**Studie „Koncepce přechodu na jednotnou napájecí soustavu ve vazbě na priority programového období 2014-2020 a naplnění požadavků TSI ENE“**

1. **ÚVOD**

*Objednatel* **Česká republika – Ministerstvo dopravy**

*Zpracovatel* **SUDOP Praha a. s.**

**SUDOP Brno, spol.sr.o.**

|  |
| --- |
|  |

**Objednatel:**

Česká republika – Ministerstvo dopravy

nábřeží Ludvíka Svobody 1222

110 15 Praha 1

**Zhotovitel:**

SUDOP PRAHA a.s

Olšanská 1a

130 80 Praha 3

SUDOP Brno, spol. s r.o.

Kounicova 688/26

611 36 Brno – střed

Obsah

[1. Úvod 3](#_Toc456955282)

[2. Napájecí soustavy používané v Evropě 8](#_Toc456955283)

[2.1 Soustavy střídavé 9](#_Toc456955284)

[2.1.1 15 kV, 16,7 Hz (dříve 16 2/3 Hz) 9](#_Toc456955285)

[2.1.2. 25 kV, 50 Hz 10](#_Toc456955286)

[2.1.3 25 kV, 50 Hz systém jednotné fáze 11](#_Toc456955287)

[2.1.4 2 x 25 kV, 50 Hz 12](#_Toc456955288)

[2.2 Soustava stejnosměrná. 13](#_Toc456955289)

[2.2.1 600 V stejnosměrných 13](#_Toc456955290)

[2.2.2 1,5 kV stejnosměrné 14](#_Toc456955291)

[2.2.3 3 kV stejnosměrné 14](#_Toc456955292)

# Úvod

Hlavním cílem studie je, zodpovědět otázku, zda je nutné přejít ze stávajícího systému napájení 3kV na jiný a pokud ano, tak v jakém horizontu. Dále stanovit harmonogram přechodu a finančně tento přechod ohodnotit.

Vláda ČR přijala dne 19.5.2015 Ministerstvem průmyslu a obchodu ČR předloženou Aktualizovanou státní energetickou koncepci (viz Usnesení vlády ČR č. 362/2015). Z té vyplývá, že doprava je významným spotřebitelem energie, na konečné spotřebě energie se podílí 21 % (pro srovnání: vytápění budov spotřebuje 18 % energie). Proto se dopravy citelně dotknou chystané změny v energetické koncepci státu. Ve vládou přijatém dokumentu je stanoveno:

- snížení spotřeby ropných produktů v dopravě z aktuální úrovně 59 miliard kWh/rok v roce 2015 na 50 miliard kWh/rok v roce 2030,

- zvýšení využití elektrické energie v dopravě z aktuální úrovně 2,4 miliard kWh/rok v roce 2015 na 4,3 miliard kWh/rok v roce 2030.

K naplnění cíle státní energetické koncepce ČR nahradit roční spotřebu 9 miliard kWh energie ropných paliv (tedy 900 milionů litrů nafty či benzínu) roční spotřebu 1,9 miliard kWh energie, to znamená 4,6 krát méně, není reálně splnitelný jen prostou náhradou automobilů poháněných ropnými palivy automobily poháněnými elektřinou. V takovém případě by bylo možno počítat s faktorem úspory jen přibližně 2,5 (1 kWh elektrické energie nahradí 2,5 kWh energie ropných paliv), což je dáno poměrem účinnosti elektromotoru a spalovacího motoru. Nikoliv požadovaných 4,6.

Základem proto musí být prioritně převedení dopravy z automobilů poháněných spalovacími motory na elektrifikované železnice. V takovém případě 1 kWh elektrické energie dokáže nahradit 7,5 kWh energie ropných produktů, neboť kromě zvýšení účinnosti (faktor úspory 2,5) působí i efekt poklesu trakční práce převedení dopravy ze silníc na železnice s menším valivým odporem a s menším aerodynamickým odporem vozidel jedoucích v zákrytu (faktor úspory 3), tedy v součinu je dosažen faktor úspory 7,5.

Tato orientace je plně v souladu se strategií EU, která je mimo jiné popsána v dokumentu Evropské komise Bílá kniha – plán jednotného evropského dopravního prostoru (EU KOM (2011) 144). Základem evropské strategie je snížit dosavadní 96 % závislost energií pro dopravu v EU na ropných palivech a jejích náhražkách ve prospěch elektrické energie. K tomu stanoví nástroje, mezi které patří předvedení nákladní dopravy nad 300 km ze silnic na (elektrifikované) železnice, náhrada silniční a letecké přepravy osob na střední vzdálenosti rychlou železniční dopravou či náhrada příměstské automobilové dopravy železnicí.

Velice závažné důsledky pro ČR vyplynou ze závazku, který je obsahem závěrečného protokolu z Pařížské klimatické konference OSN ze dne 12.12.2015, kterou za ČR podepsal v New Yorku (podobně jako zástupci 175 zemí světa) dne 22.4.2016 ministr životního prostředí Richard Brabec. Závazek nezvýšit oteplení Země o více než 1,5 °C až 2 °C znamená již nevyprodukovat spalováním fosilních paliv (uhlí, ropa, zemní plyn) více než 750 až 1 500 miliard t CO2. To při vědomí roční produkce oxidu uhličitého na úrovni roku 2015, která činila 32 miliard t CO2, znamená velmi drastické snižování spotřeby fosilních paliv to až na nulu (cílový stav).

Převod nákladní dopravy ze silnic na železnice je též promítnut do úrovně vládních dokumentů ČR. Usnesení vlád č. 978/2015 (Národní plán snižování emisí) ukládá rezortu dopravy převést do roku 2030 30 % silniční nákladní dopravy na železnici. To při uvážení výchozího stavu (silniční doprava se na přepravních výkonech podílí 72 %, železnice 20 %) a růstových trendů znamená zvýšit do roku 2030 přepravní výkony nákladní železniční dopravy na 273 % přepravních výkonů roku 2015.

Velmi intenzivně se rozvíjí osobní železniční doprava. Od roku 2010 rostou přepravní výkony osobní železniční dopravy v průměru ročně o 5,2 %/rok, což je násobně více, než jak předpokládala Dopravní sektorová strategie (1,2 % /rok) – přepravních výkonů prognózovaných na rok 2025 již bylo dosaženo v roce 2015. Tempo růstu přepravních výkonů osobní železniční dopravy se zvyšuje, mezi roky 2014 a 2015 dosáhl nárůst 7,7 % úrovně roku 2010. A mezi 1. čtvrtletím roku 2015 a prvním čtvrtletím roku 2016 dokonce meziročně o 9,4 %. Výrazný růst střední přepravní vzdálenosti (ze 40 km v úrovni roku 2010 na cca 50 km v úrovni roku 2016) dokládá, že příčinou poptávky ze strany cestujících je dálková železniční doprava.

Zájem dopravců o využití železniční sítě v ČR je velmi nerovnoměrný:

* celostátní tratě sítě TEN-T představují 27 % délky sítě a přitom zajišťují 77 % přepravních výkonů osobní železniční dopravy a 90 % přepravních výkonů nákladní železniční dopravy,
* ostatní celostátní tratě představují 32 % délky sítě a přitom zajišťují 18 % přepravních výkonů osobní železniční dopravy a 8 % přepravních výkonů nákladní železniční dopravy,
* regionální tratě představují 41 % délky sítě a přitom zajišťují jen 6 % přepravních výkonů osobní železniční dopravy a pouze 3 % přepravních výkonů nákladní železniční dopravy.

Jedna část sítě je silně přetížena a dopravci se potýkají s nedostatkem kapacity, druhá část sítě postrádá zájem o přepravu.

Elektrické napájení drah (strukturální subsystém Energie) je výrazným nástrojem k řešení obou uvedených záležitostí:

1. zvýšení výkonnosti pevných trakčních zařízení umožní zvýšený rozsah dopravního zatížení hlavních tratí sítě TEN-T, zejména RFC koridorů podle Nařízení Evropského parlamentu a rady č. 1316/2013. Jde jak o zvýšení dopravní výkonnosti tratí (jízda vlaků v těsnějším sledu, a to i ve vazbě na potenciál možností ETCS), tak i o pokrytí výkonových potřeb těžších vlaků. Vyšší nároky na napájení též souvisí s růstem rychlostí vlaků všech kategorií. Aerodynamická složka jízdního odporu vozidel roste s druhou mocninou rychlosti, výkon potřebný na její překonání roste s druhou mocninou rychlosti, odpovídající výkon roste se třetí mocninou rychlosti a ztráty v trakčním vedení (ri2) rostou dokonce se šestou mocninou rychlosti.
2. Elektrizací dalších tratí s potenciálem růstu přepravních výkonů využít k uspokojení rostoucímu zájmu o železniční dopravu i další část železniční sítě - dosud nelektrifikované železniční tratě a nabídnou na nich rychlejší a levnější dopravu, než jakou umožňuje naftový provoz.

Oba tyto kroky souvisí s přenosovou schopností vedení, tedy se schopností hospodárně přenášet výkon na určitou vzdálenost. Ta je definována poměrem ztrát výkonu k přenášenému výkonu:

p = ΔP / P = RI2 / UI = R . P / U2 = r . L . P / U2

p … poměrné ztráty přenosem energie

ΔP … ztráty přenosem energie

P … přenášený výkon

R … odpor vedení

r … gradient odporu vedení

L … délka vedení

U … napětí

I … proud

Skutečnost, že přenosová schopnost vedení klesá s druhou mocninou napětí, se již v minulosti stala příčinou použití vysokého napětí a to jak v energetice (přenosové i distribuční sítě), tak i na železnici. Přechod ze systému 3 kV na systém 25 kV znamená (při stejné vzdálenosti a stejném odporu vedení) snížení ztrát ve vedení v poměru (25/3)2 =8,32 = 69.

Kromě zásadního snížení ztrát energie v trakčním vedení (které u systému 3 kV činí běžně kolem 20 až 30 %) má přechod ze 3 kV na 25 kV i významný dopad na obě výše popsané záležitosti:

ad a) na hlavních tratích došlo v průběhu času od jejich elektrizace v době před cca 60 lety ke zvýšení rychlosti jízdy vlaků osobní přepravy i nákladních vlaků s důsledkem nutnosti zvýšení jmenovitého výkonu trakčních vozidel z někdejších 2 MW na současných 6 MW, tedy na trojnásobek. Otázka pokrytí tohoto výkonu ze strany pevných trakčních zařízení není dána jen výkonem trakčních napájecích stanic, ale zejména schopností trakčního vedení tento výkon přivést od napájecí stanice k vlaku. Důsledkem nízké přenosové schopnosti vedení jsou vysoké ztráty výkonu a velké úbytky napětí mezi napájecí stanicí a vozidlem (nesplnění požadavků ČSN EN 50 388 na kvalitu napájení) s důsledkem poklesu výkonu vozidle s dopadem na nedodržování jízdním řádem stanovených jízdních dob. Závažným důsledkem výkonového přetěžování systému 3 kV vůči hodnotám, na které byl kdysi dimenzován, jsou i vysoké hodnoty úbytku napětí na kolejnicích, což je i praktickým dopadem zlepšení mechanických vlastností kolejnic legováním oceli, ovšem na úkor snížení jejich elektrické vodivosti. Důsledkem je překračování dovolených hodnot napětí vůči vzdálené zemi podle EN 50 122-1. To má vážné dopady nejen z hlediska bezpečnosti osob, ale i z hlediska iniciace bludných proudů (zemí) a podélných proudů (vozidly vlaků) a vzniku vážných poruch při náhodném spojení kolejnice, respektive s ní spojených vodivých konstrukcí, s ochranným vodičem distribuční sítě 3 x 400 V / 230 V či s uzemněním bleskosvodů. Tyto poruchy mohou mít velmi vážné důsledky (selhání funkce ochrany před nebezpečným dotykem neživých částí, selhání funkce bleskosvodu, požár iniciovaný přetížením vodičů).

ad b) Nízká přenosová schopnost trakčního vedení v systému 3 kV neumožňuje hospodárně elektrizovat jednokolejné, dopravně málo zatížené tratě. Vodiče musí mít velké průřezy (bohatě dimenzované zesilovací vedení), napájecí stanice (měnírny) o relativně vysokém výkonu je nutno budovat blízko sebe, tedy ve velkém počtu. Jejich využití (poměr středního a jmenovitého výkonu) je velmi nízké (jednotky procent). To vytváří velmi špatné podmínky pro rentabilitu projektu elektrizace. Systém 25 kV umožňuje díky své vyšší přenosové schopnosti stavět napájecí stanice na větší vzdálenost a využívat levnější a lehčí trakční vedení. To se projevuje zejména u páteřových tratí. Jsou-li elektrifikovány systémem 25 kV, tak lze okolní tratě do značné vzdálenosti elektrifikovat prakticky jen za náklady na vybudování trakčního vedení, bez potřeby budovat nové napájecí stanice.

Rovněž nelze zapomenout na budování vysokorychlostních železnic podle TSI HS na území ČR ve smyslu nařízení Evropského parlamentu a rady č. 1315/2013, které se již v krátké době stane realitou. Vysokorychlostní tratě přivedou napájecí napětí 25 kV do železničních uzlů Ústí nad Labem, Praha, Přerov a Ostrava. Je velice rozumné, aby byl plán výstavby vysokorychlostních železnic v ČR termínově sladěn s průběhem konverze systému 3 kV na systém 25 kV, aby se předešlo zbytečným investicím do budování stykových míst i provozním komplikacím s nimi spojenými.

Na jednotný napájecí systém 25 kV / 50 Hz je potřebné přejít programově, a to tak, aby bylo optimálně využito již připravovaných modernizačních akcí na trakčním zařízení stávající železniční sítě, i budoucí výstavby vysokorychlostních tratí.

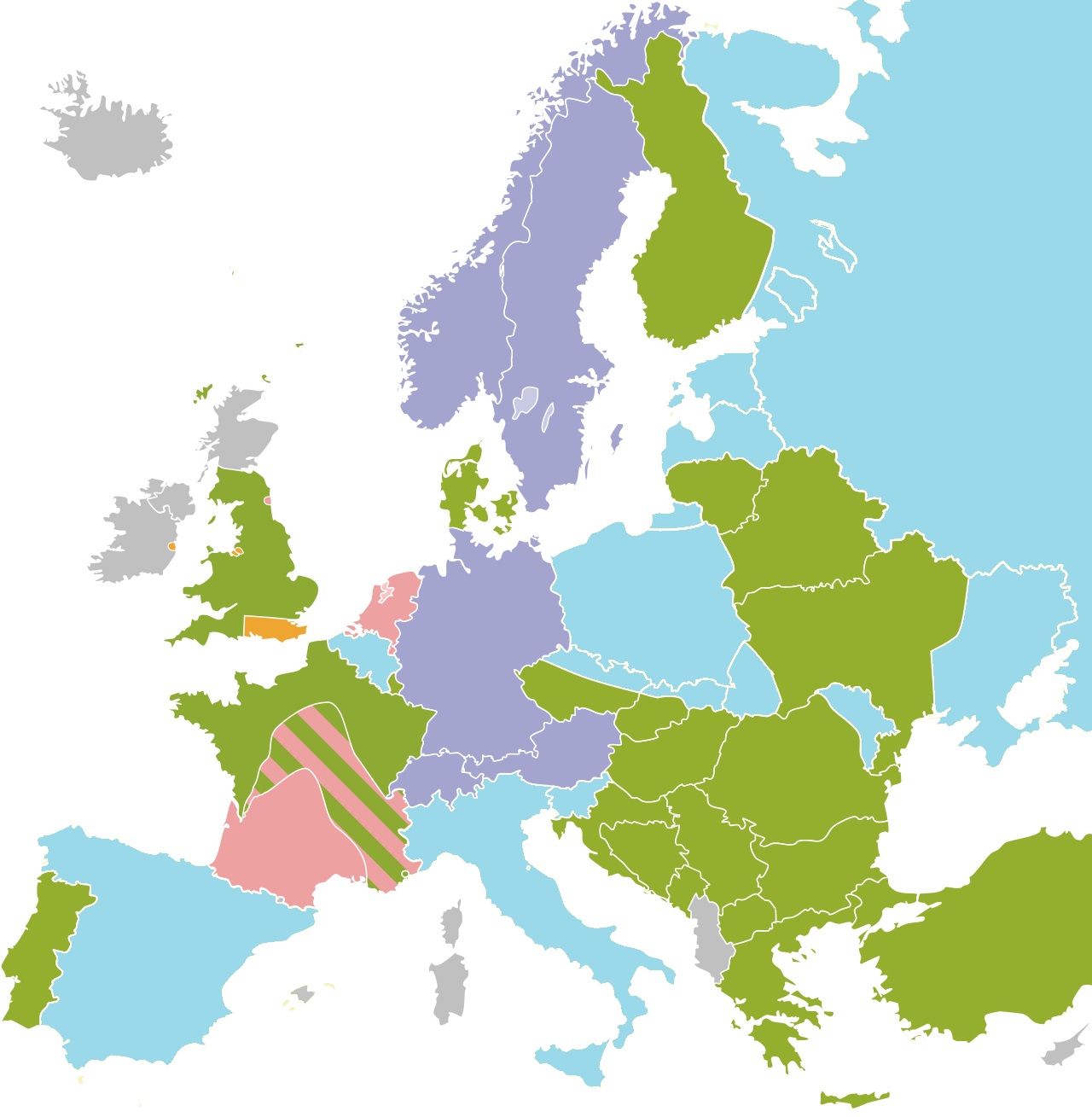
Současně je nutné brát zřetel na existující a potenciální přepravní vazby a provozní možnosti dopravců. Cílem je nalézt takový harmonogram, který bude znamenat jednak akceptovatelný dopad na stávající přepravní vazby zajišťované existujícím vozovým parkem a zároveň umožní maximálně využít výhod střídavého napájecího systému (jak z hlediska dopravců, tak z hlediska správce infrastruktury) pro rozvoj nových, zejména mezinárodních přeprav (převedených ze silniční dopravy na kombinovanou dopravu) na síti nákladních koridorů RFC5, RFC7, RFC8 a RFC9.

Součástí studie jsou potřebné investiční náklady včetně návrhu postupné realizace. V rámci ekonomické části jsou posouzeny ekonomické přínosy včetně návratnosti vložených investic.

# Napájecí soustavy používané v Evropě

Historický stav před zahájením procesu konverze (aktuálně je systém 25 kV též aplikován ve Španělsku, na jihu Francie, v Itálii, Belgii, Holandsku):





Charakteristiky základních napájecích soustav

## 2.1 Soustavy střídavé

Přenos elektrické energie v trakčním vedení se uskutečňuje napětím 10 až 25 kV, takže vodivý průřez trakčního vedení je možné ve srovnání se stejnosměrnými systémy podstatně zmenšit a stavět lehčí trakční vedení. Vzdálenost napájecích stanic je větší, než u stejnosměrných systémů a pohybuje se okolo 50 km podle zatížení trati. Střídavé napájecí soustavy působí rušivě na sdělovací zařízení a způsobuje nebezpečné indukované stavy na vedení podél tratí. Ochrany proti těmto vlivům (stíněné kabely) jsou nákladnější než u soustavy stejnosměrné. Kontinuálně probíhající programový odklon od používání metalických zabezpečovacích a sdělovacích vedení směrem k bezdrátovému přenosu hovorů a informací, jakožto i k optickým vedením, činí tuto komplikaci rok od roku méně významnou. Lze předpokládat, že postupně téměř zanikne. Rušivé vlivy lze potlačit použitím zemního lana. Střídavé systémy negenerují škodlivé bludné proudy, proto je lze uzemnit, což zjednodušuje vedení zpětného proudu, ochranu před nebezpečným dotykem a vazbu na další systémy (bleskosvody, ochranné vodiče v distribučních sítích).

### 15 kV, 16,7 Hz (dříve 16 2/3 Hz)

Střídavé napětí o zvláštní frekvenci 16 2/3 Hz bylo pro napájení elektrických drah zavedeno ve Švýcarsku, Německu, Rakousku, Švédsku a Norsku již počátkem 20. století. Důvody byly technické – tuto frekvenci lze totiž ještě stále transformovat za použití běžných transformátorů a navíc je možno takto nízkou frekvenci ještě přímo použít pro napájení jednofázových komutátorových elektrických motorů bez použití usměrňovače. Tato vlastnost však již u soudobých vozidel se třífázovými frekvenčně řízenými trakčními motory ustoupila do pozadí.

Převádět na lokomotivě střídavý proud na stejnosměrný nebylo dříve snadné, byla k tomu potřeba těžká a rozměrná rotační soustrojí (motorgenerátory) nebo rtuťové usměrňovače, které potřebovaly ke svému provozu vysoký stupeň vakua a byly mechanicky choulostivé. Proto byl kmitočet střídavého napájecího napětí snížen na jednu třetinu. V Evropě tedy z obvyklých 50 Hz na 16 2/3 Hz. Celočíselný poměr 3 byl zvolen z důvodu realizace rotačních konvertorů, a to na bázi šestipólového synchronního motoru a dvoupólového alternátoru. Snížení kmitočtu na jednu třetinu se ukázalo jako rozumný kompromis mezi zvětšením rozměrů transformátorů (ke kterému pochopitelně došlo) a zlepšenou komutací trakčních motorů, které bylo dosaženo s vynálezem komutačních pólů. Nižší kmitočet se též příznivě projevil ve snížení impedance trakčního vedení (induktivní reaktance X = 2 . π . f . L), která zvyšuje přenosovou schopnost vedení. Spolu s použitím dostatečně vysokého napětí napomohl ke snížení počtu napájecích stanic, neboť ty jsou díky poměrně malým úbytkům napětí schopny napájet poměrně dlouhé úseky. K dalším provozním přednostem tohoto systému patří spojité dvoustranné napájení bez střídání fází, které umožňuje budovat levné jednoduché trakční vedení bez neutrálních polí a nepřerušované napájení trakčních vozidel, což je výhodné jak pro trakci (zejména při rekuperačním brzdění), tak pro pomocná zařízení (zejména klimatizaci a kuchyně).

Trakční soustava 16,7 Hz mívá podél trati vlastní přenosové vedení vyššího napětí (tzv. centralizované napájení). Není přímo navázána na třífázovou rozvodnou soustavu 50 Hz. Jedná se tedy o soustavu od rozvodné sítě izolovanou. Výhodou je stejný počet fází v trakčním i přenosovém vedení – odpadají potíže s nerovnoměrným zatížením fází a obchodní bariéry při odevzdávání rekuperované energie.

Rozvoj polovodičové techniky mírně modifikoval jmenovitou hodnotu kmitočtu. Poměr 1 : 3, tedy 16 2/3 Hz : 50 Hz, poplatný době používání rotačních měničů v systému napájení, byl v období elektronických měničů změněn na nesoudělný poměr 16,7 Hz : 50 Hz, a to z důvodu zamezení vzniku nežádoucích rezonančních jevů v rozvodné síti.

V zemích, kde byl tento systém zaveden, je nadále rozšiřován (včetně rozvoje vlastních elektráren, zejména bezemisních), a to i na vysokorychlostních tratích. Jeho objektivní nevýhodou je atypičnost řešení a nutnost vlastní napájecí sítě včetně elektráren.

### 2.1.2. 25 kV, 50 Hz

Proti jiným systémům nebylo nutné budovat měnírny ani zvláštní napájecí síť, trolejové napětí 25 kV bylo získáno pouhou transformací ze všeobecné elektrorozvodné sítě, která se z dnešního hlediska jeví jako nejperspektivnější. Avšak za cenu nerovnoměrného proudového zatížení třífázové distribuční sítě, která způsobuje nesymetrii třífázového napětí. Tato nesymetrie třífázového napětí škodí dalším odběratelům elektrické energie z distribuční sítě (zvýšený ohřev motorů). Proto je možné odebírat z třífázové sítě jen určitou hodnotu výkonu jednofázově, a to v závislosti na impedanci sítě (zkratovém výkonu) v místě odběru. V ČR bývalo dovoleno jednofázově odebírat 2 % zkratového výkonu distribuční sítě, aktuálně je to 0,7 %. Tento trend je dán povinností energetických institucí dodávat odběratelům nezkreslené symetrické třífázové napětí.

Systém 25 kV vykazuje nejmenší ztráty způsobené přenosem a trakční napájení se dá velmi snadno přes transformátory napájet z běžné veřejné elektrorozvodné sítě resp. standardní elektrosoustavy. Problémem je nutnost rovnoměrného zatížení veřejné sítě, proto byly jednotlivé úseky napájeny z různých fází. To vyžaduje rozdělit trakční vedení do kratších úseků, navzájem oddělených neutrálními poli a napájené z různých fází. Toto způsobuje problémy při rekuperačním brzdění, návrat energie do veřejné sítě je nevýhodný, dodavatelé elektrické energie se mu brání z ekonomických i technických důvodů (nárazové dodávky, nízký účiník, deformovaný průběh napětí a proudu), a jiné vozidlo, které odebere dodanou energii, nemusí být v daném úseku k dispozici.

Starší jednofázová vozidla se stejnosměrnými trakčními motory odebírají nikoliv sinusový, ale přibližně obdélníkový proud, který je navíc vlivem indukčnosti fázově posunut. Tím by byla distribuční síť zatěžována vyššími harmonickými složkami proudu (deformačním výkonem) a magnetizačním proudem (jalový výkon). V zájmu dodržení kritérií kvality odběru energie z distribuční sítě je nutno zajistit kompenzaci fázového posunu odebíraného napětí a proudu ze sítě pomocí tzv. filtračně kompenzační stanice (FKZ). Trakční napájecí stanice je připojena jen na jedno sdružené napětí. I prostá činná zátěž způsobuje při takovém připojení fázové posuny proudů vůči fázovým napětím o ±30 °. Přívodním třífázovým vedením mohou cirkulovat jalové i činné výkony. Nesymetrická zátěž má pulzující charakter a současně deformuje kruhové pole ve strojích připojených k síti. Z důvodu různých napětí v připojovacích bodech k distribuční síti 110 kV je v ČR používáno výhradně jednostranné napájení trakčního vedení. To zvyšuje počet míst střídání fází v trakčním vedení na dvojnásobek (u napájecích stanic i uprostřed mezi nimi), což komplikuje trakční vedení i provoz vozidel.

### 2.1.3 25 kV, 50 Hz systém jednotné fáze

Soudobá trakční vozidla se střídavými frekvenčně řízenými trakčními i pomocnými pohony jsou vybaveny vstupními čtyřkvadrantovými měniči. Díky tomu odebírají přibližně sinusový proud, který je ve fázi s napětím, tedy nezatěžují síť jalovým ani deformačním výkonem, nepotřebují stacionární filtračně kompenzační zařízení. Moderní lokomotiva o výkonu 6 MW s AC trakčními motory s účiníkem cca 1 nepředstavuje pro pevná trakční zařízení větší zátěž, než starší lokomotiva o výkonu 4,2 MW s DC trakčními motory a tedy s účiníkem 0,7.

Zvyšování rychlosti jízdy vlaků a s ním spojený růst výkonů vozidel na straně jedné a vyšší nároky na kvalitu odběru energie z třífázové distribuční sítě na straně druhé vedou k nemožnosti připojovat jednoduše jednofázové trakční transformovny s obyčejnými transformátory s jednou fází nebo se dvěma fázemi zapojenými do V k distribuční síti 3 x 110 kV, toto bývalo v minulosti běžné. Ke splnění současného kritéria jednofázového či dvoufázového odběru do úrovně nejvýše 0,7 % zkratového výkonu by vyžadovalo k připojení napájecí stanice o výkonu 16 MVA v daném místě zkratový výkon distribuční sítě 2 286 MVA. Tak velkými zkratovými výkony běžné distribuční sítě 3 x 110 kV nedisponují.

Řešením je použití aktivních balancérů. Jde o vysokonapěťové vícehladinové (mutievel) mezifázové IGBT spínače, které jsou řízeny tak, aby část proudu z fáze, která přímo napájí trakční vedení (například R), byla převáděna do ostatních dvou fází (například S, T).

Přínosy použití balancerů jsou následující:

- možnost zavést (podobně jako v síti 15 kV) i v síti 25 kV systém jednotné fáze (například R – soufázové napájení) místo tradičního systému střídání tří fází R, S, T,

- možnost využívat baláncer i ke kompenzaci jalového odběru,

- možnost využívat balancér ke stabilizaci napájecího napětí 25 kV při změnách napětí v síti 3 x 110 kV a díky tomu přejít dvoustranné, respektive spojité napájení,

- zavedení dvoustranného, respektive spojitého napájení, systému 25 kV

### 2.1.4 2 x 25 kV, 50 Hz

Principiálně se jedná o vedení 25kV s pomocným vedením, které je zavěšeno na trakčních stožárech. Toto vedení (negativní napáječ) je napájeno opačným napětím, tedy střídavým napětím 25 kV, fázově posunutým o 180 ° vůči napětí v trolejového drátu (též bývá nazýváno – 25 kV, respektive mínus 25 kV). Napájecí stanice jsou vybaveny transformátory vvn / 50kV, jejichž jeden konec vinutí je připevněn na trakční vedení a druhý na pomocné vedení. Střed vinutí je propojen s traťovou kolejnicí. Na každých asi 15 km napájecího úseku jsou instalovány autotransformátory 50/25kV, jejichž konce vinutí jsou připojeny na trakční vedení a střed vinutí na kolejnici. Souběžný vodič a trakční vodiče jsou připojeny na na opačné fáze trakčního transformátoru a proti kolejnici mají potenciál 25kV. Vůči vozidlům se proto chová systém 2 x 25 kV stejně jako tradiční obyčejný systém 1 x 25 kV (je s nimi plně kompatibilní), avšak k přenosu energie mezi napájecí stanicí a místem na trati využívá napětí 50 kV. Přenos el. energie, který se uskutečňuje při napětí 50kV umožní ( při zachování stejných poměrných úbytků napětí jako při jednoduchém systému 25kV) prodloužit vzdálenost trakčních napájecích stanic. Teoreticky dochází ke zvýšení přenosové schopnosti trakčního vedení (ve smyslu vztahu: p = ΔP / P = RI2 / UI = R . P / U2 = r . L . P / U2) na čtyřnásobek (dvojnásobné napětí a poloviční proud). Autotransformátory se však neinstalují blízko sebe, v praxi se proto využívá prodloužení na 2,5 násobek oproti tradičnímu obyčejnému systému 25kV.

## 2.2 Soustava stejnosměrná.

Stejnosměrná soustava je charakterizována především tím, že napájecí stanice (trakční měnírny – TM) dodávají do trakčního vedení přímo usměrněný proud. To bylo výhodné v době, kdy vozidla využívala trakční motory, což se postupně stává minulostí – trakční vozidla v celém spektru svých aplikací přecházejí na střídavé frekvenčně řízené trakční a pomocné pohony.

Nevýhodou stejnosměrných systémů je absence transformátoru, tedy orientace na nepříliš vysoké napětí a tedy i velké proudy, přenosová schopnost vedení (p = ΔP / P = RI2 / UI = R . P / U2 = r . L . P / U2) je nízká a ztráty velmi velké. To se zostřuje s růstem výkonů vozidel a se zkracováním intervalů mezi vlaky – účinnost vedení klesá lineárně s růstem výkonů.

Nízká přenosová schopnost trakčního vedení brání nejen zvyšování výkonů vozidel, ale i efektivnímu využití rekuperačního brzdění. Vozidla jsou si schopna předávat energii jen na dosti malou vzdálenost a běžné (diodové) měnírny neumí předat přebytečnou energii zpět do distribuční sítě.

Zdokonalováním konstrukce trakčních motorů se postupně přešlo z nižších napětí až na 3kV. Zvyšování napětí sledovalo možnost snížit vodivý průřez trakčního vedení, zmenšit ztráty ve stejnosměrném rozvodu, a tedy zvětšit vzdálenosti napájecích bodů. Avšak s příchodem výkonnějších vozidel nastal trend opačný – zvyšování vodivého průřezu zesilovacím vedení a snižování vzdálenosti napájecích stanic vkládáním dalších měníren.

Další nevýhodou stejnosměrných systémů jsou škodlivé bludné proudy (zemí) a podélné proudy (vozidly), které poškozují kovové konstrukce. Ochranná opatření k omezení jejich vzniku neumožňují kolejiště uzemnit, což má zásadní negativní vlivy na řešení ochrany před dotykem kolejnic i neživých částí v sítích 3 x 400 V / 230 V i v řešení ochrany proti zásahu blesku do kolejnic i v řešení bleskosvodů na okolních objektech.

V současnosti z železnic stejnosměrné systémy postupně programově mizí. Doménou aplikace stejnosměrných systémů zůstává městská doprava, a to z bezpečnostních důvodů a pro malé vzdálenosti, na kterých jsou městské systémy provozovány.

### 2.2.1 600 V stejnosměrných

Tato soustava se využívá především pro městské tramvajové systémy a pro trolejbusy (dvoustopé vedení). Navzdory nízkému výkonu vozidel bývá vzdálenost měníren jen cca 3 až 5 km.

750 V stejnosměrných

Tato soustava se využívá především pro metro (přívodní kolejnice), městské tramvajové systémy a pro trolejbusy (dvoustopé vedení). U systémů metra je s ohledem na vyšší výkony vzdálenost měníren jen 1 až 2 km (jsou téměř v každé stanici). Anachronismem je použití tohoto systému na příměstských železnicích na jih od Londýna.

### 2.2.2 1,5 kV stejnosměrné

Napětí této soustavy bylo dáno nižší úrovní elektrotechniky v některých zemích počátcích rozmachu elektrizace železnic, t. j. přibližně v období mezi světovými válkami. V zemích, kde je tato soustava rozšířená (Francie a Holandsko), přináší problémy – i přesto, že se na hlavních kolejích používají zdvojené trolejové dráty a přídavné nosné lano (vodivý průřez přes 1 000 mm2) i velmi malá vzdálenost měníren, není tato soustava schopná již zvládat výkony dnes požadované. Moderní vícesystémová vozidla na ni vesměs pracují výrazně sníženým výkonem (ve srovnání se systémy 3, 15 a 25 kV zhruba polovičními). Zejména při budování vysokorychlostních železnic je nahrazována systémem 25 kV. Na našem území je takto elektrizována trať Tábor–Bechyně.

### 2.2.3 3 kV stejnosměrné

Napětí 3 000 V představuje prakticky hranici stejnosměrné soustavy, vyšší napětí by bylo obtížně zvládnutelné jak z hlediska izolačního stavu trakčního obvodu včetně motorů, tak i napětí mezi lamelami komutátorů trakčních motorů. Výhodou tohoto systému bývala jednoduchost vozidel, ta však pominula koncem minulého století s příchodem vozidel s technikou střídavých trakčních a pomocných pohonů. K nevýhodám patří vysoké ztráty ve vedení a jeho nízká přenosová schopnost, která brání využít plný výkon současných vozidel a omezuje použití rekuperačního brzdění. Problematické jsou zejména velké železniční stanice, ve kterých se často rozjíždějí vlaky a přitom jsou hodně vzdáleny od měníren (Pardubice, Olomouc, …). Dále je zde omezení přenášeného výkonu limitem proudu, který je schopná tato soustava přenést k vozidlu a přes sběrač na vozidlo. Vyžaduje na zatížených tratích cca 400 mm2 průřezu měděných vodičů a trakční měnírny v průměrných vzdálenostech 20 km ( při kontrole dotykového napětí se tato vzdálenost zkracuje na polovinu) . U této soustavy je nutné zabezpečit ochranu kovových prvků v okolí tratě před účinky bludných proudů. Průřez trolejového drátu je proti střídavé soustavě větší, avšak ani tak není schopná přenést srovnatelný výkon.

|  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| Porovnání různých systémů napájení drah | Systém | | | | | |
| DC | DC zes | AC | | | |
| 3 kV | 3 kV | 25 kV 50Hz | 25 kV R | 25 kV R stab | 2x25 kV 50Hz |
| ztráty ve vedení při odběru proudu (100 % = příkon DC vozidla) | 22,0% | 10,0% | 1,5% | 1,5% | 1,0% | 0,5% |
| ztráty ve vedení při rekuperaci | 2,0% | 0,5% | 0,5% | 0,5% | 0,3% | 0,2% |
| ztráty v brzdových odporních | 11,0% | 20,0% | 0,0% | 0,0% | 0,0% | 0,0% |
| ztráty v transformátoru | 0,0% | 0,0% | 5,0% | 5,0% | 5,0% | 5,0% |
| ztráty celkem | 35,0% | 30,5% | 7,0% | 7,0% | 6,3% | 5,7% |
| možnost uzemění kolejnic | ne | ne | ano | ano | ano | ano |
| poškozování konstrukcí v zemi bludnými proudy | ano | ano | ne | ne | ne | ne |
| poškozování vozidel podélnými proudy | ano | ano | ne | ne | ne | ne |
| přenosová schopnost vedení | nízká | nízká | vysoká | vysoká | vysoká | vysoká |
| následné mezidobí | velké | velké | malé | malé | malé | malé |
| limitní vzdálenost napájecích stanic | cca 25 km | cca 12 km | cca 45 km | cca 60 km | cca 60 km | cca 80 km |
| symetrický odběr z 3 AC distribuční sítě | ano | ano | ne | ano | ano | ano |
| potřebný zkratový výkon 3 AC distribuční sítě z hlediska nesymetrie | ne | ne | 1 až 2 GVA | ne | ne | ne |
| možnost rekuprace do 3 AC distribuční sítě | ne | ne | ano | ano | ano | ano |
| vzdálenost možné rekuprace mezi vozidly | omezena | velmi omezena | 22 km | 60 km | neomezena | neomezena |
| spojité napájení trakčního vedení | ano | ano | ne | ano | ano | ano |
| dvoustranné napájení trakčního vedení | ano | ano | ne | ne | ano | ano |
| omezení napáječových proudů zktratovými poměry v trakční síti | ano | ano | ne | ne | ne | ne |
| možnost hvězdicovitého napájení | ano | ano | ne | ano | ano | ano |
| nutnost neutrálního pole v trakčním vedení u napájecích stanic | ne | ne | ano | ne | ne | ne |
| nutnost neutrálního pole v trakčním vedení uprostřed mezi nap. st. | ne | ne | ano | ano | ne | ne |
| nutnost vypínání proudu vlaku u napájecích stanic | ne | ne | ano | ne | ne | ne |
| nutnost vypínání proudu vlaku uprostřed mezi napájecími stanicemi | ne | ne | ano | ne | ne | ne |
| možnost stabilizace výstupního napětí napájecí stanice | ne | ne | ne | ano | ano | ano |
| možnost řízeného rozmrazování trakčního vedení vyrov. proudy | ne | ne | ne | ne | ano | ano |