

Klasická koncepční otázka se po sto letech vrací: je lepší střídavý či stejnosměrný proud? *aneb co by tomu Křížík řekl...*

Miroslav Vítek
ČVUT v Praze, Fakulta elektrotechnická

Třífázový střídavý rozvod má nižší hladinu entropie čili vyšší míru uspořádanosti oproti stejnosměrnému rozvodu, protože kromě energie distribuuje i informaci o smyslu a rychlosti otáčení generátorů pracujících do soustavy.

Historický vývoj

Na konci devatenáctého století se rozpoutala diskuze kolem otázky, zda je lepší rozvádět elektrickou energii již zavedeným a jednodušeji myšlenkově uchopitelným stejnosměrným proudem a nebo nově nastupujícím proudem střídavým, když další komplikací u střídavého proudu byla i volba optimální frekvence, tedy rychlosti otáčení rotorů alternátorů pracujících do elektrizačních soustav.

Elektřina byla zprvu v 19. století využívána především k přepravě informací na dálku pomocí elektromagnetického telegrafu, tzn. sloužila k napájení telekomunikačních zařízení. Jako zdroje se používaly primární chemické články produkující stejnosměrný proud. Ty se sestavovaly do baterií pro dosažení potřebného napětí a proudu.

Po objevu elektrodynamického způsobu výroby elektřiny přeměnou z mechanické pohybové energie v generátorech, které se nazývaly dynamy (1866), protože byly vybaveny komutátory pro usměrnění jinak střídavého proudu, byly získány dostatečné výkony k použití elektřiny jako nejvyšší formy energie, která může být snadno, tzn. relativně levně, bezpečně a bez velkých ztrát dopravována z centrálního zdroje k místům spotřeby pro zpětnou přeměnu na pohyb, teplo či světlo. Používání elektřiny se začalo rychle rozvíjet a elektřina začala vytlačovat svítivý plyn jako zdroj světla z domácností a transmise z továren. Podobně jako i v jiných oborech lidské činnosti se zde začaly projevovat úspory z rozsahu. Velkovýroba je na jednotku produkce levnější než malovýroba, což platí zejména v síťových odvětvích. Rozvoj elektroenergetických sítí však hned od počátku narazil na základní problém spočívající ve faktu, že ztráty ve vodiči rostou s kvadrátem přenášeného proudu a úbytek napětí roste s délkou a zatížením vedení. Výstavbu velkých, a tím pádem na jednotku výroby levnějších elektráren brzdila omezená donosnost stejnosměrných vedení. Dynamo byla konstruována na maximální napětí 3 kV, jinak vznikala obtížně překonatelné problémy s jiskřením na komutátorech. Takto vysoké napětí bylo pro napájení domácích spotřebičů velmi nebezpečné, a proto se problém s bezztrátovým snížením stejnosměrného napětí řešil např. tak, že se u spotřebitelů v domě vysokým stejnosměrným napětím nabíjela akumulátorová baterie s mnoha články v sérii a každá domácnost, či dokonce spotřebič byl zásobován individuálním vedením vyvedeným z určitých článků baterie s příslušným napětím potřebným pro spotřebič či skupinu paralelně zapojených spotřebičů.

Výhodou bylo vyšší zabezpečení dodávky a lepší využití výkonu dynamy díky naakumulované energii v baterii, nevýhodou velice komplikovaná konfigurace vedení s obtížnou rozšiřitelností a údržbou a velké ztráty energie v systému, čili obecně - vysoká nákladnost tohoto způsobu zásobování elektřinou.

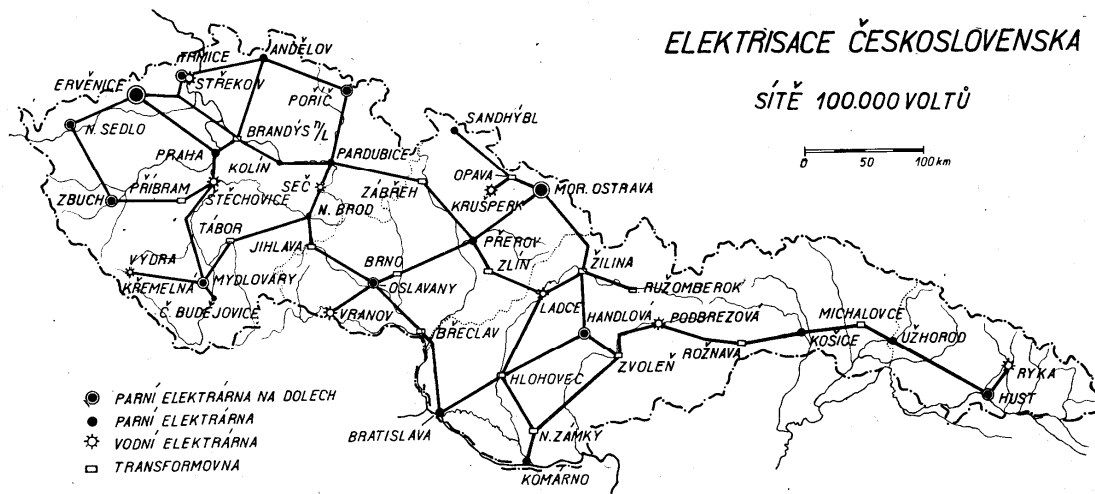
Jestliže ve stejnosměrných sítích byla stěžejní volba optimálního napětí, protože jeho změna byla obecně velmi nákladná (ztráty na odporu nebo drahá baterie s nízkou životností), ve střídavých sítích byl základní problém ve volbě frekvence. Změnu napětí bez velkých ztrát vyřešil transformátor. Díky němu byl umožněn přenos elektrické energie na větší vzdálenosti, protože bylo možno snadno a levně zvýšit napětí pro dálkové vedení, které lze potom opět snadno transformovat dolů pro bezpečnou spotřebu u konečných odběratelů. Čím vyšší frekvence, tím snadnější a levnější transformace, na druhou stranu větší problém s induktivní reaktancí vedení, a tím stabilitou přenosu na větší vzdálenosti. Koncem 19. století bylo postaveno mnoho střídavých sítí v Evropě i Americe využívajících celou řadu hodnot kmitočtu od 16 do 133 Hz podle účelu, ke kterým byly určeny. Obecně platilo, že pro potřeby osvětlení na veřejných prostranstvích či v domech byla používána vyšší frekvence z důvodu levnější transformace napětí pro různé spotřebiče s činným odporem. Naopak pro účely pohonů byla výhodnější nižší frekvence, také otáčky hydroalternátorů jako prvních výkonnějších zdrojů střídavé elektřiny byly nízké. Propojení sítí s různým kmitočtem bez použití drahých a ztrátových konvertorů, tedy soustrojí typu Ward-Leonard, umožňující změnu kmitočtu bylo nemožné. Pro účely všeobecné elektrizace se bylo třeba dohodnout na určité frekvenci, díky které budou moci alternátory v sítích i různých napětí spolupracovat. To byl kardinální problém, protože každý producent prosazoval svou koncepci.

Spor o frekvenci nahrával zastáncům stejnosměrného proudu pro obecnou elektrizaci jako byl v USA Edison proti Teslovi a Westinghouseovi a u nás Křížík proti Kolbenovi, protože nejjednodušší řešení tohoto sporu byla **nula** kmitů či cyklů (dnešních Hz). Edison dokonce zkonstruoval elektrické křeslo na střídavý proud jako bezbolestný způsob poprav, aby dokázal vyšší nebezpečnost střídavého proudu při úrazech elektřinou a odradil tak zákazníky od používání střídavého proudu. A nepříznivé účinky na organismus s vyšší frekvencí rostou. Avšak z ekonomických důvodů se začal střídavý proud na přelomu 19. a 20. století prosazovat se stále větší vehemencí a otázka volby optimální frekvence byla tím palčivější. Londýn byl typicky špatným příkladem rozvoje nezávislé elektrifikace, kdy tam v roce 1914 existovalo 41 elektráren pracujících do 31 sítí s 8 různými frekvencemi [4]. Vzájemná spolupráce byla prakticky nemožná.

A právě náš odborník na elektrická zařízení a zastánce střídavého proudu - Emil Kolben, který dobře znal poměry na obou stranách Atlantiku navrhl rozetnout gordický uzel volby standardní frekvence pro všeobecnou elektrizaci doporučením pouze dvou možných frekvencí - 50 Hz nebo 60 Hz, již v roce 1893.

V kontinentální Evropě zásluhou vývoje především v Německu a Švýcarsku se fakticky během posledních deseti let 19. století z podnikatelského hlediska prosadila frekvence 50 Hz. Německá normalizační komise se ještě v roce 1902 zdráhala stanovit pouze 50 Hz jako jedinou frekvenci a doporučila, že frekvence by měla být 25 nebo 50 Hz. Toto doporučení však velmi urychlilo německý vývoj k 50 Hz, protože po té vzniklo už jen několik málo sítí s 25, 40 a 42 Hz, takže o deset let později v roce 1912 již komise 25 Hz jako standard nedoporučila a v roce 1914 prohlásila 50 Hz za jedinou doporučenou frekvenci střídavých sítí. Ale jako kvalitativní standard byla definitivně stanovena až v roce 1930. Podobný vývoj byl zaznamenán v Rakousku, které bylo v otázkách elektrifikace značně závislé na německých koncernech. Švýcarsko bylo dokonce průkopníkem 50 Hz. Postupně tedy 50 Hz zvítězilo na celém evropském kontinentě, i když některé elektrické ostrovy s jinou frekvencí dožívaly až dlouho do 20. století. Například právě Ženeva byla připojena v roce 1900 na velkou hydroelektrárnu u Chévres na Rhoně pod Ženevským jezerem, kde 15 velkých hydrogenerátorů vyrábělo dvofázový střídavý proud o frekvenci 46 Hz. Nakonec tato síť jako izolovaný ostrov přežila až do roku 1943, kdy byla elektrárna odstavena z provozu a demontována.

U nás zásluhou především Emila Kolbena jako majitele továrny na výrobu el. zařízení pro střídavé sítě se prosazoval střídavý proud o 50 Hz prakticky od začátku elektrifikace českých zemí. Představu o plánovaném propojení elektrických sítí pomocí 100 kV vedení v záměrech čs Ministerstva veřejných prací z roku 1929 dokumentuje následující obrázek.



Obr. 1 – Plán propojení elektrizačních sítí v ČSR z roku 1929 [3]

Nyní vede 50 Hz na 4 kontinentech s výjimkou Severní a částečně i Jižní Ameriky, kde šli cestou vyšší rychlosti točících se rotorů generátorů (60 Hz), které pak při stejném výkonu mohou být menší, podobně i transformátory mohou mít menší hmotnost, a tím být levnější. Na druhé straně donosnost vedení střídavého proudu s vyšší frekvencí je více omezena vyšším jalovým úbytkem napětí. Zvláštním případem je pak Japonsko, kde severozápad má 50 Hz a na jihovýchodě funguje 60 Hz. O spojení se pak starají stejnosměrné spojky. Jistě by bylo zajímavé technicko-ekonomické posouzení, která z frekvencí by byla vhodnější pro zásobování elektrickou energií nově elektrifikované oblasti tzv. “na zelené louce”. V dnešní době však taková studie nemá praktický smysl, protože frekvence sítě je daná okolím takové oblasti.

Pro dálkový přenos se začalo používat velmi vysoké napětí nad 100 kV, aby pak pro distribuční sítě se zase zpětně transformovalo na vysoké napětí, dnes nejčastěji 22 kV a pro konečné maloodběratele na nízké napětí 0,4 kV. Třífázový střídavý rozvod má nižší hladinu entropie čili vyšší míru uspořádanosti oproti stejnosměrnému

rozvodu, protože kromě energie distribuje i informaci o smyslu a rychlosti otáčení generátorů pracujících do soustavy. To umožňuje funkci asynchronního motoru, který využívá toto rotující elektromagnetické pole. Asynchronní motor představuje levnou, jednoduchou a spolehlivou pohonnou jednotku pro většinu strojů. Vyšší donosnost střídavých přenosových vedení ve dvacátém století umožnila vznik rozsáhlých sítí, v nichž generátory stále větších jednotkových výkonů pracovaly synchronně a zásobovaly elektřinou území o rozloze celých kontinentů. Možnost zálohovat výpadky těchto zdrojů přenosem energie od ostatních generátorů pracujících do soustavy otupilo hlavní nevýhodu střídavého proudu, čímž jeho praktická **neskladovatelnost**.

Z hlediska organizace trhu docházelo k postupné koncentraci kapitálu v tomto síťovém odvětví postupně až k vítězství státně monopolních podniků, které bylo umožněno i změnami v legislativě jednotlivých států podporující „všeúčinnost“ těchto utilit. Na území téměř každého evropského státu se vyvinula postupně pouze jediná dominantní firma obsluhující trh budující a provozující systémové elektrárny a přenosové i distribuční sítě na území státu, zpravidla převážně ve státním vlastnictví. Soustavy jednotlivých států se v druhé polovině 20. století propojily za účelem vzájemné výpomoci ke zvýšení spolehlivosti a vzájemně výhodné výměně elektřiny. Na západ od našich hranic vznikla organizace UCPTÉ, naše republika byla ve východoevropské soustavě MIR. Ač obě soustavy pracovaly s 50 Hz, východní soustava nedokázala plnit náročné standardy kladené na regulaci frekvence UCPTÉ a jejich provozní zásady spolupráce. Přesto se elektřina vyrobená v Polsku či NDR dodávala do Rakouska a NSR, nejprve díky vydedené elektrárně Hodonín synchronně pracující s UCPTÉ přes vedení 220 kV do Bisamberku a poté díky dvěma stejnosměrným spojkám nulové délky v rakouském Dünrohu a německém Etzenrichtu, které usměrnily naši elektřinu s kolísavou frekvencí a poté ji rozstřídali na konstantních 50 Hz panujících v soustavě UCPTÉ.

Pro to, aby spolupráce generátorů v soustavě a doprava energie od zdrojů ke spotřebitelům byla spolehlivá je nutno soustavu centrálně řídit, resp. její hierarchicky uspořádané části řídit z podobně hierarchicky uspořádaných dispečinků. Je to obdoba vertikálního vojenského řízení, což je velmi vzdálené horizontálním vazbám vznikajícím na volném trhu, který se koncem 20. století začal prosazovat i v ostatních síťových odvětvích, nejenom v elektroenergetice. Problémy vznikají také tím, že elektřina neteče podle obchodních dohod, ale podle fyzikálních zákonů. Je zřejmé, že pokud by přenosová soustava přenášela stejnosměrný proud, odpadla by řada dnešních problémů týkající se stability synchronního chodu, zabezpečení dodávky a řízení toků energie pro zabezpečení proměnlivé poptávky spotřebitelů dle objednávky obchodníků s elektřinou, do které na začátku 21. století navíc zasahuje stále vyšší podíl nově zapojovaných intermitentních zdrojů využívající obnovitelné zdroje energie jako je slunce a vítr. Energii těchto zdrojů nelze tak snadno akumulovat, jako to bylo u od počátku využívané energie vodních toků. Tyto zdroje zvyšují míru variability bilance výkonu v soustavě nejen na straně spotřeby, která tu byla vždy a se kterou se dispečerů naučili během 20. století pracovat, ale také na straně výroby, s čímž se v současnosti museli za pochodu naučit pracovat také. O tom, že se jim to daří svědčí fakt, že zatím ve střední Evropě nedošlo k vážnějšímu blackoutu.

Výhody a nevýhody střídavého vůči stejnosměrnému proudu

- 1.) Základní výhodou střídavého proudu a zároveň nevýhodou stejnosměrného je levnější a málo ztrátová změna napětí střídavého proudu díky transformátoru. Transformátor je investičně asi desetkrát levnější než polovodičový měnič stejnosměrného napětí, při ztrátách cca 0,5% transformovaného výkonu (u velkých transformátorů) oproti cca 2% ztrátám u měničů napětí stejnosměrného proudu. Zvýšením napětí se při stejném přenášeném výkonu úměrně sníží proud ve vedení, a tím lze přenášet elektřinu na dlouhé vzdálenosti bez velkých ztrát ve vodičích.
- 2.) Další výhodou střídavého - třífázového proudu je možnost použití jednoduchých, trvanlivých a spolehlivých bezkontaktních motorů na rozdíl od strojů vybavených komutátorem, kde vznikají problémy s jiskřením a opotřebáváním sběračů.
- 3.) Střídavý proud se snadněji vypíná, protože vždy v určitém okamžiku napětí i proud prochází nulou (100krát za sekundu u 50 Hz).
- 4.) Zemní střídavé proudy nepůsobí tolik korozivně na kovová zařízení v zemi.

Tyto výhody střídavého jsou zároveň nevýhodami stejnosměrného proudu. Na druhé straně však:

- 1.) základní nevýhodou střídavého proudu je nutnost synchronního chodu všech generátorů pracujících do soustavy. V územně rozsáhlých soustavách vzniklých propojením podsoustav vznikají problémy při řízení frekvence a napětí. Je nutno řešit složité přechodné jevy [1,8].
- 2.) Při přenosu velkých výkonů na dlouhé vzdálenosti (přes tisíce km) vznikají u vedení střídavého proudu problémy s udržení stability přenosu.
- 3.) Popis funkce střídavých soustav je řádově složitější než u srovnatelných stejnosměrných soustav, kde odpadají problémy s indukčností, skinefektům a kapacitou. Proudů mezi uzly tečou pouze na základě rozdílu napětí a odpadá problém s frekvencí, jako se základním kvalitativním ukazatelem střídavého proudu.

4.) Střídavý proud má oproti stejnosměrnému proudu vyšší míru neskladovatelnosti, protože nelze přímo využít chemické články.

Vzhledem k uvedenému se dnes jeví v podstatě dvě oblasti vyššího využití stejnosměrného proudu a to buď na **nejvyšší napět'ové úrovni** pro dálkové přenosy velkých výkonů při velmi vysokém a zvláště vysokém stejnosměrném napětí (HVDC), nebo pak na **nejnižší napět'ové úrovni** přímo v rozvodech konečných spotřebitelů, do kterých pak lze přímo připojit střešní fotovoltaiku bez potřeby střídače. Usměrňovač je totiž vždy levnější než střídač.

Vysokonapět'ové stejnosměrné přenosy - HVDC

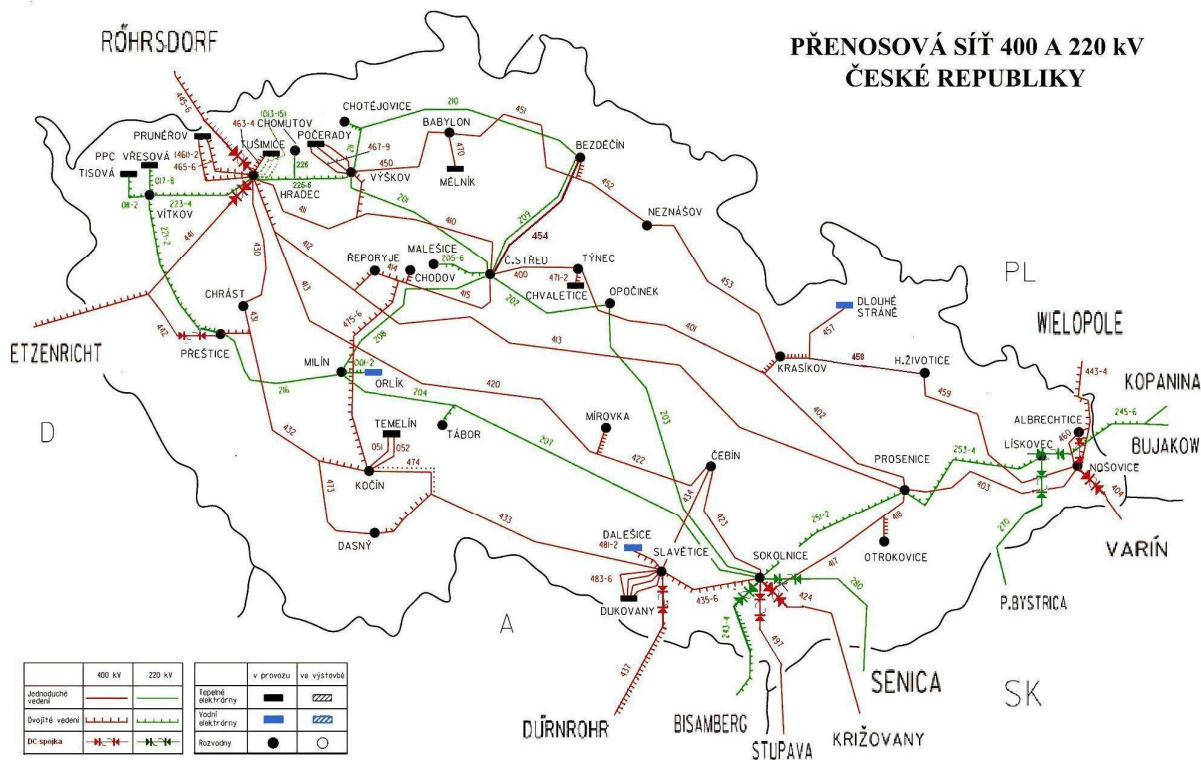
Vzhledem k problémům stability přenosu velkých výkonů na větší vzdálenosti či podmořskými kabeley, byly již od padesátých let minulého století postaveny a provozovány stejnosměrná přenosová vedení o velmi vysokém či zvláště vysokém napětí, které přenášely výkon řádově stovky až tisíce MW. Prudký vývoj výkonové polovodičové elektroniky umožnil zefektivnit tyto přenosy a v současnosti jsme svědkem řady jejich nových instalací v Severní i Jižní Americe, Evropě a Číně.

V osmdesátých letech minulého století byly používány stejnosměrné přenosy nulové délky umožňující spolupráci soustav s jiným kmitočtem. Jedna taková byla postavena v rakouské rozvodně Dürnhor a sloužila ke spojení západoevropské soustavy UCPTe s východní soustavou MIR. Byla určena ke vzájemnému obchodu s elektrickou energií a k dovozu elektřiny z Polska do Rakouska v ročním objemu okolo 1 600 GWh. Přenášený výkon mohl být v jednom či druhém směru až 550 MW. Tato stanice byla připojena na 400 kV linku ze Slavetic. Po synchronním připojení přenosové soustavy ČR na UCTE přestala mít smysl a je otázkou zda se 1,2 mld. rakouských šilinků za dobu od 1983 do 1995 vrátilo díky obchodu s elektřinou. Další otázkou je zda by nebylo vhodné opět zprovoznit podobné zařízení ovšem alespoň s pětinasobným výkonem.

Je zřejmé, že pro spojení napříč Evropy (sever s jihem a západ s východem) a dále pak připojení Asie a Afriky jsou HVDC, když ne jedinou schůdnou možností, tak přinejmenším velmi vhodné. Nakonec, využití těchto přenosů i v centru Evropy by nebylo bez provozních výhod.

Přenosová soustava ČR je dlouhodobě obtěžována kruhovými toky, které zbytečně zvyšují ztráty v našich vedeních i transformátorech 400/220 kV, přetěžují některá vedení, a tím ohrožují bezpečnost provozu české přenosové soustavy i bezpečnost provozu sousedních soustav. V současnosti se problém řeší výstavbou regulačních transformátorů s posuvem fáze v rozvodně Hradec se jmenovitým zatížením 2,4 GW s investičním nákladem necelých 2 mld. Kč. Radikálnějším řešením (ale pochopitelně dražším) by bylo přeměnit problémová vedení, kterými jsme propojeni k zahraničním soustavám na stejnosměrné. Tím bychom získali možnost „vnutit“ potřebný tok výkonu mezi dvěma uzly propojených soustav tak, aby odpovídal obchodním smlouvám či jiným subjektivně vyvolaným zájmům. Toky na zbylých střídavých vedeních se tomuto přizpůsobí. Pokud bude prováděna korektní regulace na tomto stejnosměrném vedení, lze vznik kruhových toků omezit.

Ideální by bylo, aby na všech přes hraničních vedení spojující naši soustavu s okolními soustavami byly stejnosměrné spojky nulové délky, tzn. kombinace usměrňovače a střídače.

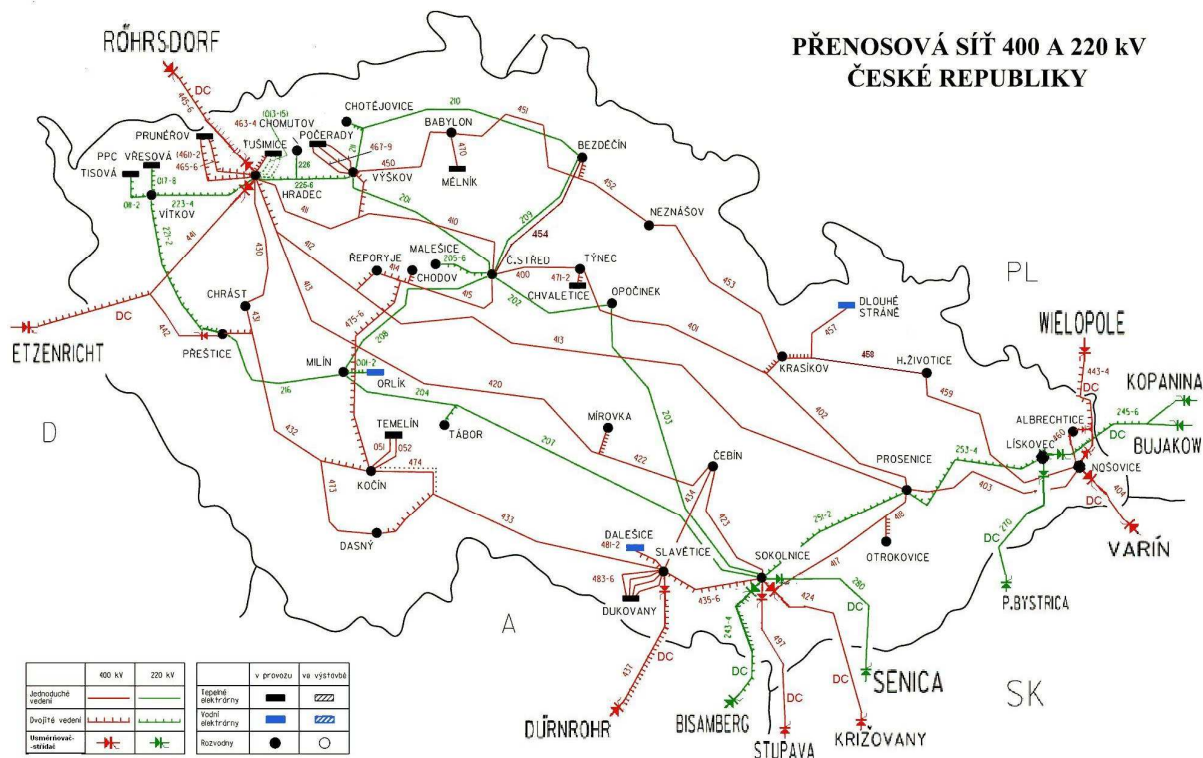


Obr.2 – Stejnoseměrné spojky nulové délky na přeshraničních vedeních (upravený obrázek z webu ČEPS z roku 2005)

Lépe by však bylo přes hraniční vedení provozovat rovnou jako stejnosměrná, tzn. na obou koncích každého vedení umístit jeden měnič, který by pracoval buď v režimu usměrňovače v případě dodávky od nás do zahraničí anebo by se přepnul do režimu střídače, pokud bychom odebírali my ze zahraničí. Celkem by bylo potřeba 20 až 32 měničů z toho 9 až 12 na 220 kV, zbytek na 400 kV. V tomto případě by pak bylo řízení provozu naší soustavy ve spolupráci se zahraničím mnohem jednodušší, neboť poruchy v zahraničí by se nepromítaly v naší ES a naopak. Takto propojené soustavy by měly vyšší spolehlivost, protože v případě výpadku prvku v jedné soustavě či nenadálému zvýšení spotřeby by okolní soustavy snáze vypomohly bez nebezpečí kaskádního rozvíjení poruch [2]. Použití měničů má velkou výhodu v tom, že omezují zkratové výkony v soustavách a zvyšují stabilitu pružným přizpůsobením frekvence „rozstřídávaného“ proudu.

Přenosové schopnosti dosavadních jednoduchých vedení vvn při stejném proudu by byly asi o 5,7 % nižší, počítám-li provoz 220 kV vedení na napětí ± 180 kV proti zemi, tzn. celkem 360 kV a u 400 kV na ± 330 kV, tzn. 660 kV. Bylo by však možno ušetřit vodič prostřední fáze, který by byl jinak uzemněn, neboť na jeho funkci vedení vyrovnávacích proudů by postačovala zemní lana. V případě dosavadního dvojitě vedení, by ovšem bylo možno využít všechny vodiče tzn. 3 + 3, a v tomto případě by byla přenosová schopnost zvýšena o 41,4 %! Také fakt, že izolační hladina u stejnosměrného napětí na venkovních vedení může být oproti střídavému o cca 20% nižší by umožnil ještě o 20% navýšit ss napětí, a tím i přenášený výkon.

Co se týče investičních výdajů na měniče, byly by pochopitelně vysoké. Jednotková cena měniče se pohybuje cca 3 000 ÷ 4 000 Kč/kW, tzn. jestliže celkové maximum přenášeného výkonu po přeshraničních vedeních 220 kV bychom uvažovali ve výši cca 1,4 GVA, lze očekávat investiční výdaje 8,4 až 11,2 mld. Kč, protože měniče musí být pro oba konce vedení. Jeden je v režimu usměrňovače a druhý je střídač. Jakmile bude požadavek na obrácený tok výkonu, režimy měničů se prohodí. Pro všechna přeshraniční vedení 400 kV, které mají maximum přenášeného výkonu dohromady cca 5 000 MVA by pak vycházely investiční výdaje 30 až 40 mld. Kč. Použití stejnosměrných vedení jakékoliv délky by umožnilo přímé použití akumulátorů elektriny, jako jsou superkondenzátory, supravodivé cívky, klasické chemické články, či akumulátory s elektrolytem v podobě roztavené soli. Byly by to v podstatě UPS pro celou soustavu. Výhodou je jejich okamžitá reakce na výpadek výkonu, rychlejší než primární regulace na turbogenerátorech.



Obr.3 – Stejnsměrná přeshraniční vedení

Nejradikálnější změnou by však byla **funkce celé přenosové soustavy ve stejnosměrném režimu**. Mohlo by se začít od soustavy 220 kV, kde by byly zapotřebí:

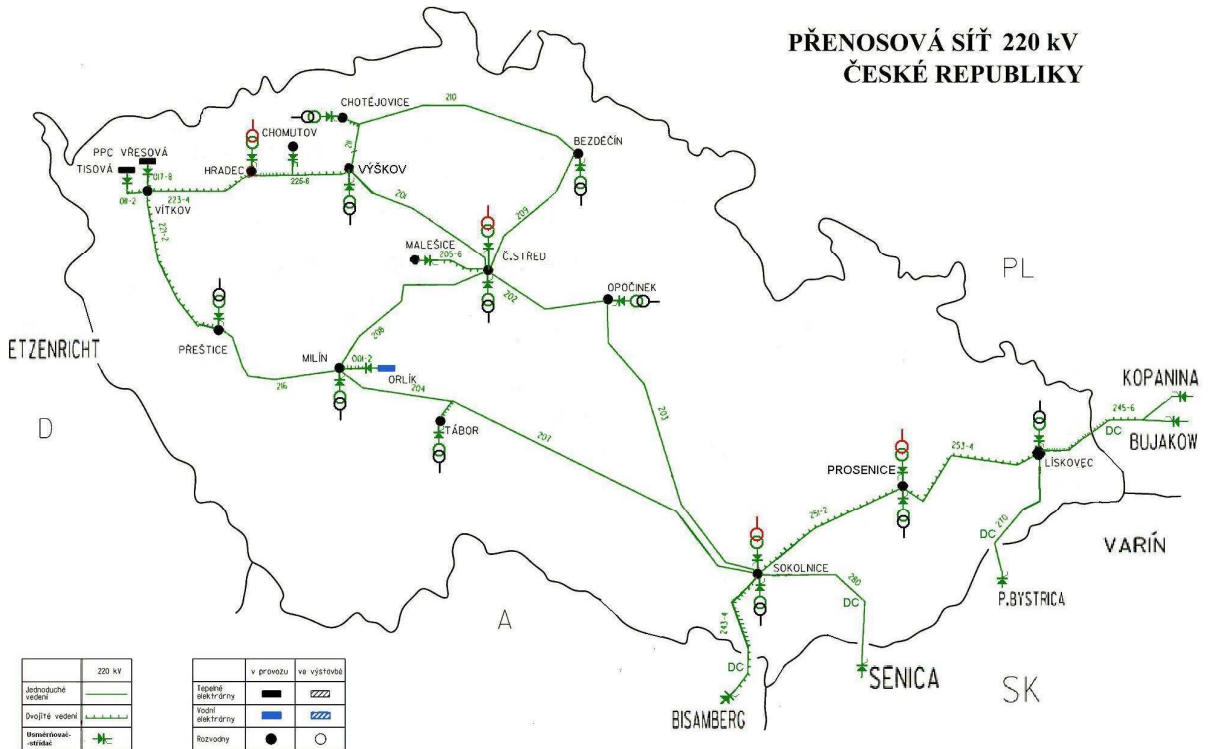
- 4 usměrňovače od zdrojů v Tisové, Vřesové, Orlíku a Malešic
 - 4 měniče na sekundáru traf 400/220 kV
 - 20 měničů na primárech traf 220/110 kV
 - 5 až 6 měničů na přeshraničních vedeních,
- to je celkem 29 až 30 měničů a 5 usměrňovačů.

V soustavě 400 kV by bylo třeba:

- 18 usměrňovačů na začátku vedení od systémových elektráren
 - 2 měniče pro PVE
 - 4 měniče na primárech traf 400/220 kV
 - 41 měničů na primárech traf 400/110 kV
 - 10 až 12 měničů na přeshraničních vedeních,
- to je celkem 57 až 59 měničů a 18 usměrňovačů.

Pro soustavu 220 kV by investiční výdaje přibližně činily 25 až 35 mld. Kč.

PŘENOSOVÁ SÍŤ 220 kV ČESKÉ REPUBLIKY



Obr.4 – Systém 220 kV provozovaný ve stejnosměrném režimu na napětí 2x200 kV DC

Hladina 400 kV by byla pochopitelně několikanásobně dražší zhruba 65 – 80 mld.Kč. Dohromady s hladinou 220 kV by to byla investice přes 100 mld. Kč a to nepočítám úpravy vypínačů, aby byly schopny vypínat stejnosměrné proudy a jednorázové výdaje na změnu koncepce dosavadního řízení. Je to tedy poměrně vysoká cena za zjednodušení spočívající v tom, že by **nebylo nutno udržovat synchronní chod generátorů**. Toky na vedeních by odpovídaly rozdílu napětí v jednotlivých uzlech soustavy. Ztráty na vedeních by se snížily, ale na druhé straně by narostly ztráty v měničích oproti ztrátám v dosavadních transformátorech. Lze odhadnout, že by ztráty v soustavě celkově narostly oproti současnosti při stejných přenášených výkonech přibližně na dvojnásobek.

Závěr

Bylo by třeba vyjádřit penězi úspory provozních výdajů plynoucích především ze zvýšené zabezpečení dodávky výkonu pro porovnání efektivnosti, ale i bez toho je zřejmé, že přestavba přenosové soustavy na stejnosměrný proud je ekonomicky neefektivní a provozní výhody plynoucí z nižších ztrát energie na vedeních (ale vyšší v měničích) a jednoduššího řízení bez nutnosti udržování stabilní frekvence a synchronního chodu zdrojů do přenosové soustavy by tyto investice nevyvážily. K investičním výdajům na měniče je totiž třeba přičíst také výdaje na změnu koncepce řízení napětí v přenosové soustavě, která je v současnosti založena kromě přepojování odboček na transformátorech víceméně na bilanci jalového výkonu v jednotlivých uzlech soustavy. V případě stejnosměrné přenosové soustavy by se napětí řídilo napětím zdrojových uzlů. Napětí v odběrových uzlech by bylo výsledkem odebraného zatížení a odporu přírodních vedení ze zdrojových uzlů. Napětí na sekundárních stranách transformátorů do distribuční soustavy by se řídilo přepínáním odboček a bilancí jaloviny stejně jako doposud, protože na sekundárech by již byla střídavá síť 110 kV. Zajímavé by však bylo propojení stejnosměrných soustav 400 kV s 220 kV přes dosavadní čtyři transformátory v Hradci, Čechách střed, Sokolnici a v Prosenicích. Tyto trať by měly na sekundáru i primáru měniče, které by byly buď zpravidla v režimu střídače na primáru a usměrňovače na sekundáru, protože se spíše dodává z hladiny 400 kV do 220 kV, ale s možností přepnout do opačných režimů, pokud by mělo jít o dodávku z 220 kV do 400 kV. Nicméně tato trať by mohla mít **mnohem menší rozměry při stejném výkonu** a nebo spíše přenášet vyšší výkon při současných rozměrech **zvýšením frekvence střídačů nad 50 Hz** (použití např. čtyřnásobek, tzn. 200 Hz). Řízení napětí by se provádělo pouze přepínáním odboček na primárním vinutí. Pojem jalového výkonu ve stejnosměrné síti totiž nemá smysl. Řízení napětí v soustavě by se tedy provádělo pouze pomocí zdrojových uzlů nebo přepínáním odboček, a tím by bylo opět mnohem jednodušší než ve střídavé síti.

Velikostí napětí by se i automaticky (samoregulačí) řídily dodávané výkony z jednotlivých zdrojů. Pokud by bylo třeba zvýšit výkon dodávaný z určitého zdroje do sítě, bylo by třeba zvýšit napětí na jeho svorkách a to buď přepnutím poboček na zvyšovacím transformátoru, nebo přibuzením stroje či také navíc oproti současnosti - **zvýšením počtu jeho otáček za minutu**. Z toho plyne, že regulace napětí ve stejnosměrné síti by byla jednodušší než ve střídavé a navíc je pro ni u zdrojů o jednu možnost navíc – rychlost otáčení generátorů.

Je tedy třeba uvážit i to, že by generátory nemusely dodržovat normalizovanou frekvenci, bylo by je možno točit na vyšší otáčky než 3 000 ot./min. (50 Hz), tzn. pracovat s vyšší frekvencí, což by znamenalo zvýšení výkonu, resp. pro nově navrhované stroje menší rozměry při výkonu stejném. A to jak pro generátory, tak pro turbíny i pochopitelně pro transformátory. Menší rozměry magnetických obvodů znamenají úspory materiálu, především železa a následně pak i mědi. Také představují snazší manipulaci s lehčími součástmi při instalaci a opravách apod. Frekvence by již nebyla normalizovaná a stroje by mohly být navrhovány na optimální frekvenci pro daný způsob přeměny energie na elektrickou především podle požadovaného nominálního výkonu jednotky.

A pak je již jen krok k představě, že by **stejnosměrný proud ovládl všechny napěťové hladiny**, a změna napětí mezi hladinami by probíhala jako v dnešních spínaných zdrojích. Tam se síťové elektrické napětí nejprve usměrní, a po té se rozstřídá s frekvencí 1-20 kHz, a pak transformuje miniaturním transformátorkem s feritovým jádrem a opět usměrní. Podobně by to mohlo fungovat na všech stupních ES samozřejmě až po té, co polovodičová technika v silnoproudých aplikacích dále ještě více zlevní. Došlo by tak k naplnění představ Františka Křižíka, který před již před sto lety prosazoval stejnosměrný proud pro soustavnou elektrifikaci, ovšem na dialekticky vyšší úrovni než tomu bylo tehdy.

Literatura

- [1] Švejar P., Máslo K., Vnouček S.: Dynamická odezva ES na deficit činného výkonu, *Energetika* č.6/1994.
- [2] Žáček J.: Zdroje nepřerušovaného napájení – UPS. *Automa* 3/2001,
<http://www.odbornecasopisy.cz/automa/2001/au030118.htm>
- [3] List V.: Hospodaření elektrických podniků. Česká matice technická, Praha 1929.
- [4] Neidhöfer G.: 50-Hz frequency – how the standard emerged from a European jumble. *IEEE* 7-8, 2011, str. 66-81.
- [5] Kubín M.: Přenosy elektrické energie ČR v kontextu evropského vývoje. ČEPS, a.s., Praha 2005.
- [6] Häberle G. a kol.: Elektrotechnické tabulky pro školu i praxi. Europa-Sobotáles cz. s.r.o. Praha 2006.
- [7] List V.: Elektrické sítě. Technicko-vědecké nakladatelství. Praha 1951.
- [8] Máslo K.: Rozpad synchronního propojení sítí UCTE z pohledu dynamické stability elektrizační soustavy. In *Energetika*, č.6/2007.
- [9] Čahyna F., Vrba M., Veselý T.: Super Grid – fikce nebo realita? In *Energetika*, č.4/2010.

Webové zdroje

www.ceps.cz

www.cez.cz

www.energetik.cz

www.swissgrid.ch/power_market/grid_operation/frequency

<http://elektrika.info/>

<http://www.technickydenik.cz/rubriky/archiv/transformatory-s-rizenym-posuvem-faze...>