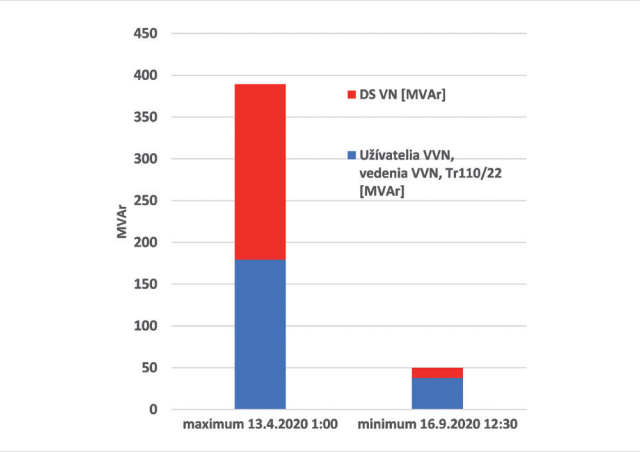
Analýza jalového výkonu v DS a toku jalovej energie medzi DS a PS (2)

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.

Charakteristika používateľov a sústavy na hladine VVN a VN + NN

Vznik jalového výkonu na úrovni VVN a VN, ako už bolo preukázané v prvej časti seriálu, výrazne závisí od zaťaženia, teda predovšetkým od odberu používateľov v sústave. Hodnoty jalového výkonu možno porovnať v dvoch extrémnych prípadoch – pri maximálnom a minimálnom zaťažení distribučnej sústavy (obr. 12). Sústava VN (vrátane príspevku z NN) sa pohybuje v generovaní výkonu od 12 MVAr až po 210 MVAr. Sústava VVN je v tomto smere stabilnejšia a neustále generuje jalový výkon v rozmedzí 40 až 180 MVAr. Faktom však zostáva, že DS aj v minime jalového výkonu neustále generuje tok do PS.

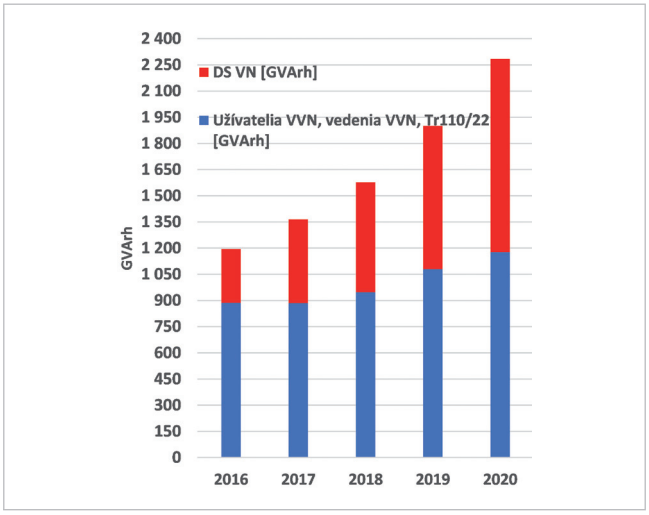


Obr. 12 Jalový výkon VVN a VN sústavy pri minime a maxime zaťaženia DS

Medziročný trend generovania jalovej energie sústavami VVN a VN je na obr. 13. Aj z tohto pohľadu je zrejmé, že k výraznejšiemu nárastu dochádza na úrovni VN (vrátane príspevku z NN), kde sú možnými príčinami kabelizácia VN sústavy a výraznejšie sa meniaci charakter používateľov VN, NN v porovnaní s VVN odberateľmi, ktorých je tiež nepomerne menej.

Detailnejší pohľad na situáciu jednotlivých napäťových úrovní je na obr. 2 *(pozri 1. časť seriálu v ATP Journal 6/2022, pozn. red.)*, kde je vidieť, že sústava VVN vrátane jej používateľov a distribučných transformátorov 110/22 kV (bodkovaná modrá krivka) celkovo generuje jalový výkon v rozsahu približne 120 MVAr, pričom priebeh jalového výkonu je pomerne vyrovnaný počas jednotlivých dní, resp. striedania dňa a noci v rozsahu ±30 MVAr. Sústava VN vrátane jej používateľov a NN sústavy (neprerušovaná červená krivka) celkovo generuje jalový výkon v rozsahu 100 až 230 MVAr, pričom priebeh jalového výkonu je výrazne závislý práve od zaťaženia činným výkonom napäťovej hladiny VN, resp. NN.

Maximum dodávky jalového výkonu do prenosovej sústavy je generované pri maximálnom odľahčení sústavy (350 MW) na úrovni cca 389 MVAr. Tento výkon takmer zodpovedá celkovému rozsahu VVN a VN vedení na prázdno (380 MVAr). Určiť presný vplyv všetkých používateľov pripojených na napäťovú hladinu VVN a VN z priebehových meraní je nad rámec predmetných analýz. O používateľoch VVN sústavy však možno konštatovať, že v čase najväčšieho odľahčenia DS, keď sa dá predpokladať maximálny tok jalového výkonu do DS od používateľov, bola celková bilancia jalového výkonu 5,8 MVAr odberu z DS. Prispievateľmi boli iba trakcia a jeden používateľ s výkonom dodávky 5 MVAr. Z týchto analýz možno usúdiť, že dominujúcejším efektom na hladine VVN a VN je práve rozsah samotnej DS ako jej používatelia.



Obr. 13 Trend jalovej energie VVN a VN sústavy

Na možnú veľkosť kompenzačného výkonu na úrovni VVN v elektrických staniciach medzi PS/DS sa poukázalo v kapitole s názvom Analýza výkonov P/Q medzi PS a DS *(pozri 1. časť seriálu v ATP Journal 6/2022, pozn. red.)* na dvoch príkladoch histogramov veľkosti jalového výkonu a jeho početnosti v hodinách (2013 – 2018). Zároveň boli prezentované výrazné rozdiely potreby tohto výkonu pri striedaní dňa a noci v súvislosti so zaťažením sústavy činným výkonom. Obdobné trendy boli analyzované aj na úrovni VN v distribučných rozvodniach 110/22 kV. Veľkosť kompenzačného výkonu bez ohľadu na technické riešenie je deklarovaná v uvedených tabuľkách so zaznamenanými dosiahnutými minimálnymi a maximálnymi jalovými výkonmi v rokoch 2018 a 2019 (záporné hodnoty znamenajú dodávku jalového výkonu do DS) v členení jednotlivých rozvodní VVN/VN prislúchajúcich k danej uzlovej oblasti.

Mestský charakter používateľov sústavy s výlučne káblovými VN vedeniami zobrazuje tab. 1 pre uzlovú oblasť (ďalej UO) napájajúcu

UO Stupava – P. Biskupica (Bratislava)	min. 2018	max. 2018	min. 2019	max. 2019	nárast max 2019 – 2018
Čulenova	3,9	-4,6	0,7	-4,5	0,1
Karlova Ves	-1,2	-4,6	-3,4	-4,7	-0,1
Lamač	-4,1	-11,1	-4,6	-10,7	0,3
Ostredky	-2,6	-13,4	-5,7	-12,0	1,4
Ovsište	-2,4	-5,3	-3,3	-5,3	0,0
P. Biskupice	-2,7	-7,6	-2,3	-9,0	-1,4
Podvornice	-2,6	-6,2	-3,8	-6,2	0,0
Pionierska	-0,6	-5,7	-2,0	-5,8	-0,1
Petržalka Kolmá	-4,4	-8,0	-5,8	-8,5	-0,6
Turbínová	0,0	-5,0	-0,5	-3,4	1,6
SUMA VN	**-19,4**	**-65,9**	**-36,2**	**-67,5**	**-1,6**
Stupava T402	-0,4	-64,6	-23,4	-66,8	-2,2
P. Biskupice	0,0	-50,5	-18,2	-47,2	3,3
Suma T402+PB	**-25,6**	**-92,0**	**-55,9**	**-93,6**	**-1,6**
VVN = (T402+PB) – VN	13,7	-26,0	-18,0	-26,1	-0,1

Tab. 1 Minimá a maximá jalového výkonu v UO Bratislava na jednotlivých staniciach VVN/VN (2018 – 2019)

UO Križovany – Levice stredná časť ZDS	min. 2018	max. 2018	min. 2019	max. 2019	nárast max 2019 – 2018
Hurbanovo	1,8	-1,3	1,0	-0,8	0,5
Kráľová	2,7	-6,6	1,2	-4,1	2,4
Nitra Čermáň	1,1	-4,1	0,3	-4,0	0,2
Nitra Chrenová	-1,4	-5,4	-2,7	-5,3	0,0
Nitra Sever PpNS	0,1	-5,1	-0,1	-3,7	1,4
Vráble	1,4	-1,1	1,5	-0,1	1,0
Sládkovičovo	6,3	-2,2	4,8	-1,9	0,3
Nové Zámky	3,5	-2,9	1,4	-3,2	-0,3
PP Sereď	0,0	-2,8	-0,1	-2,2	0,6
SUMA VN	**15,3**	**-31,0**	**4,8**	**-23,5**	**7,5**
Križovany T403	0,0	-54,2	-20,0	-57,9	-3,7
Levice T403	-1,8	-36,6	0,3	-34,6	2,0
SUMA T403+T403	**-6,8**	**-83,1**	**-31,2**	**-71,4**	**11,7**
VVN = (T403+T403) – VN	-14,9	-52,0	-35,3	-47,9	4,2

Tab. 2 Minimá a maximá jalového výkonu v UO strednej časti distribučného územia na jednotlivých staniciach VVN/VN (2018 – 2019)

mesto Bratislava. Z údajov je zrejmá potreba kompenzácie na rozvodniach až do výšky 10 MVAr, pričom zmena jalového výkonu je väčšia ako polovica takéhoto kompenzačného výkonu. Principiálne by však prípadná kompenzácia mohla byť pripojená prakticky trvalo.

Na porovnanie, zmiešaný charakter používateľov sústavy mestského aj vidieckeho typu s prevažujúcimi vzdušnými VN vedeniami v sústave zobrazuje tab. 2 pre uzlovú oblasť napájajúcu strednú časť distribučného územia. Z údajov sú zrejmé veľmi individuálne výkonové potreby kompenzácie do výšky 5 MVAr. Zmena jalového výkonu je veľmi výrazná a v mnohých prípadoch by bolo pravdepodobne vhodné kompenzáciu odpájať, resp. ladiť plynule.

Pri pohľade na samotných používateľov sústavy treba podotknúť, že nastavená cenová regulácia v kontexte zamedzenia dodávky jalového výkonu do DS, najmä v čase ich nízkeho odberu, nie je dostatočne motivujúca. V zmysle aktuálneho cenníka ZSD pre rok 2021 je jalová dodávka elektriny do DS v tarife 16,6 eur za 1 MVAr/h. Na jednoduchom príklade možno ukázať, že ak by používateľ práve napr. počas nízkeho (nočného) zaťaženia, keď je problém dodávky

jalovej energie z DS do PS najväčší, dodával počas 12 hodín trvalo 1 MVAr, tarifná pokuta za mesiac by bola 6 000 eur (16,6 eur x 12 hod x 30 dní). Je otázne, či je takto nastavená tarifa dostatočne motivujúca vzhľadom na celkový takto dodávaný výkon jalovej energie do DS potenciálne od mnohých používateľov DS, ktorý následne generuje nutné opatrenia v celej elektrizačnej sústave.

Naopak, nastavené tarifné prirážky, z historického pohľadu, na udržanie predpísaného účinníka pre odber jalovej energie v rozsahu cos φ = 1 – 0,95 nútia zákazníkov riešiť kompenzáciu neodobratia väčšieho množstva jalovej energie z distribučnej sústavy v zmysle nastaveného spôsobu vyhodnocovania z mesačne nameraných hodnôt jalovej induktívnej elektriny v kVAr/h a činnej elektriny v kW/h v rovnakom čase:

$$tg\ \varphi = \frac{kVArh}{kWh}.$$

Moderné aktívne kompenzačné zariadenia dokážu bez väčších technických a investičných nákladov zabezpečiť vyregulovanie účinníka na hodnotu blízku jednej, a teda generovaný výkon jalovej energie na VN, resp. VVN vedení nemá byť kde spotrebovávaný, čím dochádza k jeho pretoku do vyšších napäťových hladín. Zároveň sa do ES týmto spôsobom pripájajú často zbytočné kondenzátorové batérie.

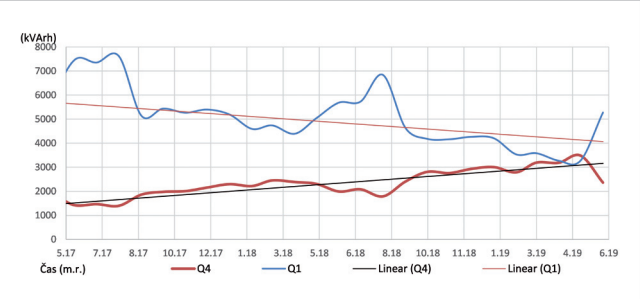
Charakter používateľov a sústavy na hladine NN

Zmeny na napäťovej úrovni NN možno analyzovať sumárne z centrálnych meraní inštalovaných v distribučných trafostaniciach 22/0,4kV. Preto bol na vhodne vytipovanej vzorke trafostaníc analyzovaný trend celkovej činnej spotreby (P+), odberu jalovej energie z DS (Q1) a dodávky jalovej energie do DS (Q4) v 15-minútových intervaloch.

Mestský typ NN sústavy a jej používateľov

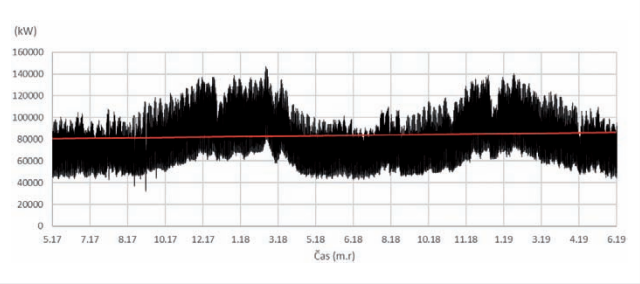
Charakter mestského typu odberu reprezentovalo 981 distribučných trafostaníc VN/NN v Bratislave [3]. Za obdobie jedného roka od 5/2018 až do 6/2019 bola na danej vzorke celková činná spotreba 700 GWh, pričom odber jalovej energie z DS bol 51 GVArh (7,3 % z činného výkonu) a dodávka jalovej energie do DS 32 GVArh (4,6 % z činného výkonu) (obr. 14).

Napriek celkovo stále prevládajúcemu induktívnemu zaťaženiu dochádza k jeho poklesu na úrovni cca 1,3 % za rok (Q1/P) a rastu dodávky jalovej energie do DS na úrovni cca 1,2 % (Q4/P). Dôležitým zistením za sledované obdobie je aj skutočnosť, že väčšinu objemu jalovej energie dodávali do sústavy práve trafostanice s najnižšou spotrebou činnej energie. Pomer energie Q4/P pri trafostaniciach s nízkou spotrebou je cca 12 %, pričom pri trafostaniciach s vysokou spotrebou je tento pomer iba cca 1,7 %. Pomer spotreby jalovej energie Q1/P je cca 8 % a nie je závislý od veľkosti činnej spotreby trafostanice.

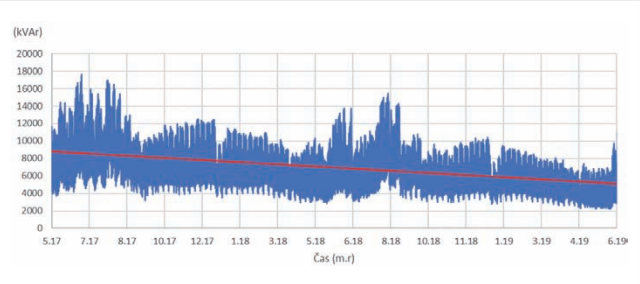


Obr. 14 Priemerná dodávaná/odoberaná jalová energia z 981 trafostaníc VN/NN v Bratislave [3]

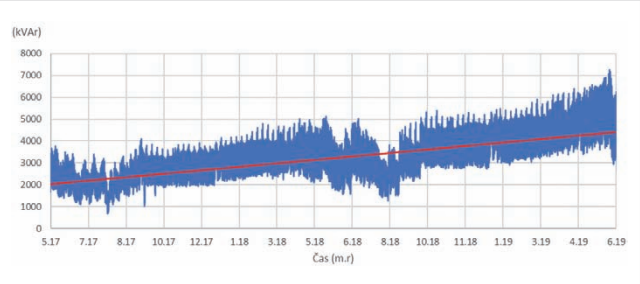
Trend kumulovaného činného a jalového výkonu za obdobie dvoch rokov od 5/2017 do 6/2019 zachytávajú obr. 15 – 17. Priemerné zaťaženie bolo na úrovni 80 MW so zmenami v rozsahu od 40 až po 140 MW. Sumárny odoberaný jalový výkon z DS bol v rozmedzí 2 – 18 MVAr s klesajúcim medziročným priemerným trendom



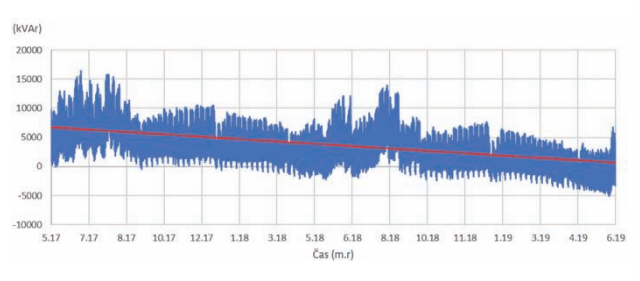
Obr. 15 Kumulovaný činný výkon mestských trafostaníc VN/NN [3]



Obr. 16 Kumulovaný odoberaný jalový výkon z DS mestských trafostaníc VN/NN [3]

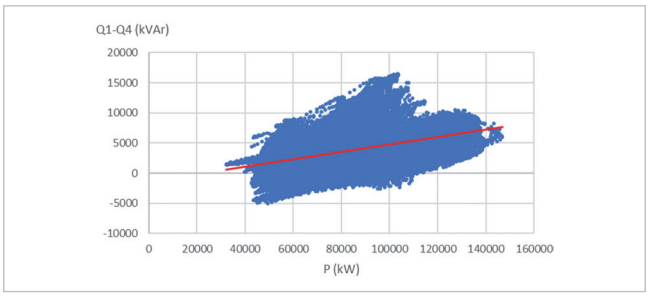


Obr. 17 Kumulovaný dodávaný jalový výkon do DS mestských trafostaníc VN/NN [3]



Obr. 18 Rozdiel kumulovaných jalových výkonov mestských trafostaníc VN/NN [3]

cca 1,8 MVAr. Sumárny dodávaný jalový výkon do DS bol v rozmedzí 1 – 7 MVAr s rastúcim medziročným priemerným trendom cca 1,2 MVAr. Celkový trend zmeny na 981 trafostaniciach je teda +3 MVAr/rok v smere rastu jalového výkonu v NN DS (obr. 18), čo je cca 3,7 % voči priemernému zaťaženiu (Q4/P = 3/80). Kumulatívne na mestských distribučných trafostaniciach VN/NN však stále prevláda induktívny charakter (odber jalového výkonu z DS).



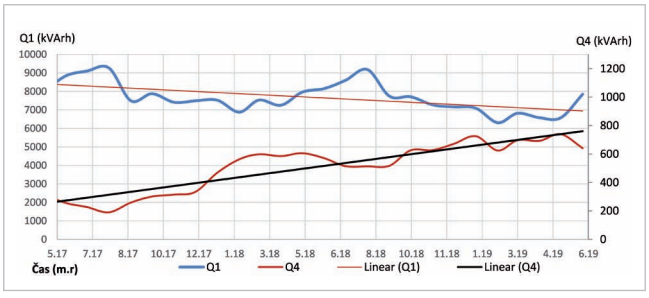
Obr. 19 Závislosť P/Q – kumulovaný jalový výkon mestských trafostaníc VN/NN [3]

Charakter NN sústavy, resp. jej používateľov možno tiež vyjadriť závislosťou činného a jalového výkonu. Obr. 19 zobrazuje rozdiel kumulovaných hodnôt odoberaného a dodávaného jalového výkonu v závislosti od kumulovaného činného odberu v 15-minútovom rastri (kladná hodnota Q znamená odber jalového výkonu z DS). Aj táto závislosť dokazuje, že tok jalového výkonu do DS je významnejší v období, keď je NN sústava odľahčená.

Vidiecky typ NN sústavy a jej používateľov

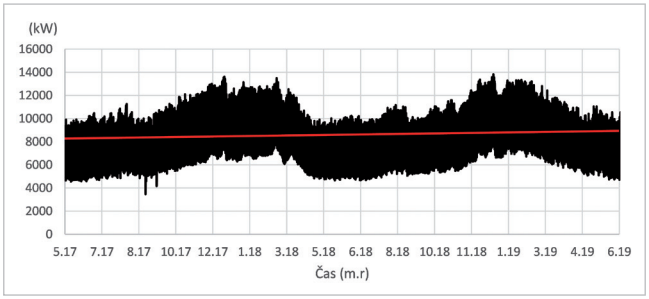
Charakter vidieckeho typu odberu reprezentovalo 159 distribučných trafostaníc VN/NN v okolí miest Levice, Bošáca, Štúrovo [3]. Za obdobie jedného roka od 6/2018 až do 6/2019 bola na danej vzorke celková činná spotreba 73 GWh, pričom odber jalovej energie z DS bol 13 GVArh (17,8 % z činného výkonu) a dodávka jalovej energie do DS iba 1,3 GVArh (1,7 % z činného výkonu) (obr. 20).

Napriek celkovo stále prevládajúcemu induktívnemu odberu dochádza k trendu jeho poklesu na úrovni cca 2,2 % za rok (Q1/P) a rastu dodávky jalovej energie do DS na úrovni cca 0,6 % (Q4/P). Dôležitým zistením za sledované obdobie je rovnaká skutočnosť ako pri mestských trafostaniciach, že väčšinu objemu jalovej energie dodali do sústavy práve trafostanice s najnižšou spotrebou činnej energie. Pomer energie Q4/P pri trafostaniciach s nízkou spotrebou je cca 12 %, pričom pri trafostaniciach s vysokou spotrebou je tento pomer iba cca 1,7 %. Pomer spotreby jalovej energie Q1/P je cca 18 % a nezávisí od veľkosti činnej spotreby trafostanice.

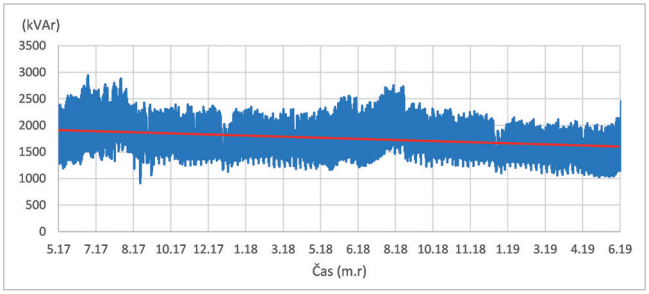


Obr. 20 Priemerná dodávaná/odoberaná jalová energia zo 159 trafostaníc VN/NN – vidiek [3]

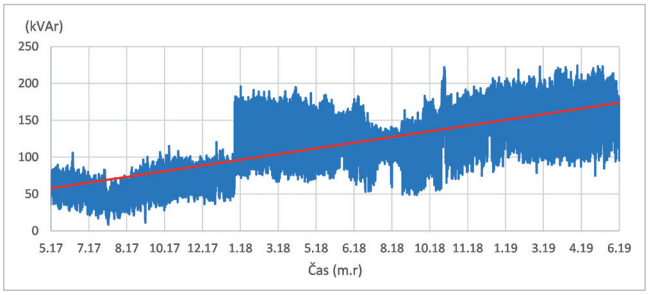
Trend kumulovaného činného a jalového výkonu za obdobie dvoch rokov od 5/2017 do 6/2019 zachytávajú obr. 21 – 23. Priemerné zaťaženie bolo na úrovni 8 MW so zmenami v rozsahu od 4 až po 14 MW. Sumárny odoberaný jalový výkon z DS bol v rozmedzí 1 až 3 MVAr s klesajúcim medziročným priemerným trendom cca 0,15 MVAr. Sumárny dodávaný jalový výkon do DS bol v rozmedzí 0 až 0,18 MVAr s rastúcim medziročným priemerným trendom cca 0,06 MVAr. Celkový trend zmeny na 159 trafostaniciach je teda +0,2 MVAr/rok v smere rastu jalového výkonu v NN DS (obr. 24),



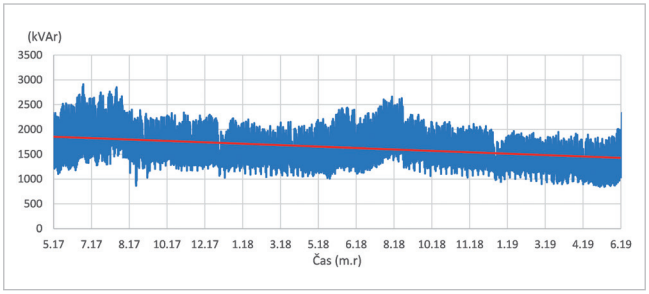
Obr. 21 Kumulovaný činný výkon vidieckych trafostaníc VN/NN [3]



Obr. 22 Kumulovaný odoberaný jalový výkon z DS vidieckych trafostaníc VN/NN [3]



Obr. 23 Kumulovaný dodávaný jalový výkon do DS vidieckych trafostaníc VN/NN [3]



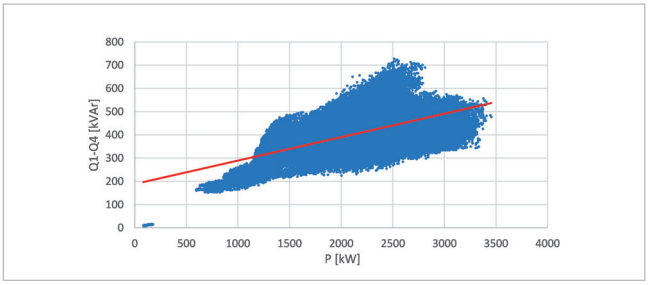
Obr. 24 Rozdiel kumulovaných jalových výkonov vidieckych trafostaníc VN/NN [3]

čo je cca 2,5 % voči priemernému zaťaženiu (Q4/P = 0,2/8). Kumulatívne vidiecke distribučné trafostanice VN/NN majú výrazný induktívny charakter (odber jalového výkonu z DS).

Charakter vidieckej NN sústavy, resp. jej používateľov možno tiež vyjadriť závislosťou činného a jalového výkonu. Na obr. 25 je rozdiel kumulovaných hodnôt odoberaného a dodávaného jalového výkonu v závislosti od kumulovaného činného odberu v 15-minútovom rastri (kladná hodnota Q znamená odber jalového výkonu z DS). Aj táto závislosť dokazuje, že odber jalového výkonu z DS klesá s odľahčením sústavy.

Zhodnotenie trendov v sústave NN

Získané trendy zmien rastu jalového výkonu v NN sústave (3 MVAr/rok pre 981 TS mestského typu a 0,2 MVAr/rok pre 159 TS vidieckeho typu) možno aproximovať na celé distribučné územie. Sumárny počet distribučných trafostaníc je približne 8 500, z tohto cca 2 000 je v rámci Bratislavy a ďalších 1 000 môžeme uvažovať



Obr. 25 Závislosť P/Q – kumulovaný jalový výkon vidieckych trafostaníc [3]

v ostatných mestských aglomeráciách. Pri týchto predpokladoch sa dá zrátať predpokladaný celkový nárast jalového výkonu v NN sústave na úrovni cca 16,1MVAr/rok:

$$\Delta Q_{NN} = \left(\frac{3000}{981} * 3MVar\right) + \left(\frac{5500}{159} * 0{,}2MVar\right) = \\ = 16{,}1MVAr\ /\ rok \qquad (2)$$

Z vykonaných analýz možno konštatovať, že v globálnom meradle v NN sústave, najmä vidieckeho typu, stále prevláda odber jalovej energie. Trendy však jasne naznačujú, že v mestských oblastiach dochádza k významnejším zmenám a rastu jalového výkonu dodávaného do DS. Vo vidieckych lokalitách je síce trend podobný, ale podiel celkovej dodávky jalovej energie do DS je výrazne nižší.

Dôležité závery z vykonaných analýz teda sú:

- v čase nízkeho zaťaženia oba typy odberov generujú jalový výkon do DS, a teda v stave odľahčenia distribučnej sústavy sa aj NN sústava môže stať nezanedbateľným zdrojom jalového výkonu,
- pokles odberu jalovej energie a rast jej dodávky v trafostaniciach VN/NN je sumárne na úrovni 2,5 % za rok, pričom v oblasti dodávky jalovej energie je dominantný iba mestský typ odberu,
- nízko zaťažené lokality (trafostanice) sa významne podieľajú na dodávke jalovej energie do DS približne pomerom 12 % vzhľadom na činnú spotrebu,
- celkový trend zmeny – predpokladaný nárast jalového výkonu do DS z NN úrovne pre celé distribučné územie je cca +16,1 MVAr za rok.

Literatúra

[1] Nariadenie komisie (EÚ) 2016/1388 zo 17. augusta 2016, ktorým sa stanovuje sieťový predpis pre 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