý výstupní autotransformátor,
- snadná úprava výstupu na systém 2 x 25 kV – výstupní autotransformátor je již standardní součástí, jen se pro 2 x 25 použije transformátor opatřený též vinutím pro negativní napáječ,
- možnost nouzového provozu (transformátor – transformátor) sníženým výkonem,
- rychlá odezva na povely řízení – možnost aplikace nadřazených funkcí a algoritmů,
- nízká vnitřní kapacita kondenzátorů – podstatné pro zkratové proudy,
- velmi výhodné řešení při vnitřní redundanci (dvojnásobný výkon při jen 160 % ceně).

Zcela zásadní jsou i přínosy, které tato technologie přináší v oblasti řízení.

9.5 Řízení

Nevýhodou tradičních trakčních napájecích stanic s transformátory zapojenými do T nebo do V je nízké výstupní napětí, což je způsobeno dvěma vlivy (viz též kapitola 9.1):

- napětí naprázdno nemůže být nastaveno na horní toleranční mez podle ČSN EN 50 163, tedy na $1,1 \cdot U_n = 1,1 \cdot 25\,000\text{ V} = 27\,500\text{ V}$, neboť odbočková regulace transformátoru je poměrně hrubá (po 2 %) a z hlediska svého technického řešení není určena pro časté použití. Navíc napětí v distribuční síti 3 x 110 kV 50 Hz v průběhu dne poněkud kolísá. Napětí na prázdko na výstupu transformátoru je proto fixně nastavováno poněkud níž, než je horní toleranční mez napětí v trakčním vedení (27 500 V), aby ji při výkyvu napětí v distribuční nepřekročilo.

Při zatížení odběrem příkonu je napětí na výstupu trakční napájecí stanice dále sníženo o úbytek napětí na vnitřní impedanci transformátoru, která je relativně velká (v závislosti na okamžité hodnotě proudu a na účinníku). Například ve srovnání se stejnosměrnou trakční napájecí stanicí (měničnou) s dvanáctipulsním usměrněním představuje tradiční trakční transformovna dosti měkký zdroj. Výsledkem je, že z disponibilního úbytku napětí, který skalárně činí 20 % U_n (trvalá horní mez podle ČSN EN 50 163: + 10 %, dolní mez nad zásahem automatického snižování výkonu trakčních vozidel podle TSEI LOC&PAS: - 10 %) se dobrá polovina vyčerpá na trakční napájecí stanici

Skutečnost, že na trakční vedení zbývá jen cca polovina disponibilního úbytku napětí, významným způsobem zkracuje dosah vzdálenosti napájení vozidel z trakční napájecí stanice.

Vnitřní impedance trakčních transformoven 25 kV 50 Hz je ve srovnání s impedancí trakčního vedení relativně vysoká (odpovídá, v závislosti na výkonu transformátoru, například impedanci cca 15 km trakčního vedení na širé trati). To je zásadní rozdíl oproti stejnosměrnému systému 3 kV, u kterého je v důsledku nižšího jmenovitého napětí náhradní vnitřní odpor trakční měničny ve srovnání s odporem trakčního vedení velmi malý (odpovídá, v závislosti na výkonu měničny, například odporu cca 1 km trakčního vedení na širé trati). Vzniká tak efekt povislých záclon (**viz obr. 9.17**)

Stálé napětí

Výstupní charakteristiku měničové trakční napájecí stanice lze SW nastavit různým způsobem. Jedna z možností je konstantní výstupní napětí (například 27 500 V) nezávisle na velikosti zatěžovacího proudu a nezávisle na napětí v distribuční síti a to až do dosažení maximálního výkonu, limitovaného omezením výstupního proudu. Měniče nejsou výkonově přetížitelné, při poklesu zatěžovací impedance přes mezní hodnotu proto dochází k automatickému poklesu jejich výstupního napětí při udržování stálého (mezního) proudu (**viz obr.9.18**).

Výhodou seřízení na konstantní napětí na úrovni horní toleranční meze je možnost využít celý disponibilní úbytek napětí (který skalárně činí 20 % U_n (trvalá horní mez: + 10 %, dolní mez nad zásahem automatického snižování výkonu trakčních vozidel: - 10 %) pro podporu přenosové schopnosti trakčního vedení (vnímáno vektorově $\Delta U = Z \cdot I$). Tím lze získat velký dosah vzdálenosti napájení vozidel z trakční napájecí stanice, nastává efekt zdvižených záclon (**viz obr 9.17**).

Pro zajištění paralelní spolupráce trakčních napájecích stanic bez nežádoucích přetoků výkonu mezi trakčními napájecími stanicemi (respektive mezi body jejich připojení k distribuční soustavě 3 x 110 kV) lze všechny měničové trakční napájecí stanice v dané lokalitě synchronizovat na stejnou fázi. A to zcela nezávisle na jejich vzájemném fázovém úhlu na jejich vstupní straně 3 x 110 kV.

Kompaudace

Řízení trakčních napájecích stanic na konstantní napětí $U = \text{konst.}$ (a to na horní toleranční mezi), tedy tvrdý zdroj napětí, je výhodné z hlediska docílení velké přenosové schopnosti trakčního vedení. Avšak pokud je cílem co nejvíce rovnoměrné zatížení trakčních napájecích stanic (nízký poměr $P_{\text{max}}/P_{\text{stř}}$) je výhodnější měkčí (kompaudovaná) charakteristika simulující vnitřní impedanci $U = U_0 - Z_i \cdot I$ (**viz obr 9.19**). Měkčí charakteristika umožňuje, že do oblasti silně zatížené trakční napájecí stanice pomáhají dodávat potřebný příkon i vzdálenější trakční napájecí stanice. Silně zatížená trakční napájecí stanice s kompaundní charakteristikou totiž automaticky snižuje své napětí a tím vytváří na trakčním vedení spád napětí, potřebný pro přenos proudu (respektive výkonu) trakčním vedením. S ohledem na převážně induktivní impedanci trakčního vedení je však mezi sousedními trakčními napájecími stanicemi trakčním vedením přenášen nejen činný, ale i jalový výkon.

Řízení fázového úhlu

Nevýhodou změkčené charakteristiky je snížení úrovně napětí při větším zatížení, tedy přibližování se oblasti automatického poklesu výkonu vozidel podle TSI LOC&PAS, které nastává již při poklesu napětí pod 90 % jmenovité hodnoty.

Tuto nevýhodu lze odstranit tím, že záměrně vyvolaný solidární tok výkonu trakčním vedením, směřující od méně zatížené trakční napájecí stanice k více zatížené trakční napájecí stanici, není iniciován rozdílem amplitud výstupního napětí trakčních napájecích stanic, ale rozdílem fázových úhlů výstupního napětí trakčních napájecích stanic (**viz obr. 9.20**). Silně zatížená trakční napájecí stanice automaticky mírně zpozdí vektor svého výstupního napětí a tím umožní sousedním trakčním napájecím stanicím poslat do její oblasti část potřebného příkonu pro vozidla.

Na tomto principu lze příznivě ovlivnit, rovnoměrnost zatížení trakčních napájecích stanic (příznivě nízký poměr $P_{\text{max}}/P_{\text{stř}}$), zabránit přílišnému poklesu napětí na výstupu trakční napájecí stanice vlivem práce v režimu omezení proudu, či překročení 15 minutového sjednaného středního příkonu z distribuční sítě. Podobně lze ovlivnit, aby výkon generovaný rekuperačním brzděním prioritně směřoval k dalším vozidlům a aby byly minimalizovány zpětné dodávky přes trakční napájecí stanice do distribuční sítě. Pochopitelně je při tom nutno respektovat limity nejvyššího přípustného napětí na sběrači rekuperujícího vozidla (viz ČSN EN 50 163).

Vektorové řízení

Cíleným koordinovaným řízením jak amplitudy, tak i fázového úhlu výstupního napětí trakčních napájecích stanic lze docílit požadovaných toků činného či jalového výkonu trakčním vedením a tím umožnit buď redistribuci činného příkonu odebíraného z distribuční soustavy jednotlivými trakčními napájecími stanicemi při minimálních ztrátách v trakčním vedení (toto zatěžovat jen činnou složkou proudu). Nebo naopak lze záměrně vyvolávat Jouleovy ztráty v trakčním vedení ($\Delta P = R I^2$) průtokem výhradně jalového vyrovnávacího proudu (generovaného výstupním měničem jedné trakční napájecí stanice a přijímaného výstupním měničem druhé trakční napájecí stanice při odstraňování námrazy či ledovky z vrchního vedení).

9.6 Údržba

Trakční napájecí stanice všech typů obsahují běžné vysokonapěťové komponenty (transformátory, výkonové i bezvýkonové spínací přístroje, měřící transformátory, ...). Měničové trakční napájecí stanice obsahují kromě toho i výkonovou polovodičovou část a její příslušenství. S vývojem techniky je řešeno umístění výkonové polovodičové části v uzavřeném prostoru (u menších výkonů kontejner, u větších výkonů domek) a použití vodního chlazení. Chladiče (výměníky voda – vzduch) jsou umístěny na volném prostranství.

Preventivní údržba je prováděna podle výrobcem předepsaných postupů ve výrobcem předepsaných lhůtách. Korektivní údržba je podpořena diagnostickými systémy a řídí se pokyny výrobce, který též zajišťuje servis.

Náklady na pravidelnou preventivní údržbu		
Druh zařízení	Počet hodin/rok	Náklady za rok [CZK]
Systém řízení a kontroly	14	7000
Měnič	9	4500
Chladicí systém	14	7000
Vstupní/výstupní transformátor	25	12500
Obvod omezení náběhových proudů	6	3000
Pomocné obvody	6	3000
Vzduchové reaktory	1	500
CELKEM	75h/rok	37500,-

V pravidelné preventivní údržbě jsou zahrnuty pouze plánované činnosti a není do ní zahrnuta časová náročnost poruchových stavů. Pravidelná údržba obsahuje provádění následujících činností: vizuální kontrola, výměna periferií (HDD, RAM, filtry) místního řídicího systému, kontrola baterií, kontrola chladicích obvodů, kontrola kabelových koncovek a připojení, kontrola vibrací ventilátorů, kontrola těsnosti chladicího potrubí, kontrola hladiny chladicí kapaliny, kontrola prachových filtrů, kontrola ochran transformátorů, kontrola nádoby transformátoru, kontrola hladiny oleje, kontrola zemnicí sítě, aj.

9.7 Přílohy ke kapitole 9

Příloha 9.1

Transformovna zapojená do T

Příloha 9.2

Dělení trakčního vedení u SpS

Příloha 9.3

Úbytek napětí na výstupu z transformovny v závislosti na proudu při změně účinníku

Příloha 9.4

Úbytek napětí na výstupu z transformovny v závislosti na účinníku při jmenovitém proudu

Příloha 9.5

Transformovna zapojená do V

Příloha 9.6

Dělení trakčního vedení u TNS a SpS

Příloha 9.7

Transformovna zapojená do T s FKZ

Příloha 9.8

Transformovna zapojená do V s FKZ

Příloha 9.9

Zapojení transformátoru s balancérem

Příloha 9.10

Zapojení transformátoru s balancérem a filtrem

Příloha 9.11

Zapojení transformátoru s kaskádou měničů

Příloha 9.12

Spojité napájení trakčního vedení

Příloha 9.13

Měniče – vektorový diagram výkonů

Příloha 9.14

Kaskáda tříúrovňových měničů - ABB

Příloha 9.15

Kaskáda modulárních multilevel měničů - SIEMENS

Příloha 9.16

Zapojení transformátoru s kaskádou měničů a bypassem

Příloha 9.17

Úbytky napětí v trakčním vedení – efekt záclon

Příloha 9.18

Voltampérová charakteristika měniče

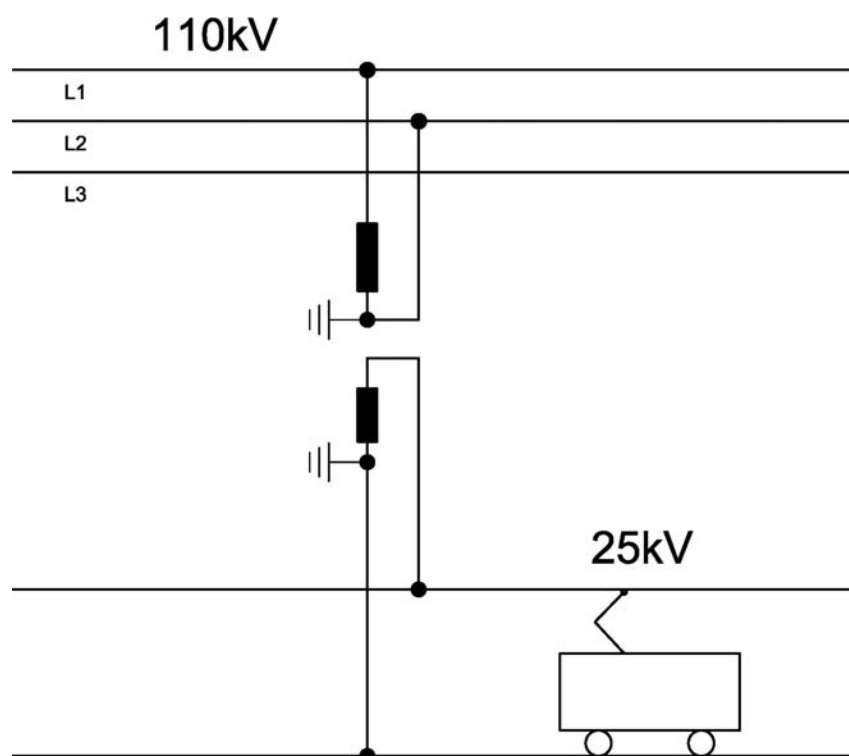
Příloha 9.19

Kompaktní voltampérová charakteristika měniče

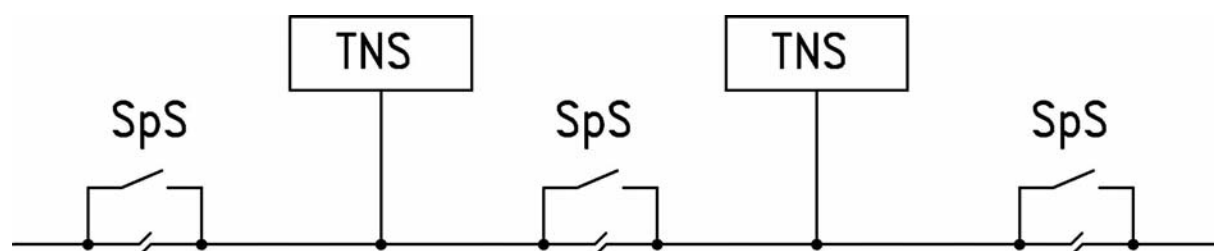
Příloha 9.20

Rozdíl velikosti napětí měničů v závislosti na pootočení úhlu napětí

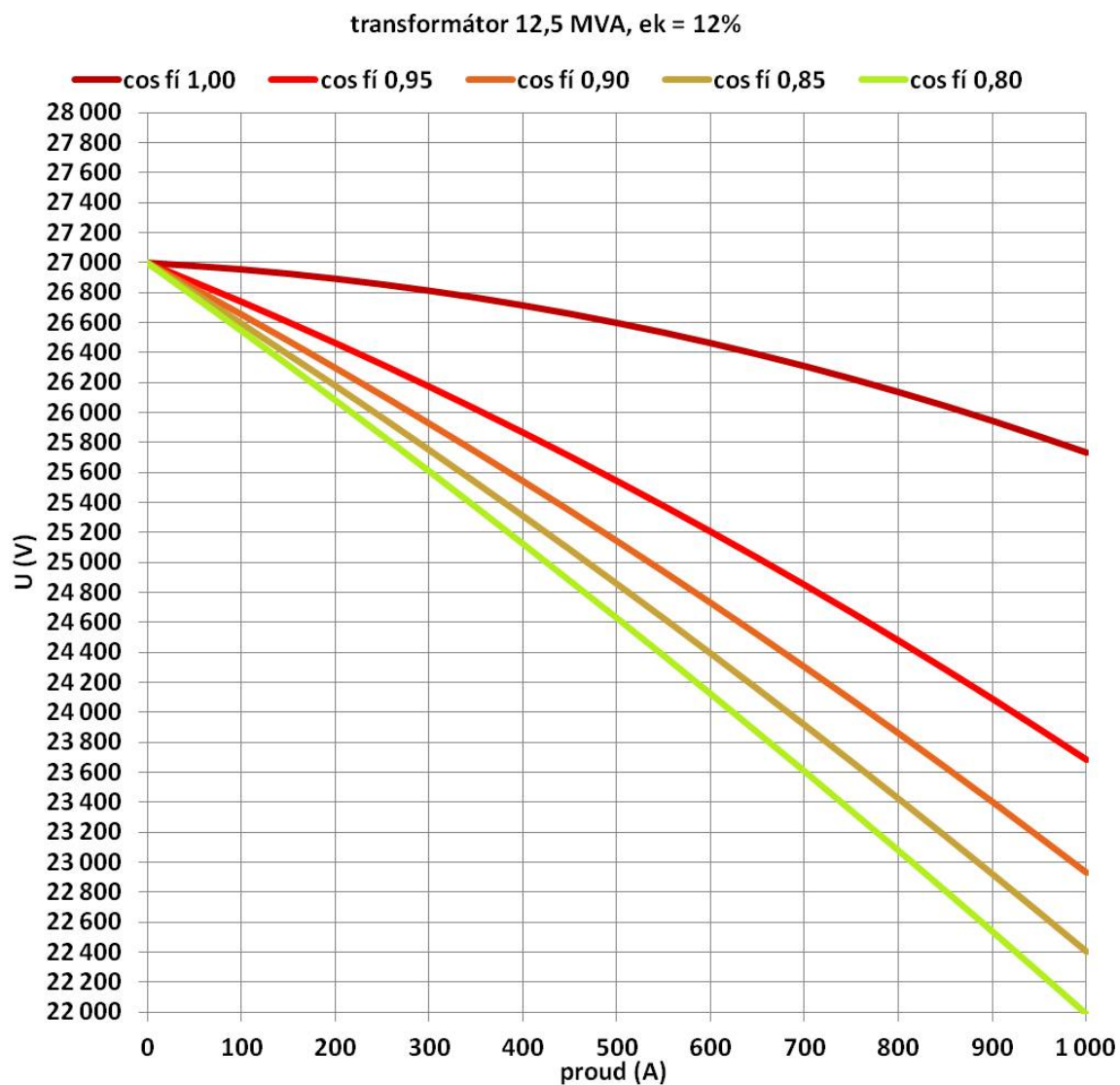
Příloha 9.1 Transformovna zapojená do T



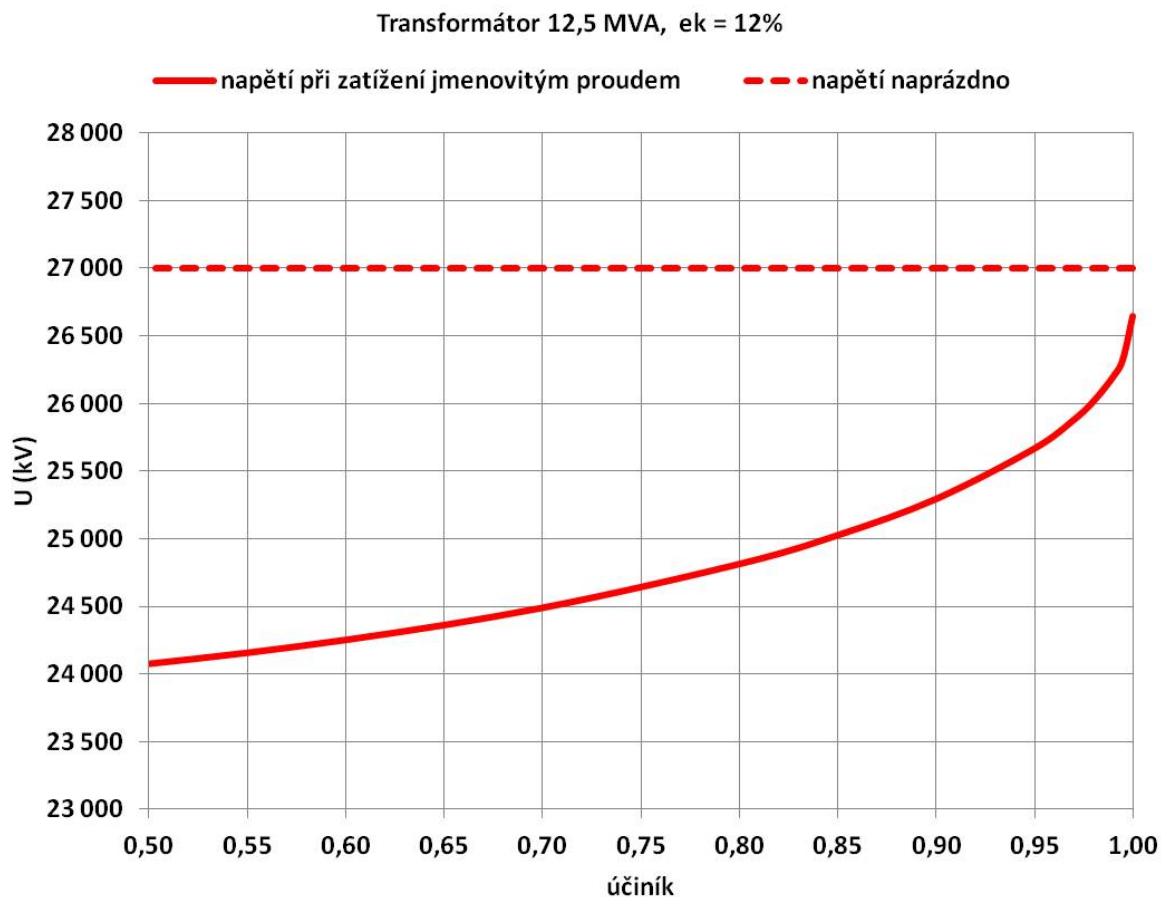
Příloha 9.2 Dělení trakčního vedení u SpS



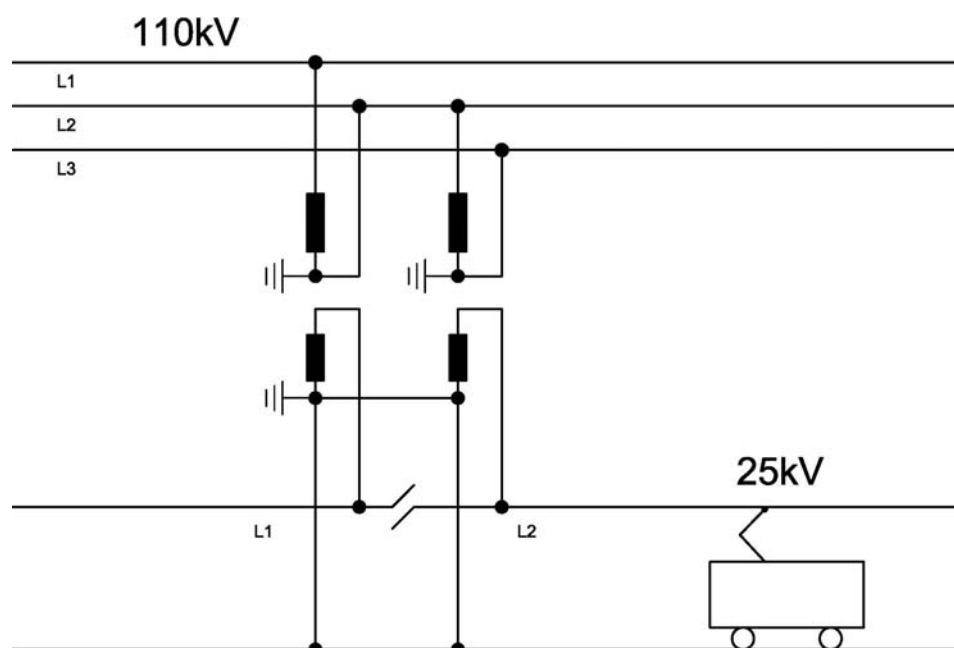
Příloha 9.3 Úbytek napětí na výstupu z transformovny v závislosti na proudu při změně účinníku



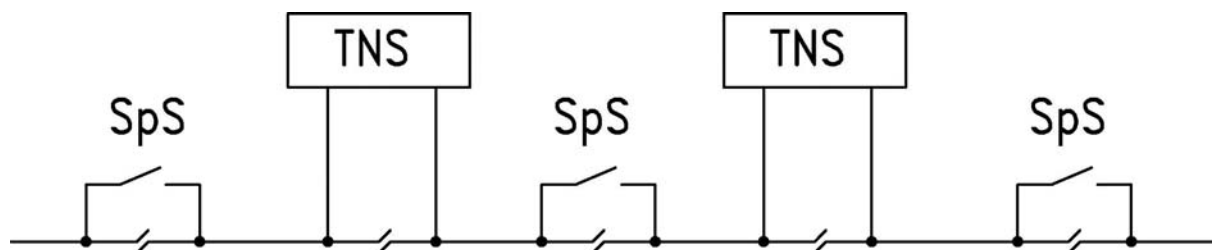
Příloha 9.4 Úbytek napětí na výstupu z transformovny v závislosti na účinníku při jmenovitém proudu



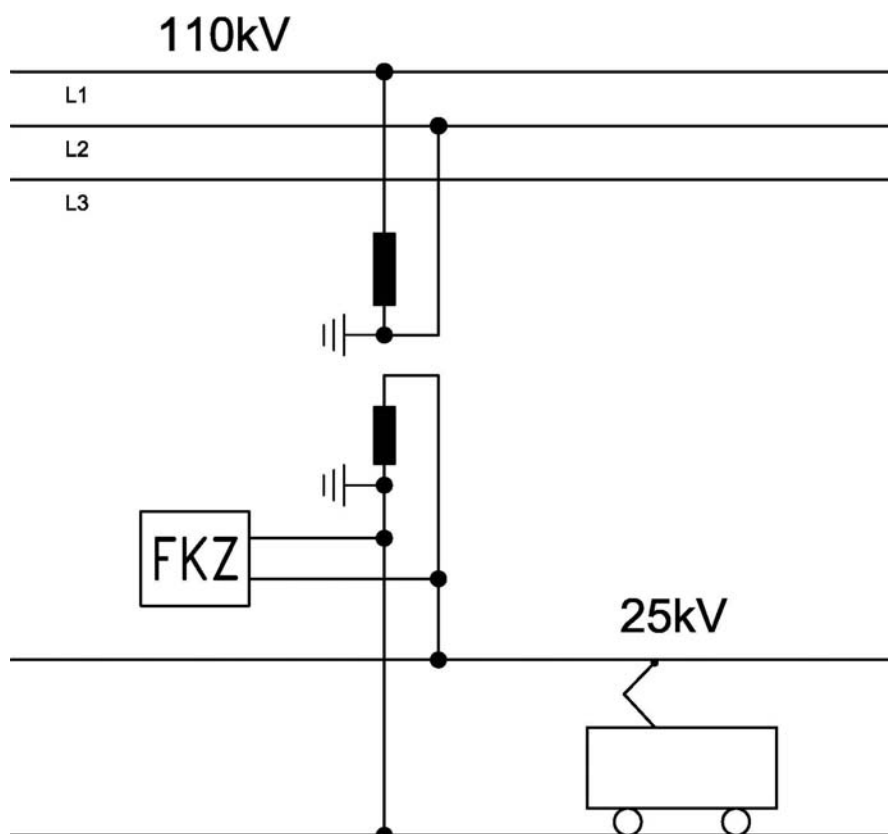
Příloha 9.5 Transformovna zapojená do V



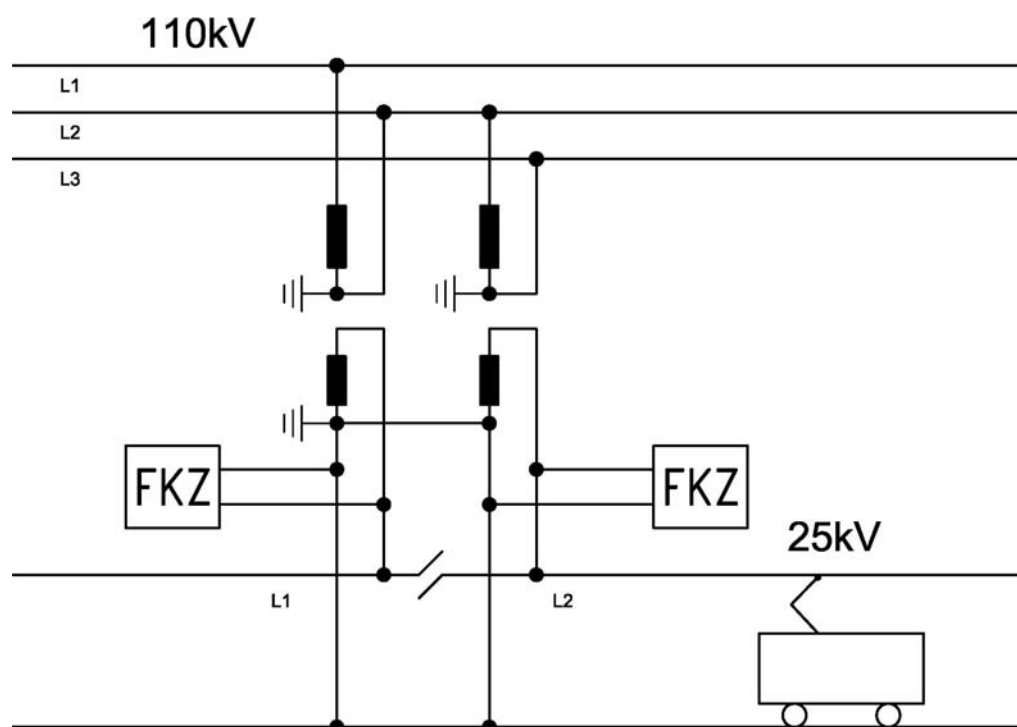
Příloha 9.6 Dělení trakčního vedení u TNS a SpS



Příloha 9.7 Transformovna zapojená do T s FKZ



Příloha 9.8 Transformovna zapojená do V s FKZ



Příloha 9.9 Zapojení transformátoru s balancérem

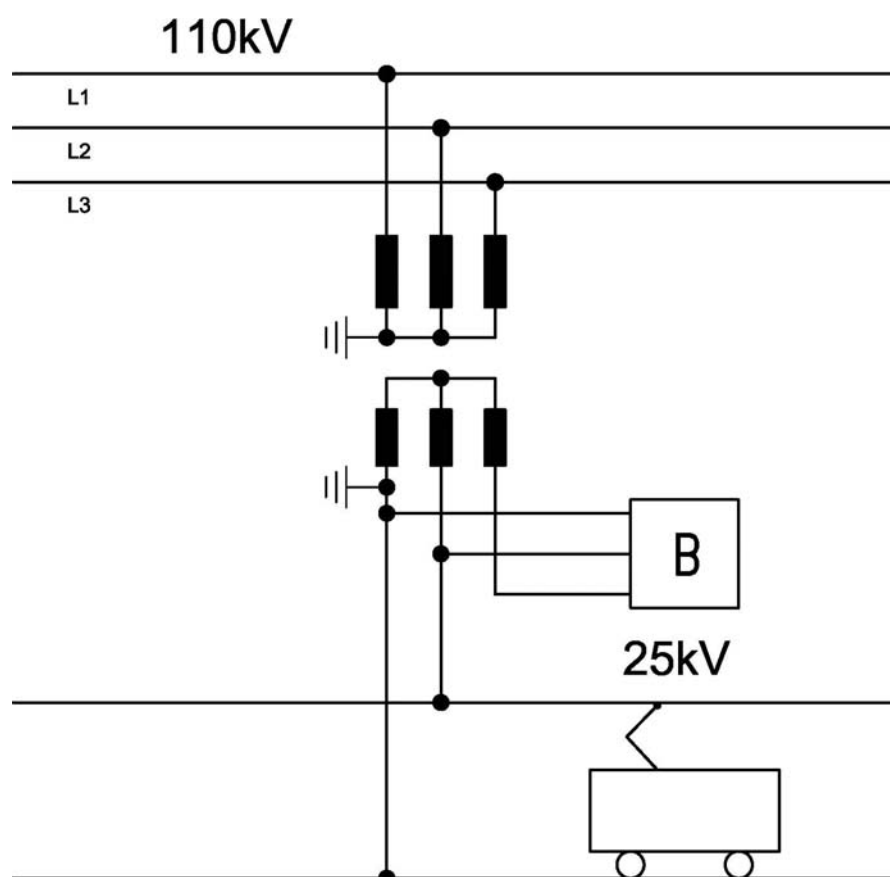
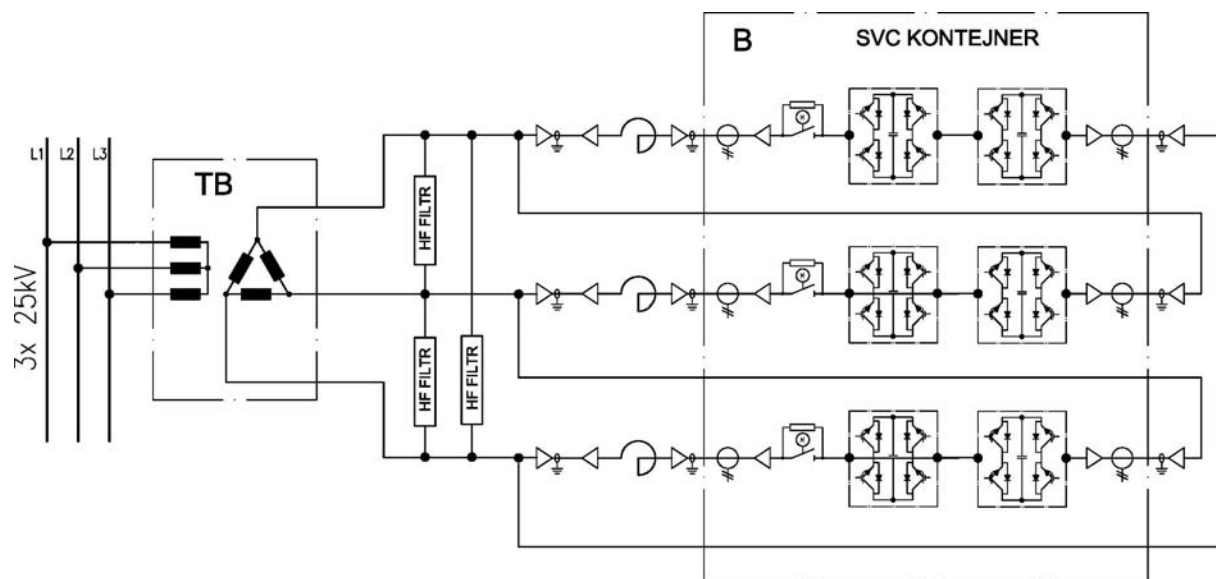
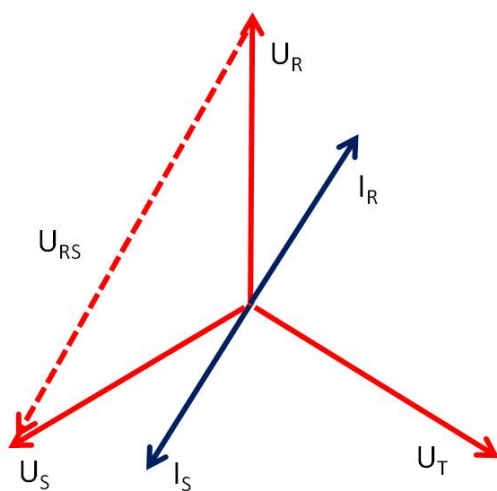


Schéma zapojení aktivního balancéru

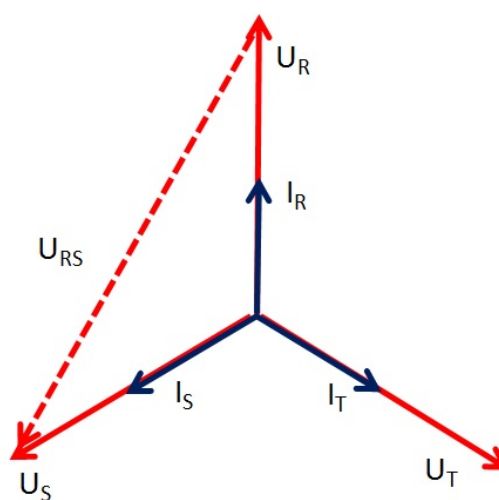


Aktivní balancér – symetrizace zatížení

Vliv balancéru

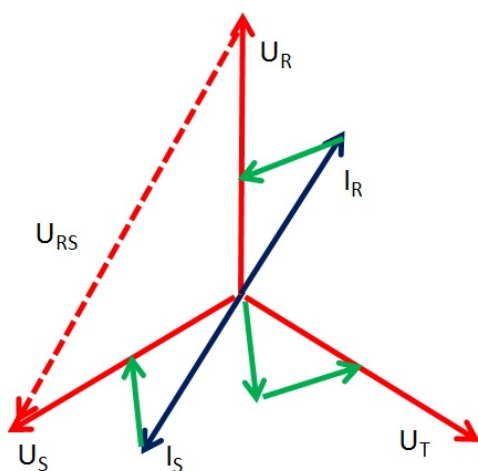


Cílový stav

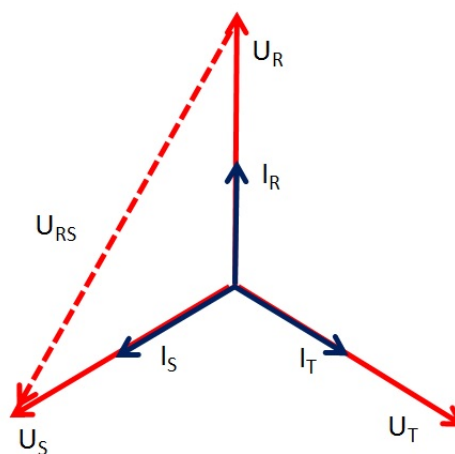


Aktivní balancér – princip kompenzace (0+0=0)

Vliv balancéru

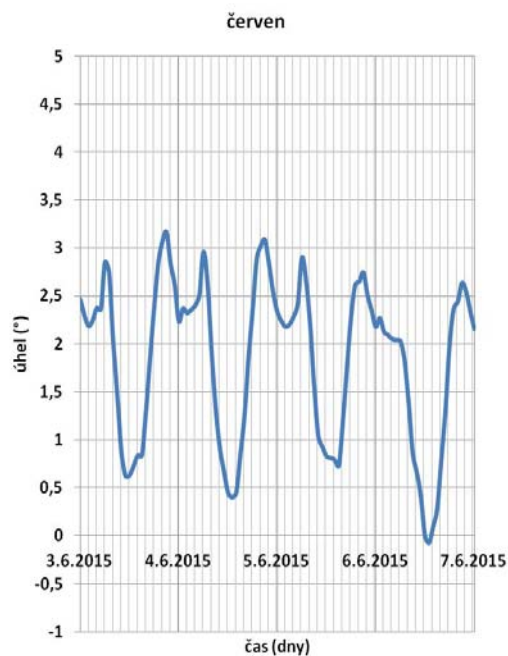


Cílový stav

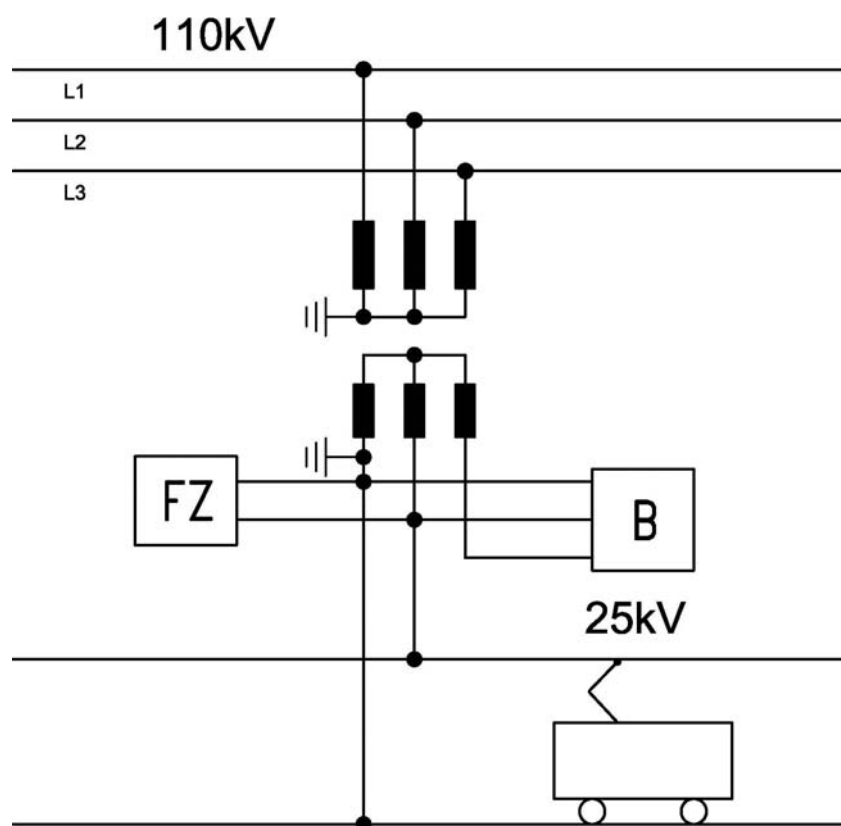


Vliv balancéru

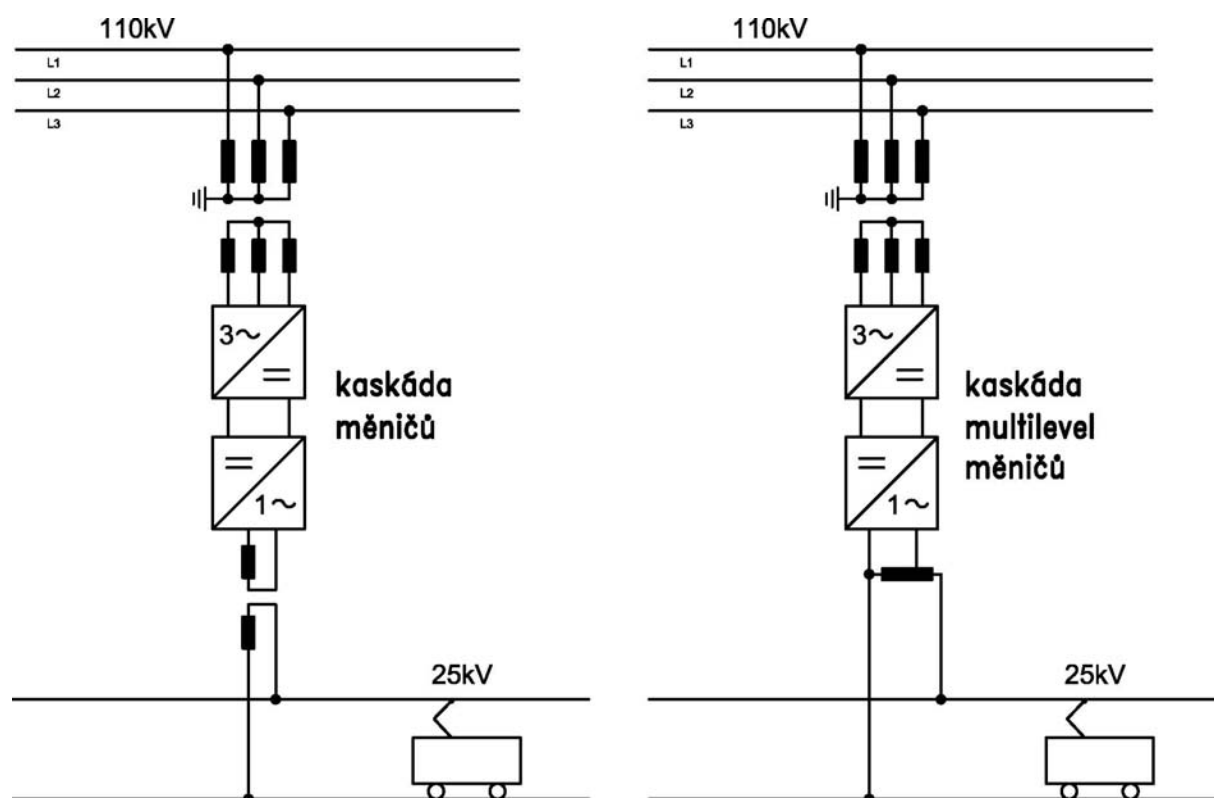
Vliv činnosti FV elektráren na rozdíl fázových úhlů v lokalitách Otrokovice a Nedakonice



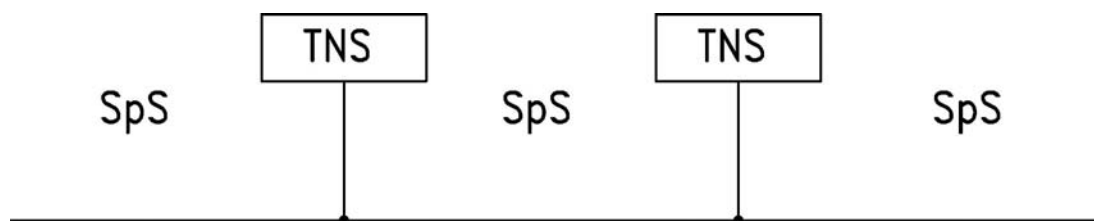
Příloha 9.10 Zapojení transformátoru s balancérem a filtrem



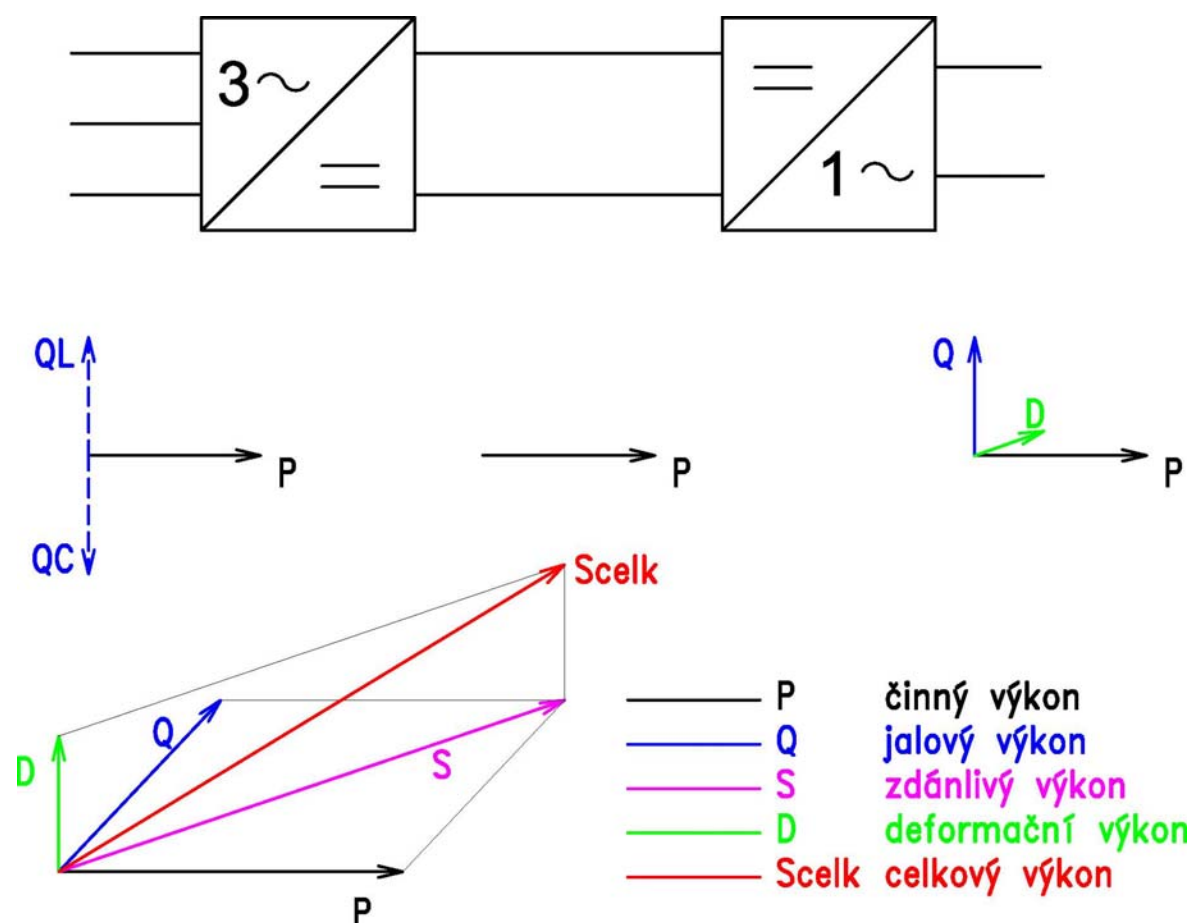
Příloha 9.11 Zapojení transformátoru s kaskádou měničů



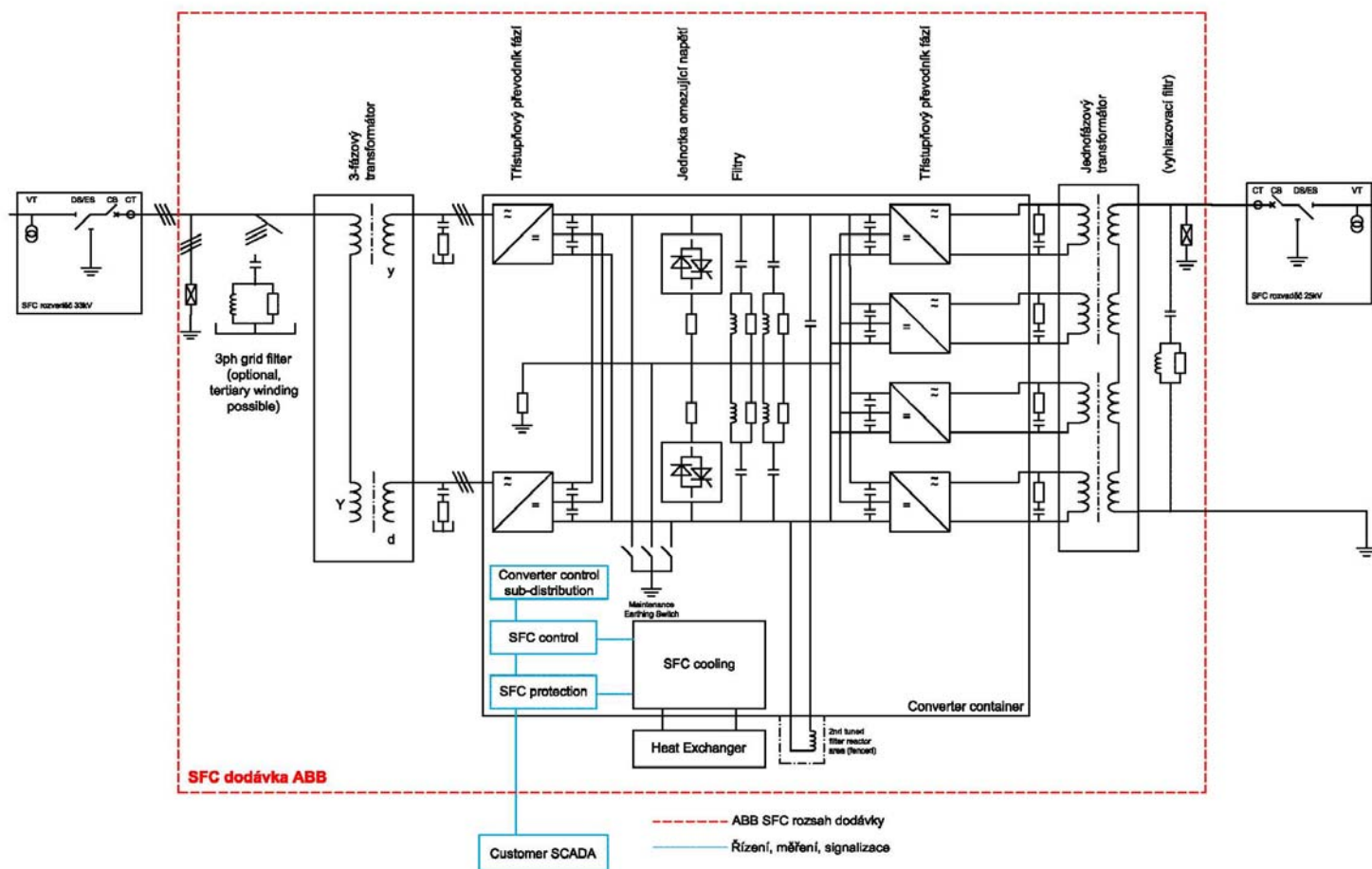
Příloha 9.12 Spojité napájení trakčního vedení



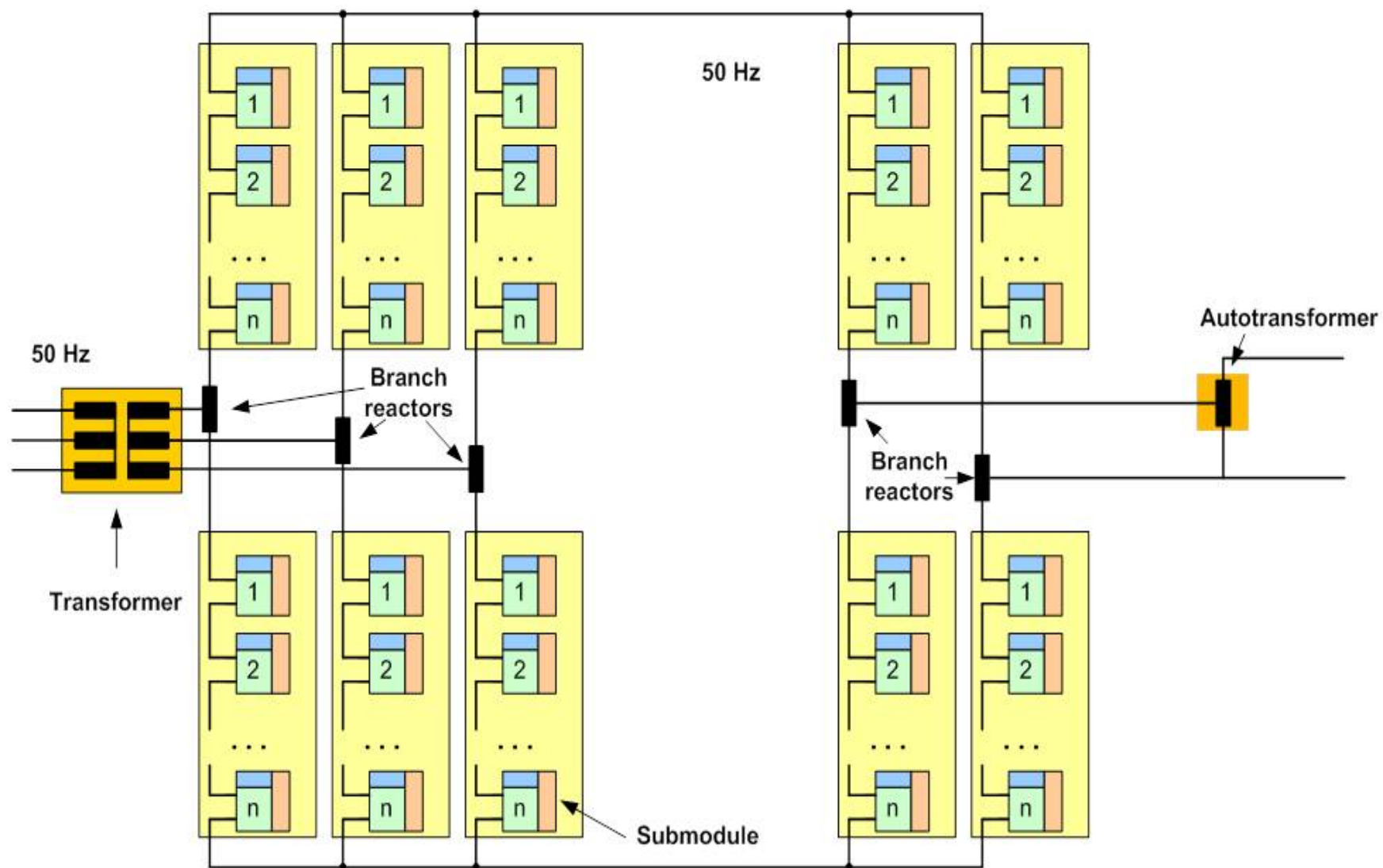
Příloha 9.13 Měníče – vektorový diagram výkonů



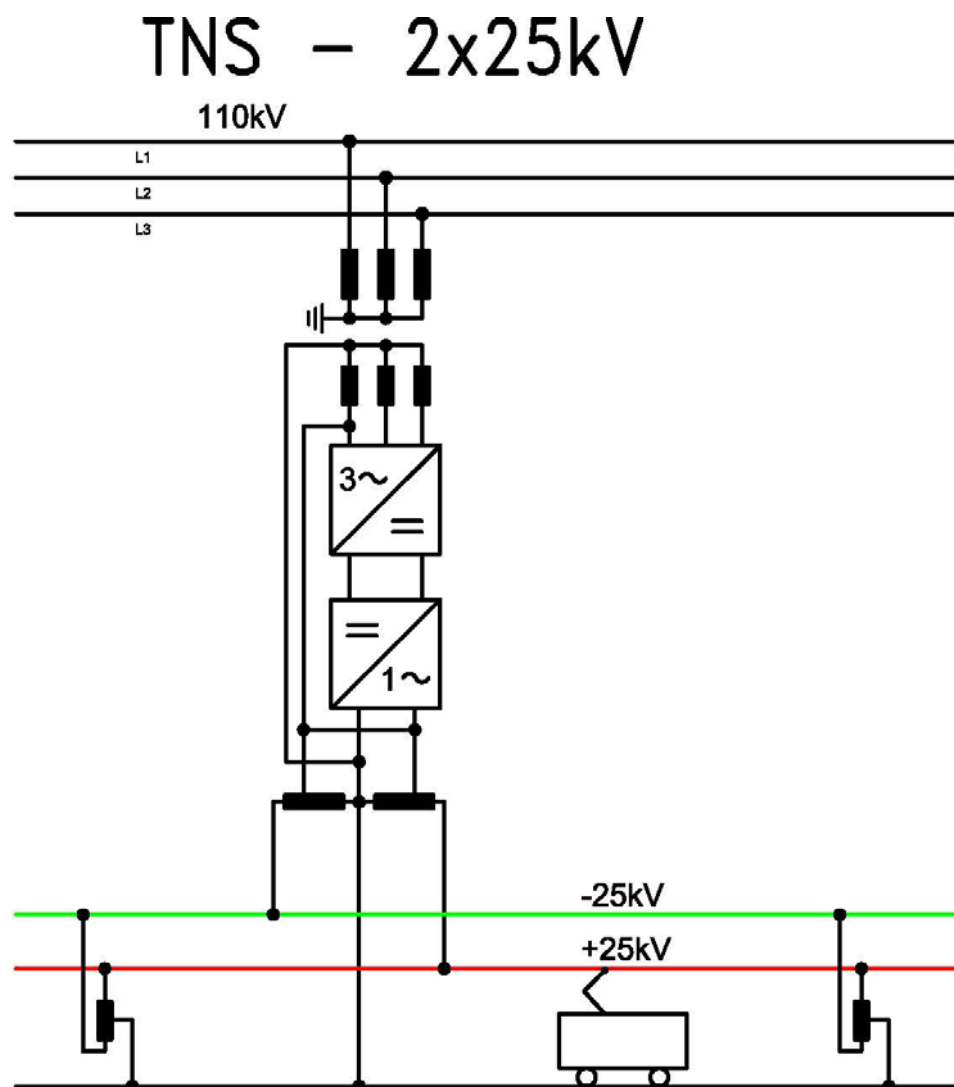
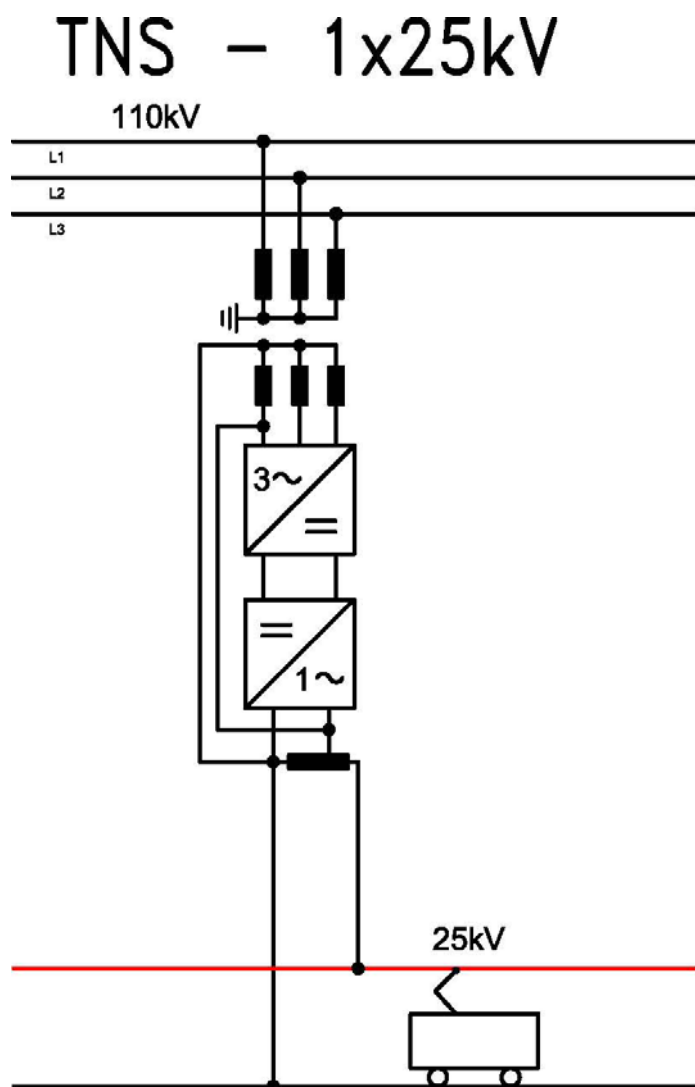
Příloha 9.14 Kaskáda tříúrovňových měničů – ABB



Příloha 9.15 Kaskáda modulárních multilevel měničů – SIEMENS

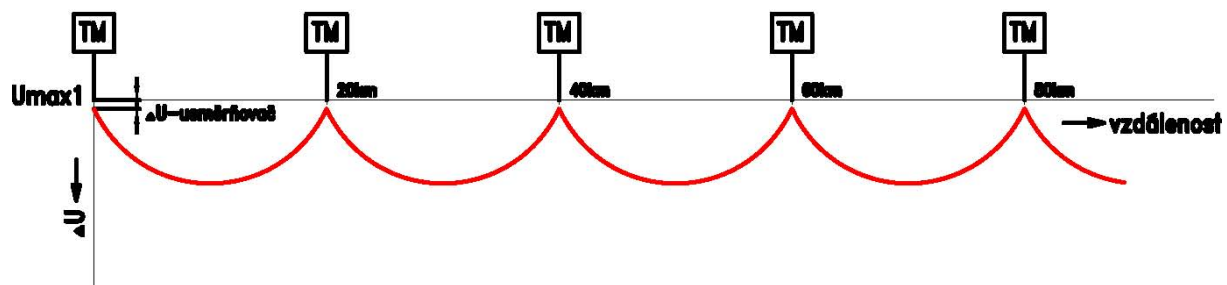


Příloha 9.16 Zapojení transformátoru s kaskádou měničů a bypassem

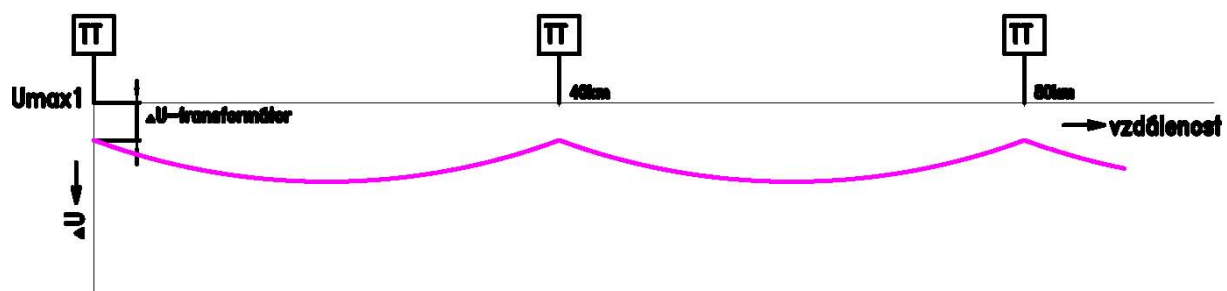


Příloha 9.17 Úbytky napětí v trakčním vedení – efekt záclon

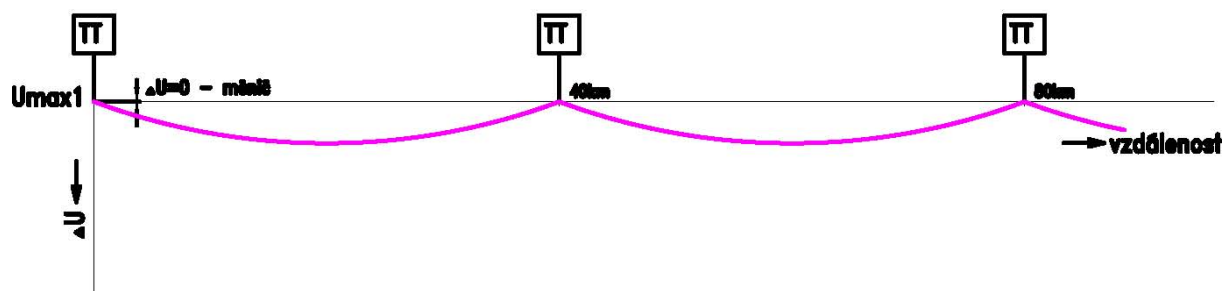
Efekt povislých záclon – 3kVDC



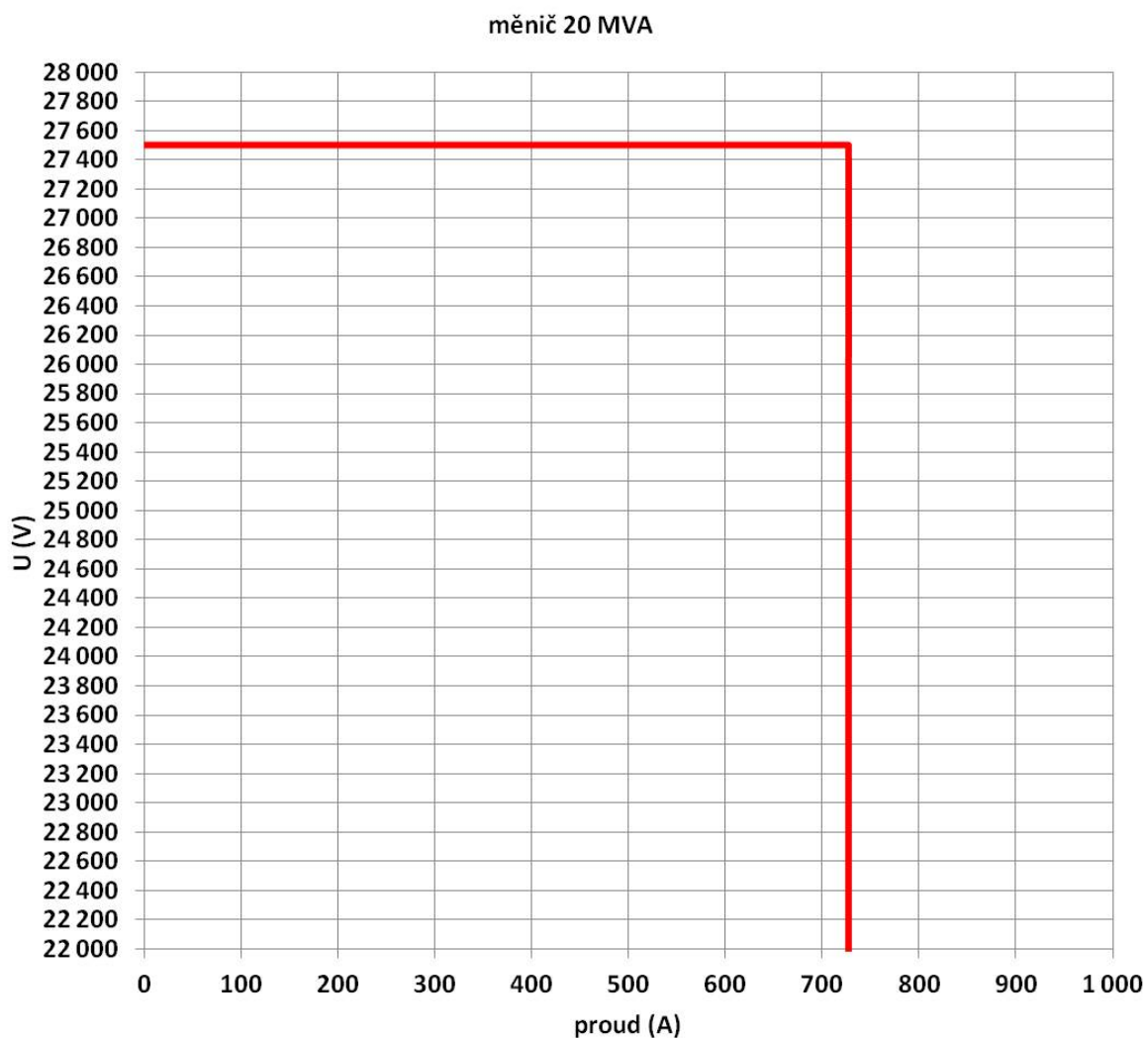
Efekt zdvižených záclon – 25kVAC – transformátor



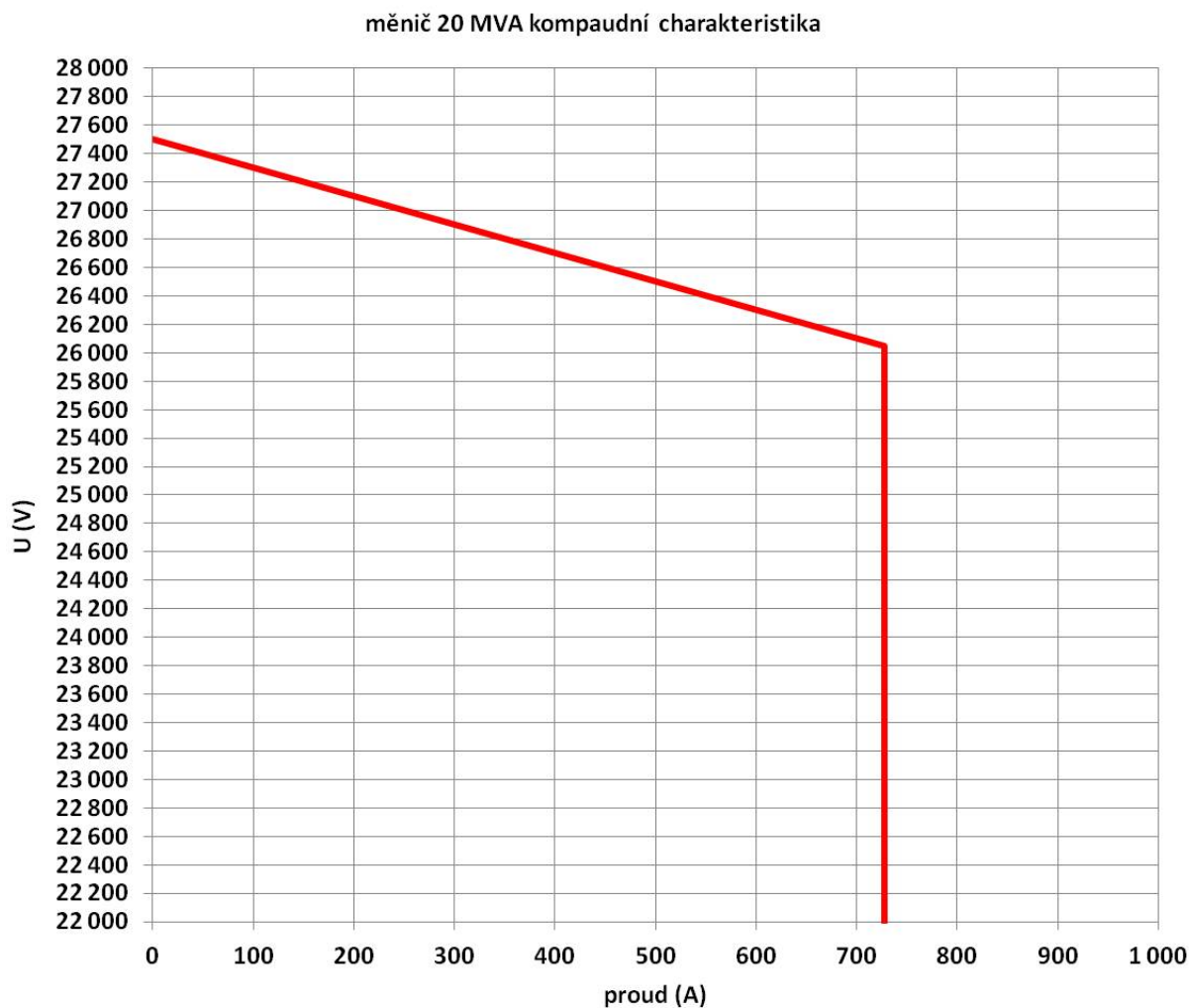
Efekt zdvižených záclon – 25kVAC – měnič



Příloha 9.18 Voltampérová charakteristika měniče



Příloha 9.19 Kompaudní voltampérová charakteristika měniče



Příloha 9.20 Rozdíl velikosti napětí měničů v závislosti na pootočení úhlu napětí

