Analýza jalového výkonu v DS a toku jalovej energie medzi DS a PS (1)

Vývoj a trend napäťových pomerov v prenosovej sústave (PS) za uplynulé roky poukazujú na zásadný vplyv distribučných sústav (DS) aj ich používateľov na meniace sa toky a rast jalovej energie v elektrizačnej sústave (ES). Zmeny charakteru spotrebičov u používateľov, nárast kabelizácie a rozširovanie sústav s cieľom zabezpečenia vyššej spoľahlivosti dodávok elektrickej energie prinášajú v kontradikcii výzvy na riešenie neúmerného rastu toku jalovej energie z nižších napäťových hladín až do PS. Článok analyzuje a prináša pohľad na tok jalového výkonu v DS na jednotlivých napäťových hladinách, poukazuje na príčiny a dôvody jeho vzniku a definuje možnú potrebu kompenzačných zariadení.

Dôvody analýzy jalového výkonu

Elektrizačná sústava je živý systém tvorený vzájomne prepojenými výrobnými zariadeniami, prenosovou sústavou, distribučnými sústavami a pripojenými používateľmi. V každom momente musí byť tento systém vo výkonovej P(f) a napäťovej Q(U) rovnováhe.

Riadenie činného výkonu, resp. frekvencie, je zabezpečované nasadením generátorov elektrickej energie s vyčlenenými zdrojmi, zaradených do primárnej, sekundárnej a terciárnej regulácie a reagujúcich na zmeny záťaže v každom okamihu na ľubovoľnom mieste sústavy. Riadenie napätia, resp. jalového výkonu, má však výrazne lokálny charakter a je zabezpečované osobitne na každej napäťovej hladine. V PS (400 kV, 220 kV) sú vhodne vytipované pilotné uzly, v ktorých je udržiavané požadované napätie pomocou regulátorov jalového výkonu na generátoroch pripojených do prenosovej sústavy. Ďalšou možnosťou riadenia napätia v PS sú kompenzačné zariadenia (statické alebo rotačné tlmivky). Napätie v regionálnych DS na úrovni 110 kV je riadené odbočkami na transformátoroch 400 (220)/110 kV, ktoré sú vo vlastníctve prenosovej sústavy. Na hladine 22 kV je napätie riadené odbočkami na transformátoroch 110/23 kV, na hladine 400 V na transformátoroch 22/0,42 kV. Napätie má výrazne lokálny charakter. Jeho zmena je spôsobená najmä jalovým výkonom vznikajúcim na disipatívnych prvkoch. Pri odbere jalového výkonu odberateľmi (asynchrónne stroje) dochádza k poklesu napätia a pri dodávke jalového výkonu (napr. na nezaťažených, najmä káblových vedeniach) dochádza k nárastu napätia. Riadenie, resp. sledovanie a prípadná kompenzácia jalového výkonu v DS, je de facto iba na úrovni používateľov v segmente VVN, VN, resp. maloodber u podnikateľov, ktorí sú cez prizmu legislatívy a taxatívnych položiek v cenníku povinní udržiavať cos $\varphi = 0{,}95 - 1$ (induktívny) a nedodávať jalovú energiu do DS, aby bolo v sústave udržiavané optimálne napätie a nevznikali výrazné poklesy a straty v distribúcii. V minulosti teda nebola väčšia potreba sledovania jalového výkonu v distribučných sústavách. Vplyvom nových trendov najmä kabelizáciou vedení, ako aj zmenou charakteru odberateľov sa situácia dramaticky mení.

Hlavnými dôvodmi analýzy a rozvíjajúcej sa problematiky jalového výkonu sú:

- PS avizovala regionálnym DS problémy s riadením napätia na hladine 400 kV (prekračovanie dovolených medzí – nadpätia) aj s ohľadom na dodávku jalového výkonu z DS do PS. Existujúce statické kompenzačné zariadenia (tlmivky) v PS začínajú byť v prevádzke v zásade neustále, pričom ani tak nepostačujú na eliminácu vzniku nadpätia.
- Naradenia komisie (EU) 2016/1388 zo 17. augusta 2016 [1], ktorým sa stanovuje sieťový predpis na pripojenie odberateľov a DS do ES.
- Technické podmienky spoločnosti Slovenská elektrizačná prenosová sústava, a. s., v prílohe N4 [2] definujú zákaz dodávky jalového výkonu z distribučnej sústavy do PS, ak v zmluve medzi prevádzkovateľom distribučnej sústavy (ďalej PDS) a prevádzkovateľom prenosovej sústavy (ďalej PPS) nie je dohodnuté inak.

Cieľom materiálu je vytvoriť základný obraz o:

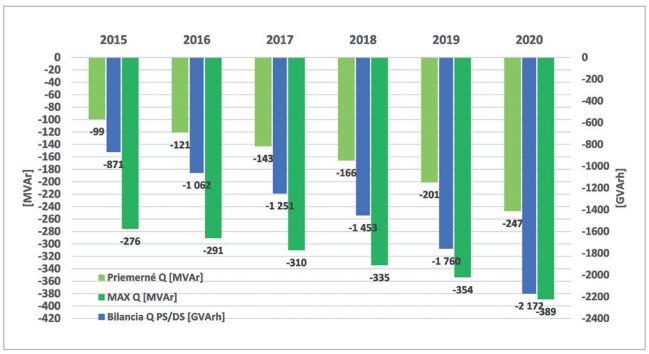
- vývoji a trendoch jalového výkonu medzi PS a DS,
- vplyve toku jalového výkonu z DS na napätie v PS,
- požiadavkách legislatívy v kontexte toku jalového výkonu medzi PS/DS,
- príčinách vzniku a trendoch jalového výkonu na napäťových hladinách VVN, VN a NN,
- možnosti riešenia kompenzácie jalového výkonu v distribučnej sústave.

Na analýzu boli použité 15-minutové rezy výkonu a napätia z riadiaceho dispečerského systému SCADA spoločnosti Západoslovenská distribučná, a. s. (ďalej ZSD), ako aj z fakturačných meraní medzi PS a DS. Presnosť dát je poplatná meraciemu reťazcu, tzn. v systémoch SCADA je nutné uvažovať minimálne 3 % odchýlku. Znamienková konvencia v tabuľkách a grafoch (ak nie je uvedené inak): kladné hodnoty P/Q znamenajú tok výkonu z PS do DS (odber) a naopak záporné hodnoty P/Q znamenajú tok výkonu z DS do PS (dodávka).

Problematika jalového výkonu medzi PS a DS

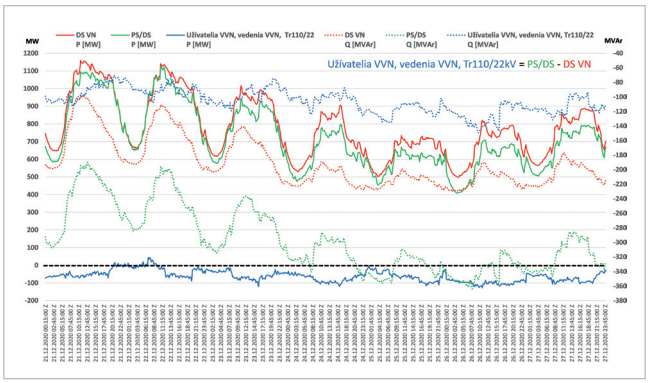
Analýza výkonu P/Q medzi PS a DS

Celkový pohľad na pomer toku jalového výkonu z DS do PS, ako aj jeho trend za posledných päť rokov je na obr. 1. Sumárny tok jalového výkonu na všetkých deliacich miestach medzi PS a DS zaznamenáva medziročný rast v maximách aj priemerných hodnotách na úrovni 20 MVAr – 40 MVAr. Nárast bilancie jalovej energie je viac ako 300 GVArh napriek celkovému medziročnému rastu zaťaženia sústavy činným výkonom. Trend týchto ukazovateľov v posledných dvoch-troch rokoch výrazne narastá v porovnaní s minulosťou.



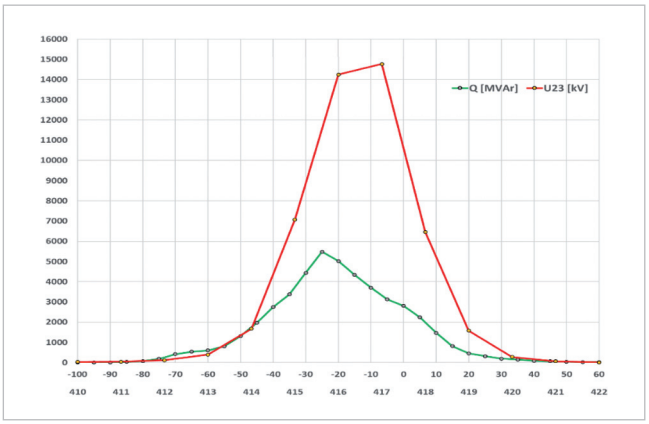
Obr. 1 Bilancia toku jalového výkonu a energie medzi PS a DS

Analýza priebehu činného a jalového výkonu za jednotlivé roky poukázala na jednoznačnú súvislosť zaťaženia DS na generovaný jalový výkon z DS. V čase nízkeho zaťaženia DS činným výkonom rastú toky jalového výkonu do PS a naopak. Analýzy preukázali túto súvislosť vo všetkých uzlových oblastiach. Tento jav je zobrazený v časovom priebehu sumárnych meraní zo všetkých deliacich miest medzi PS a DS na obr. 2. Zároveň sú z uvedených priebehov zrejmé pomery vzniku jalového výkonu na jednotlivých napäťových sústavách VVN a VN. Zmeny činného výkonu počas uvedeného obdobia sú na napäťovej hladine VVN v pomere k VN výrazne menšie, ±100 MW (odber + výroba), a teda aj generovanie jalového výkonu na úrovni cca 110 MVAr je pomerne vyrovnané, ±30 MVAr. Zmeny zaťaženia VN (vrátane NN) sústavy striedaním dňa a noci sú zásadnejšie, ±400 MW, teda aj zmeny generovania jalového výkonu sú výrazne väčšie, v rozsahu od 100 MVAr až 230 MVAr.



Obr. 2 Bilancia toku činného a jalového výkonu medzi PS/DS, VVN a VN

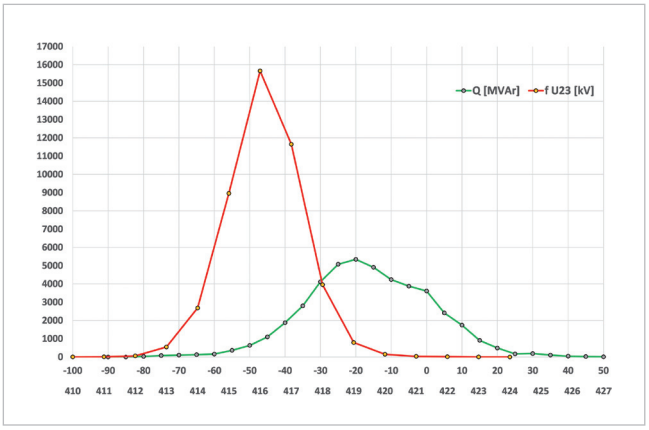
Vzhľadom na uvedené zmeny v rámci dní je zásadnou otázkou potreba veľkosti a regulácie kompenzačného výkonu bez ohľadu na technické riešenie. Analýza za obdobie rokov 2013 až 2018 na každej elektrickej stanici PS/DS cez histogramy hodinovej početnosti veľkosti toku jalového výkonu medzi PS/DS a napätia v PS poukázala na výrazný rozptyl v potrebe teoretického nasadzovania kompenzačných prostriedkov.



Obr. 3 Histogram početnosti Q, U v hodinách (2013 – 2018) – elektrická stanica PS/DS pri Bratislave

Na obr. 3 je znázornená jedna z najväčších staníc na území ZSD napájajúca oblasť Bratislavy a priľahlej juhovýchodnej časti, teda oblasť s relatívne hustou sieťou vzdušných VVN vedení a výrazne prevažujúcim charakterom VN káblových sietí. Zaťaženie je približne v priemere 220 MW s maximom 350 MW a minimom 110 MW. Z priebehu možno usúdiť, že časovo maximálne a ekonomicky efektívne využitie kompenzačných prostriedkov by bolo na úrovni cca 30 MVAr, avšak výkonová potreba na úplnú kompenzáciu je až na úrovni cca 90 MVAr. Zároveň nezanedbateľnú časť roka tvoria obdobia, keď by kompenzácia nebola nutná. Napriek značnému rozptylu zmien jalového výkonu na úrovni cca 120 MVAr je napätie na tomto mieste PS stabilné.

Na porovnanie je na obr. 4 iná elektrická stanica s transformáciou PS/DS, ktorá napája významnú strednú časť distribučného územia, teda oblasť so zmiešaným charakterom mestského a vidieckeho odberu, so vzdušnými VVN vedeniami a VN sieťou s prevahou vzdušných vedení. Zaťaženie je približne v priemere 190 MW s maximom 320 MW a minimom 100 MW. Z priebehu možno usúdiť, že časovo maximálne a ekonomicky efektívne využitie kompenzačných prostriedkov by bolo na úrovni cca 20 – 30 MVAr, avšak výkonová potreba na úplnú kompenzáciu je až na úrovni cca 80 MVAr. Zároveň nezanedbateľnú časť roka tvoria obdobia, keď by kompenzácia

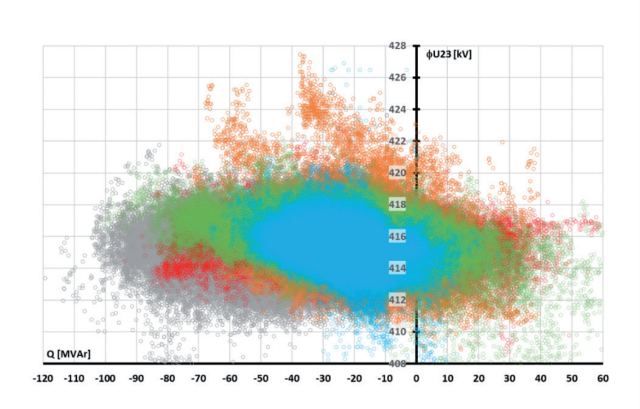


Obr. 4 Histogram početnosti Q, U v hodinách (2013 – 2018) – elektrická stanica PS/DS v strednej časti územia ZSD

nebola nutná. Napriek rozptylu zmien jalového výkonu v rozsahu cca 100 MVAr je napätie na tomto mieste prenosovej sústavy veľmi stabilné.

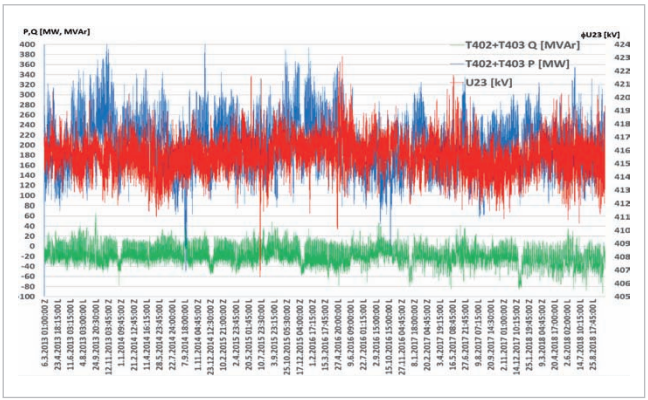
Analýza toku jalového výkonu z DS na napätie v PS

Vplyv toku jalového výkonu z DS do PS na napätie v PS možno dokumentovať na analýze závislosti Q/U. Na obr. 5 sú rôznymi farbami zobrazené pomery v jednotlivých uzlových oblastiach 110 kV za roky 2013 – 2018. Je zrejmé, že tok jalového výkonu ovplyvňuje napätie v jednotlivých uzloch medzi PS/DS rôzne. Existujú uzlové oblasti, kde v zásade nedochádza k žiadnemu zvyšovaniu napätia pri zmene toku jalového výkonu do PS. Naopak, v niektorých uzlových sústavách je zmena napätia v PS výraznejšia, v priemere +2 kV pri maxime toku Q z DS do PS, pričom ojedinelé zmeny dosahujú hodnotu až +8 kV.



Obr. 5 Závislosť Q/U jednotlivých uzlových oblastí (2013 – 2018)

Priebeh a zmeny napätia v prenosovej sústave však nie sú vždy priamo ovplyvňované iba zmenami jalového výkonu v DS. Na obr. 6 je zaznamenaný sumárny priebeh činného a jalového výkonu z dvoch transformátorov PS/DS, ako aj napätie v PS v jednej z najzaťaženejších staníc na území ZSD, ktorá zásobuje strednú časť distribučného územia. Z priebehu je zrejmý rozptyl jalového výkonu od –60 MVAr do +20 MVAr, pričom v určitých krátkych obdobiach dochádza k výraznejšiemu poklesu Q (dodávka do PS). Tento nárast je spôsobovaný prevádzkou uzlovej sústavy v čase, keď je napájaná iba jedným z dvojice transformátorov medzi PS/DS v danej uzlovej oblasti. Rozptyl napätia je prevažne od 412 kV do 419 kV. Z priebehu napätia je zrejmý vyrovnaný medziročný charakter napriek zmene toku jalového výkonu, pričom nadpätie, resp. nárast napätia v PS, nesúviselo priamo so zvýšením dodávky jalového výkonu z DS do PS.



Obr. 6 Priebeh P, Q, U v elektrickej stanici PS/DS (2013 – 2018)

Zhodnotenie problematiky jalového výkonu medzi PS a DS v kontexte legislatívy

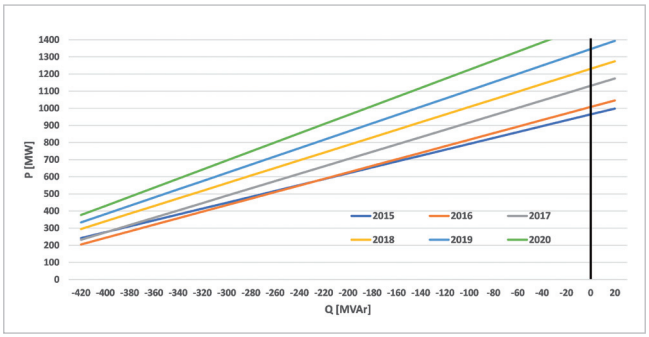
Z fyzikálneho hľadiska je zrejmé, že dodávka jalového výkonu z DS do PS spôsobuje nárast napätia. Na základe analýz vo všetkých uzloch PS/DS bolo preukázané, že možné nadpätie nie vždy súvisí priamo so zvýšením dodávky jalového výkonu z DS do PS. Je preto vhodná analýza takýchto javov v PS jej prevádzkovateľom. Na základe smerníc z grafov Q/U (približná zmena +0,14 kV v PS na –10 MVAr dodávaného jalového výkonu z DS) a teoretického výpočtu zníženia napätia v PS v prípade, ak by neexistovala dodávka jalového výkonu z DS do PS, by napätie v PS pokleslo, avšak naďalej by dochádzalo k nadpätiu v PS.

Jalový tok na mieste pripojenia DS do PS je výrazne závislý od prevádzky a zapojenia jednotlivých transformátorov PS/DS. Táto skutočnosť sa prejavuje najmä pri paralelnej spolupráci transformátorov. K nárastu jalového výkonu na konkrétnom mieste pripojenia DS do PS dochádza pri mimoriadnych zapojeniach sústavy, resp. pri mimoriadnej prevádzke jedného z transformátorov v paralelnej spolupráci. Legislatívny rámec tieto skutočnosti zatiaľ vôbec nereflektuje, a preto je otázne, ako budú v praxi vyžadované, dodržiavané a vyhodnocované toky jalového výkonu do PS v budúcnosti.

Problematika jalového výkonu v DS

Zmeny jalového výkonu v DS

Ako už bolo analyzované v texte vyššie, je zrejmé, že toky jalového výkonu do PS medziročne výrazne rastú. Zmeny, ktoré sa dejú v distribučnej sústave, zachytávajú aj trendy celkového toku jalového výkonu do PS pri danom zaťažení DS činným výkonom (obr. 7). Nulovú bilanciu jalového výkonu medzi PS a DS bolo možné v roku 2015 dosiahnuť pri celkovom činnom zaťažení DS na úrovni 980 MW, pričom v roku 2019 už bolo potrebné zaťaženie minimálne na úrovni 1 350 MW. V roku 2020 už nulová bilancia nebola dosiahnutá.



Obr. 7 Ročné porovnanie toku celkového jalového výkonu v závislosti od zaťaženia PS/DS

Z tejto súvislosti možno dedukovať možné príčiny zmeny, resp. rastu celkového jalového výkonu v distribučnej sústave v súvislosti s:

- kabelizáciou vedení – rast podielu káblových vedení v porovnaní so vzdušnými vedeniami,
- zmenami charakteru používateľov sústavy z induktívnych (odber jalovej energie z DS) do kapacitných (dodávka jalovej energie do DS)
- rastom podielu výrobných elektrických zariadení – odľahčovanie sústavy,
- inými zdrojmi jalového výkonu v DS.

Vplyv kabelizácie vedení

Neustále zvyšovanie spoľahlivosti distribúcie dodávky elektrickej energie vedie k postupnému rastu podielu káblových vedení. Najmä na úrovni VN, ale aj VVN má tento rast zásadný vplyv na prírastok jalového výkonu v DS. Na úrovni NN je tento vplyv vzhľadom na parametre vedení a veľkosť napätia zanedbateľný. Jalový výkon generovaný vedeniami naprázdno je úmerný kvadrátu napätia a klesá kvadrátom prúdu tečúceho vedením.

Rovnica (1) nabíjací výkon vedení:

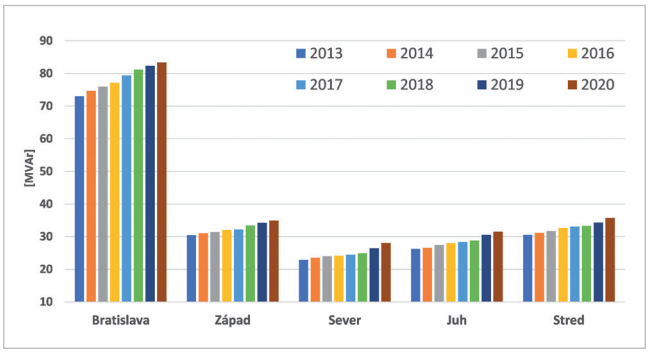
$$Q_c = 3 \cdot (X_C \cdot I_C{}^2) = 3 \cdot (U_f{}^2 \cdot \omega \cdot C)$$
$$Q_L = 3 \cdot (X_L \cdot I_f{}^2) \qquad (1)$$

Pomocou uvedených vzťahov možno vypočítať, že vzdušné vedenie 110 kV bez zaťaženia generuje výkon cca 42 kVAr/km a prirodzený výkon dosahuje až pri zaťažení cca 38 MW. Káblové 110 kV

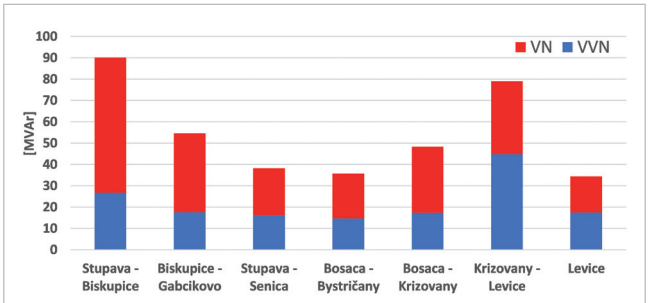
vedenie vzhľadom na svoje parametre nie je výrazne závislé od zaťaženia a prakticky stále generuje cca 850 kVAr/km. Vzdušné 22 kV vedenie bez zaťaženia generuje výkon cca 1 kVAr/km a prirodzený výkon dosahuje už od zaťaženia 1 MW. Káblové 22 kV vedenie bez zaťaženia generuje výkon cca 55 kVAr/km a prirodzený výkon dosahuje až od zaťaženia 15 MW. Je teda zrejmé že veľmi výrazný podiel na raste jalového výkonu v DS majú práve káblové 22 kV vedenia. Medziročný nárast vypočítaného jalového výkonu vedení 22 kV naprázdno v členení na jednotlivé oblasti v DS zachytáva obr. 8.

Pomer nabíjacieho výkonu vedení VVN a VN naprázdno v členení podľa jednotlivých uzlových oblastí je na obr. 9.

Zaznamenaný trend kabelizácie jednotlivých napäťových úrovní v kontexte toku jalovej energie do prenosovej sústavy možno porovnať medziročne so zaťažením sústavy, nakoľko sme v texte poukázali na vzájomnú súvislosť. Na obr. 10 predstavuje plná červená čiara medziročný celkový rast jalového výkonu vedení naprázdno. Prerušovanou červenou čiarou sú zobrazené samostatne prírastky za napäťovú úroveň VVN a VN. Zelenými krivkami sú znázornené medziročné rasty maxima, mediánu a priemeru dodávky celkového jalového výkonu do prenosovej sústavy. Pre úplné dokreslenie obrazu o pomeroch v sústave sú modrými krivkami znázornené dosiahnuté maximá, minimá, ako aj medián zaťaženia distribučnej sústavy činným výkonom v danom roku.



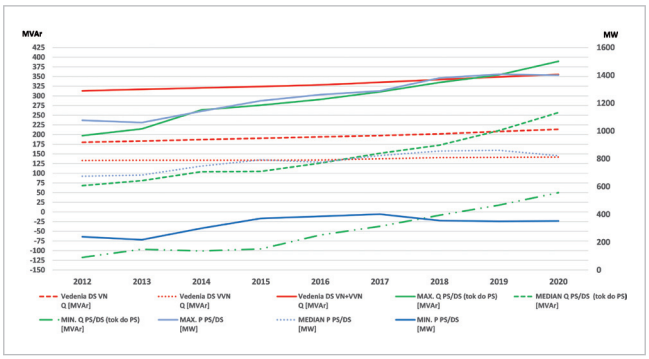
Obr. 8 Nabíjací výkon VN vedení naprázdno v členení podľa oblastí v DS za roky 2013 – 2020



1/2020	MVAr
VN	225,3
VVN	155,0
spolu	380,3

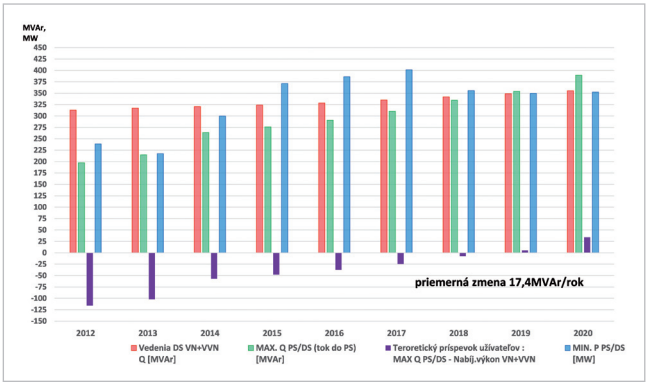
1/2019	MVAr
VN	223.6
VVN	137,4
spolu	361,0

Obr. 9 Nabíjací výkon VVN a VN vedení naprázdno po uzlových oblastiach



Obr. 10 Trend nabíjacieho výkonu vedení a tokov P/Q medzi PS a DS

Pozitívny vplyv na tok jalového výkonu do prenosovej sústavy za uplynulých deväť rokov má rast priemerného zaťaženia sústavy, ktorý sa však za posledné tri roky prakticky zastavil. Nárast priemerného jalového výkonu z DS do PS je na úrovni 21 MVAr/rok (pri uvažovaní iba posledných troch rokov je to až 40 MVAr/rok), pričom priemerný nárast nabíjacieho výkonu vedení VVN + VN naprázdno je iba 5 MVAr/rok (pri uvažovaní iba posledných troch rokov je to 6,6 MVAr/rok). Znepokojujúci je najmä nárast maxima toku jalového výkonu z DS do PS za uplynulých sedem rokov až na úrovni +190 MVAr. Z týchto analýz je zrejmé, že v DS sú ďalšie faktory ovplyvňujúce nárast jalového výkonu.



Obr. 11 Trend teoretického príspevku jalového výkonu do DS od používateľov

Uvažovaním rozdielu maximálneho toku jalového výkonu medzi PS/DS a celého nabíjacieho výkonu vedení VVN a VN môžeme približne určiť podiel príspevku používateľov DS na vzniku jalového výkonu v DS. Medziročný trend tejto zmeny je na obr. 11, kde je vidieť priemerný rast dodávky jalového výkonu od používateľov na úrovni 17,4 MVAr (za posledné tri roky až 20,7 MVAr/rok).

Literatúra

[1] Naradenie komisie (EU) 2016/1388 zo 17. augusta 2016, ktorým sa stanovuje sieťový predpis na pripojenie odberateľov do elektrizačnej sústavy

[2] Technické podmienky PPS, príloha N4. Slovenská elektrizačná prenosová sústava, a. s.

[3] Koníček, Michal: Analýza toku jalového výkonu na VN/NN TR.

Pokračovanie v ďalšom čísle.

Ing. Miroslav Jalec

V roku 2004 ukončil štúdium na Fakulte elektrotechniky a informatiky STU v Bratislave, odbor výroba a rozvod elektrickej energie. V rokoch 2002 – 2006 pracoval ako projektant NN a VN zariadení. Od roku 2006 je vedúcim rozvoja distribučnej sústavy v spoločnosti Západoslovenská distribučná, a. s. Podieľa sa na riadení rozvoja VVN a VN sústavy, metodík, legislatívy, pripájania priemyselných odberateľov, pripájania a merania výrobných zariadení elektrickej energie, ako aj nasadzovania nových technických riešení najmä v oblasti VN sústavy.

Ing. Miroslav Jalec

Západoslovenská distribučná, a.s.
miroslav.jalec@zsdis.sk