SLOVENSKÁ TECHNICKÁ
UNIVERZITA V BRATISLAVE
FAKULTA ELEKTROTECHNIKY
A INFORMATIKY

Ing. Igor Chrapčiak

Autoreferát dizertačnej práce

Meranie v prenosovej a distribučnej sústave

na získanie akademickej hodnosti doktor (philosophiae doctor, PhD.)

v doktorandskom študijnom programe: **Meracia technika**

v študijnom odbore 5.2.54 meracia technika

Miesto a dátum: Bratislava, december 2016

SLOVENSKÁ TECHNICKÁ UNIVERZITA
V BRATISLAVE

FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A INFORMATIKY

Ing. Igor Chrapčiak

Autoreferát dizertačnej práce

Meranie v prenosovej a distribučnej sústave

na získanie akademickej hodnosti doktor (philosophiae doctor, PhD.)

v doktorandskom študijnom programe: Meracia technika

Miesto a dátum: Bratislava, december 2016

Dizertačná práca bola vypracovaná v externej forme doktorandského štúdia

Na Ústave elektrotechniky Fakulty elektrotechniky a informatiky STU v Bratislave

Predkladateľ: **Ing. Igor Chrapčiak**

Schrack Technik, s.r.o.,

Ivanská cesta 10/C

821 04 Bratislava

Školiteľ: **doc. Ing. Peter Kukuča, CSc.**

Slovenská technická univerzita v Bratislave

Ústav elektrotechniky

Ilkovičova 3, 812 19 Bratislava

Oponenti: **prof. Ing. Ivan Kneppo, DrSc.**

951 24 Nové Sady 240

Dr.h.c. prof. Ing. Michal Kolcun, PhD.

Fakulta elektrotechniky a informatiky

Technická univerzita v Košiciach

Letná 9, 042 00 Košice

Autoreferát bol rozoslaný: .....

Obhajoba dizertačnej práce sa koná: o hod.

Na Fakulte elektrotechniky a informatiky Slovenskej technickej univerzity v Bratislave, Ilkovičova 3

Prof. Dr. Ing. Miloš Oravec dekan fakulty

Obsah

1 Ciele a tézy dizertačnej práce 5

2 Úvod, súčasný stav v oblasti dotknutej problematiky 5

3 Jednofázová sústava. Analýza výkonov a ich vplyvu na výšku strát v sústave. 6

3.1 Základné veličiny v jednofázovej sústave - harmonické napätie a prúd 6

3.1.1 Faktor výkonu, účinník 7

3.2 Základné veličiny v jednofázovej sústave - neharmonické napätie a prúd 7

3.2.1 Účinník (faktor výkonu, PF) v jednofázovej sústave, neharmonické napätie a prúd 9

3.2.2 Niektoré príklady nameraných a vypočítaných veličín v jednofázovej sústave 9

4 Trojfázová sústava. Zdanlivé výkony a ich zložky 9

4.1 Trojfázová sústava, harmonické napätie a prúd 9

4.1.1 Geometrický zdanlivý výkon 10

4.1.2 Aritmetický zdanlivý výkon 10

4.2 Trojfázová sústava - neharmonické napätie a prúd 10

4.2.1 Geometrický zdanlivý výkon trojfázovej sústavy, neharmonické napätie a prúd 10

4.2.2 Aritmetický zdanlivý výkon trojfázovej sústavy, neharmonické napätie a prúd 11

4.2.3 Zdanlivý výkon trojfázovej sústavy podľa štandardu IEEE 1459, ekvivalentný zdanlivý výkon 11

4.2.4 Správny zdanlivý výkon (Rechtleistung) 12

4.2.5 Štandard DIN 40110, kolektívny zdanlivý výkon 13

4.3 Porovnanie napätí a prúdov rôznych definícií zdanlivých výkonov 13

4.3.1 Prúd nulového vodiča 14

4.3.2 Zložkový tvar zdanlivého výkonu, trojvodičová a štvorvodičová sústava 15

4.3.3 Rekapitulácia zdanlivých výkonov v trojfázovej sústave 16

4.3.4 Ako je to v praxi? Príklady a výstupy z meraní 16

5 Faktor výkonu, vplyv jalového výkonu, deformačného výkonu a výkonov nesymetrie na straty v sústave 18

5.1 Geometrický faktor výkonu 18

5.2 Aritmetický faktor výkonu 18

5.3 Správny, ekvivalentný a kolektívny faktor výkonu 18

5.4 Porovnanie priebehov rôznych vyjadrení faktorov výkonu, príklady 19

5.5 Koeficient zvýšenia strát 20

6 Vplyv OZE na výkonové pomery a kvalitatívne parametre elektrickej siete 20

6.1 Analýza najdôležitejších negatívnych vplyvov malých fotovoltických elektrární na siete nízkeho napätia. 21

6.2 Meranie a analýza výkonových pomerov a efektívnosti vybraných OZE, príklady 21

6.3 Meranie zmiešaného odberu a dodávky 22

7 Analýza hodnotenia výkonových veličín a kvalitatívnych parametrov elektriny v integrálnej podobe na základe údajov fakturačných elektromerov 23

7.1 Vyhláška Ministerstva hospodárstva 358/2013 Z .z. zo dňa 28. 10. 2013 [46] 23

8 Prínosy pre prax 23

Záver 26

Literatúra 26

Publikované práce 27

1 Ciele a tézy dizertačnej práce

Cieľom práce je analyzovať súčasný stav a navrhnúť prípadné doplňujúce zmeny vo filozofii merania fakturačných veličín a vybraných prevádzkových parametrov elektriny v meniacom sa prostredí prenosovej a distribučných sústav.

Práca prepája dve v súčasnej praxi takmer nezávislé problematiky - oblasť merania a oblasť súčasnej energetiky. Rieši potrebu a spôsob merania a vyhodnocovania výkonových a kvalitatívnych parametrov elektriny a analyzuje ich vplyv na výšku technických strát v elektrizačnej sústave. Dotýka sa tém energetickej legislatívy, energetickej efektívnosti, nasadzovania obnoviteľných zdrojov energie, inteligentných meracích systémov a inteligentných sietí.

Nosnou témou práce sú analýza zdanlivého výkonu a jeho zložiek, faktor výkonu v súvislosti s efektívnosťou využívania elektriny a analýza technických strát, ktoré sú generované fázovým posunom medzi napätím a prúdom, vyššími harmonickými a nesymetriou.

Na základe teoretických úvah, výsledkov praktických meraní a v zhode s platnou legislatívou, ako aj s jej možným ďalším smerovaním, boli zvolené nasledovné oblasti skúmania a zároveň tézy dizertačnej práce:

- Analýza výkonových pomerov v distribučnej sústave, u koncových odberateľov elektriny a v distribučných transformačných staniciach
- Vyhodnocovanie účinníka, analýza vplyvu jalového a deformačného výkonu a vplyvu nesymetrie na výšku strát v distribučnej sústave
- Vplyv OZE na výkonové pomery a kvalitatívne parametre siete
- Hodnotenie efektívnosti využívania elektriny a siete v reálnych podmienkach
- Analýza hodnotenia výkonových veličín a kvalitatívnych parametrov elektriny v integrálnej podobe a možnosť ich merania na základe údajov fakturačných elektromerov
- Návrh vhodných legislatívnych odporúčaní

2 Úvod, súčasný stav v oblasti dotknutej problematiky

Historický vývoj energetiky na Slovensku zabezpečil výstavbou centrálnych zdrojov a vybudovaním prenosovej a distribučných sústav spoľahlivú, bezpečnú a stabilnú energetickú infraštruktúru.

V súčasnej energetike vzniká nový fenomén výroby elektriny v menších, hlavne obnoviteľných distribuovaných zdrojoch elektrickej energie, situovaných do miest spotreby a pripájaných aj do distribučných sústav na úrovni nízkeho napätia. Centralizovaná výroba a decentralizovaná spotreba sú dopĺňané lokálnou decentralizovanou výrobou, pri určitých typoch zdrojov s ťažšie predikovateľným priebehom výroby, s prebytkom alebo nedostatkom energie v závislosti od vonkajších vplyvov. Menia sa aj podmienky na energetickom trhu. V súvislosti s liberalizáciou, vytváraním jednotného európskeho trhu s elektrinou, požiadavkami na ekológiu, ekonomickými záujmami, potrebami a príležitosťami sa menia aj obchodné podmienky.

Aj vlastnosti elektriny sa menia, menia sa jej výkonové a kvalitatívne parametre. V dôsledku nárastu počtu novodobých zdrojov a moderných elektronických spotrebičov dochádza v určitej doposiaľ nekvantifikovanej miere k jej čiastočnému „zamoreniu“ vyššími harmonickými, narastá podiel "neaktívnych" výkonov a narastajú doposiaľ nevyhodnocované technické straty, ktoré niekto bude musieť zaplatiť.

Tento trend bude pokračovať. Vývoj, ktorý nastal, vyžaduje zmenu doterajšieho prístupu v oblasti využívania energie, nasadzovania nových energetických zdrojov aj prevádzky prenosových a distribučných sústav. Snaha o vyššiu sebestačnosť, podpora rozvoja OZE a elektromobility, očakávaný nárast počtu nových technologických komponentov pripájaných do distribučných sústav, hlavne decentralizovaných zdrojov energie a nových typov spotrebičov, akými sú elektromobily, batérie či iné akumulačné zariadenia a inteligentné technológie v domácnostiach, prinášajú nielen nové príležitosti, ale aj úlohy a riziká.

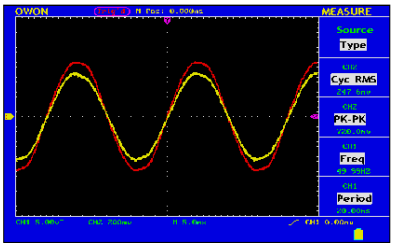
Možným riešením čoraz zložitejšej situácie v elektroenergetike štátov EÚ, ako aj v ostatných vyspelých štátoch sveta sa javí budovanie nových, „smart“ energetických systémov prepájajúcich výrobu, prenos, distribúciu a spotrebiteľov elektriny, budovanie inteligentných sietí (IS, smart grids).

Ich základnou a nevyhnutnou súčasťou sú správne a komplexné namerané dáta, ktorých zdrojom má byť v prvom rade hlavne inteligentný merací systém (IMS, Smart Metering). Čo všetko treba merať? Aké dáta poskytujú používané meracie prístroje? Meriame správne?

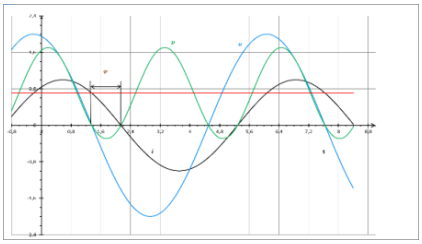
3 Jednofázová sústava. Analýza výkonov a ich vplyvu na výšku strát v sústave.

3.1 Základné veličiny v jednofázovej sústave - harmonické napätie a prúd

Východisková situácia je, keď sú napätie aj prúd harmonické (so sínusovým priebehom, obr. 3.1 a obr. 3.2). Z takýchto priebehov sú odvodené prakticky všetky platné používané normy a predpisy energetických sústav SR.



Obr. 3.1 napätie aj prúd sú harmonické



Obr. 3.2 Časový priebeh okamžitých hodnôt harmonického napätia, prúdu a výkonu

Pre jednoduchšiu interpretáciu výkonov a odvodenie vzťahov medzi nimi sa pri striedavých veličinách používa ich komplexný tvar, fázory.
Fázor výkonu ***S**(t)* sa vypočíta podľa vzťah

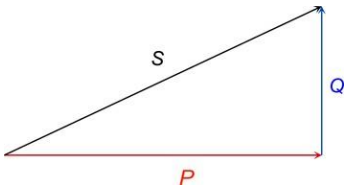
$$\boldsymbol{S}(t) = \boldsymbol{U}.\boldsymbol{I} + \boldsymbol{U}.\boldsymbol{I}^{*} \tag{3.1}$$

kde $\boldsymbol{I}^{*}$ je konjugovaný fázor prúdu.
Prvá časť vzťahu (3.1) predstavuje zložku fázora výkonu meniacu sa (rotujúcu) v čase, druhá časť je konštantná komplexná hodnota. Nakoľko stredná hodnota prvej časti je vo výsledku nulová, v praxi sa využíva len druhá polovica tohto vzťahu, ktorá sa nazýva vektor výkonu ***S.***

$$\boldsymbol{S} = \boldsymbol{U}.\boldsymbol{I}^{*} = U.I.e^{j(\alpha-\beta)} = U.I.e^{j\varphi} = U.I.\cos(\varphi) + j.U.I.\sin(\varphi) \tag{3.2}$$

Z uvedeného vzťahu vyplývajú definície pre činný a jalový výkon. Činný výkon *P* je rovný reálnej zložke vektora výkonu ***S***, jalový výkon *Q* je rovný imaginárnej zložke vektora výkonu ***S***.

Na obr. 3.3 je znázornený komplexný výkon v grafickej forme. Tvorí pravouhlý trojuholník.



Obr. 3.3 Znázornenie výkonových veličín v komplexnej rovine

Veličina ***S*** dostala názov *Zdanlivý výkon*. Platí:

$$S^2 = P^2 + Q^2, \text{ resp. } S = \sqrt{P^2 + Q^2} \tag{3.3}$$

Po úprave:

$$S^2 = P^2 + Q^2 = U^2 I^2 \cos^2\varphi + U^2 I^2 \sin^2\varphi = U^2 I^2 (\cos^2\varphi + \sin^2\varphi) \tag{3.4}$$

$$S = U.I \tag{3.5}$$

Činný výkon P [W], predstavuje užitočný prenášaný výkon, ktorý sa v najrôznejších spotrebičoch premieňa na iný druh energie (mechanickú, tepelnú, svetelnú) a za určitý čas vykonáva požadovanú prácu. Je merateľný, jednoznačne definovaný a z pohľadu merania neproblematický.

Jalový výkon Q [var], hoci v skutočnosti ako reálny výkon vykonávajúci zmysluplnú prácu neexistuje, energiu spotrebováva na generovanie fázového posunu medzi napätím a prúdom. Vzniká najčastejšie pripojením kapacitnej alebo indukčnej záťaže. Môže byť kladný, keď napätie predbieha prúd, alebo záporný, keď prúd predbieha napätie. Ako vypočítateľná a merateľná veličina ovplyvňuje celkový zdanlivý výkon a má tak vplyv na efektívnosť odberu, resp. efektívnosť prenosu elektrickej energie.

Zdanlivý výkon S [VA], (celkový výkon prenášaný sústavou), ako súčin efektívnych hodnôt napätia a prúdu, predstavuje maximálny možný činný výkon dosiahnuteľný pri existujúcich konštantných technických stratách.
Definíciu uviedol v roku 1920 W. V. Lyon [42] na „The 36th Annual Convention of the American Institute of Electrical engineers conference“. Na konferencii bolo zadefinované aj používanie faktora výkonu a boli na nej podľa dostupných informácií riešené aj otázky účinnosti. Pomocou tejto veličiny je možné charakterizovať, ako efektívne je dimenzovaná a prevádzkovaná elektrizačná sústava, jej časti a jej odberné miesta.

3.1.1 Faktor výkonu, účinník

Úlohou dodávateľa elektrickej energie je dodávať elektrinu efektívne a s minimálnymi stratami. Efektivitu prenosu a distribúcie najlepšie charakterizuje *faktor výkonu*. Vyjadruje, aká časť zdanlivého výkonu je využitá za daných podmienok na činný výkon a premieňa sa tak na užitočnú prácu.
Faktor výkonu je rovný pomeru medzi skutočne odoberaným činným výkonom a za daných podmienok maximálne možným odoberateľným činným výkonom pri tých istých stratách na vedení.

$$PF = \left(\frac{P}{P_{max}}\right)_{P_v=konšt} = \frac{P}{S} \tag{3.6}$$

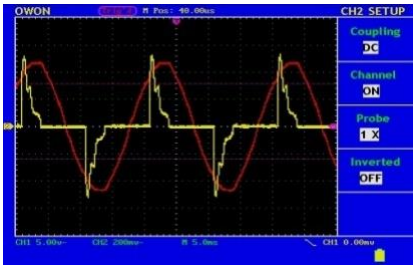
V zmysle obr. 3.5 je pre harmonické priebehy definovaný ako hodnota *cos φ*. Jej (teoreticky) jednotková hodnota znamená, že celý výkon, resp. celá použitá energia je využitá na požadovanú prácu.

$$PF = \frac{P}{S} = \cos\varphi \tag{3.7}$$

Zdanlivý výkon pre harmonické priebehy podľa (3.3) sa správne nazýva *geometrický zdanlivý výkon* a označuje sa S_g. Následne pomocou tohto zdanlivého výkonu vyjadrený účinník sa nazýva *geometrický faktor výkonu,* PF_g . Pre geometrický faktor výkonu sa v sústave s harmonickými priebehmi zaužíval pojem *účinník.*

3.2 Základné veličiny v jednofázovej sústave - neharmonické napätie a prúd

Vývoj v oblasti elektrotechniky a elektroniky priniesol miniaturizáciu a fázovú reguláciu. Súčasné univerzálne napájacie zdroje spotrebnej a priemyselnej elektroniky (spínané zdroje) využívajú prúd len v ohraničenej časti sieťovej periódy. Technologický pokrok však priniesol aj negatíva, napríklad generovanie vyšších harmonických a vznik neharmonického prúdu a napätia. Predovšetkým prúd je na rozdiel od sínusového priebehu v minulosti často deformovaný, obr. 3.4.



Obr. 3.4 Priebeh prúdu napájacieho zdroja

Nabíjačky notebookov, nabíjačky mobilných telefónov, zdroje výrobkov spotrebnej elektroniky, zdroje úsporných a LED žiaroviek. Stali sa každodenným štandardom. Rozšírenie je v miliardových číslach. Hoci pre výkony nad istú hodnotu a určité typy spotrebičov sú už prijímané opatrenia na elimináciu skreslenia prúdu priamo v spotrebiči, power factor correction, stále však pribúda a v sieti existuje obrovské množstvo spotrebičov, ktoré žiadnu korekciu neriešia. Meranie elektrických veličín musí rešpektovať dané skutočnosti a musí byť fyzikálne korektné aj pri takýchto skresleniach.

Na vyjadrenie výkonových veličín neharmonického prúdu a napätia s vyššími harmonickými a ich parametrov je možné využiť vyjadrenie zdanlivého výkonu pomocou jednotlivých harmonických napätia a prúdu:

$$S = U.I = \sqrt{\sum_{k=0}^{\infty}\sum_{l=0}^{\infty} U_k^2 I_l^2} \tag{3.8}$$

Pri predpoklade harmonického napätia U_1 (len prvá harmonická) a neharmonického prúdu (s vyššími harmonickými), čo možno v reálnej praxi považovať za najčastejšie, bude platiť:

$$S^2 = U_1^2 \sum_{j=1}^{\infty} I_j^2 \tag{3.9}$$

$$S^2 = U_1^2 I_1^2 + U_1^2 \sum_{j=2}^{\infty} I_j^2 \tag{3.10}$$

a s využitím výrazu $(\cos^2\varphi_1 + \sin^2\varphi_1) = 1$ (3.11)

bude pre zdanlivý výkon v jednofázovej sústave s neharmonickým priebehom prúdu platiť výsledný vzťah:

$$S^2 = U_1^2 I_1^2 \cos^2\varphi_1 + U_1^2 I_1^2 \sin^2\varphi_1 + U_1^2 \sum_{j=2}^{\infty} I_j^2 \tag{3.12}$$

Prvý člen vo vzťahu (3.12) reprezentuje *činný výkon P*, v tomto prípade P_1 rovnako ako pri harmonických priebehoch, môže vznikať iba medzi korešpondujúcimi harmonickými. Fázový posun φ_1 je posun prvých harmonických.
Druhý člen reprezentuje *jalový výkon Q*, v našom prípade Q_1 rovnako ako pri harmonických priebehoch, ktorý je tvorený taktiež len korešpondujúcimi harmonickými
Tretí člen definuje *deformačný výkon D,* ktorý reprezentuje zložku zdanlivého výkonu spôsobenú súčinom nerovnakých, nekorešpondujúcich harmonických prúdu a napätia.

S využitím zložkového tvaru napätia a prúdu platí

$$D = \sqrt{\sum_{k=0}^{\infty}\sum_{\substack{l=0\\ l\neq k}}^{\infty} [U_k^2 I_l^2 - U_k I_k U_l I_l \cos(\varphi_k - \varphi_l)]} \tag{3.13}$$

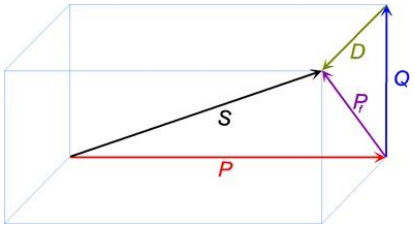
alebo jeho jednoduchšie vyjadrenie pre praktické použitie v meracej technike

$$D = \sqrt{U^2 I^2 - P^2 - Q^2} \tag{3.14}$$

Deformačný výkon je tvorený vplyvom rôznych, nekorešpondujúcich harmonických v napätí a prúde. Vyjadruje rozdielnosť časového priebehu (tvaru) napätia od časového priebehu prúdu. Deformačný výkon je nulový:

- pri harmonickom napätí a prúde;
- pri rovnakom, hoci ľubovoľne deformovanom časovom priebehu napätia aj prúdu, čo v praxi znamená odporovú záťaž.

Geometrické znázornenie súvislostí medzi jednotlivými uvedenými výkonovými veličinami je na obr. 3.5



Obr. 3.5 Geometrická interpretácia výkonov pre neharmonické napätie a/alebo prúd

S prihliadnutím k uvedenému je možné uviesť skrátený zápis vzťahu (3.12) v zložkovom tvare

$$S^2 = P^2 + Q^2 + D^2, \text{ resp. } S = \sqrt{P^2 + Q^2 + D^2} \tag{3.15}$$

Zdanlivý výkon v reálnej praxi s výskytom vyšších harmonických v napätí a/alebo prúde obsahuje v jednofázovej sústave tri zložky, činnú, jalovú a deformačnú:

3.2.1 Účinník (faktor výkonu, PF) v jednofázovej sústave, neharmonické napätie a prúd

Efektivita prenosu je, ako už bolo uvedené, definovaná všeobecne faktorom výkonu, teda pre jednofázovú sústavu s neharmonickým napätím a/alebo prúdom platí:

$$PF = \frac{P}{S} = \frac{P}{\sqrt{P^2 + Q^2 + D^2}} \tag{3.16}$$

Porovnaním s (3.3) dostaneme

$$PF = \frac{P}{S} = \frac{P}{UI} = \frac{P}{\sqrt{S_g^2 + D^2}} \tag{3.17}$$

Je zrejmé, že efektívnosť prenosu elektrickej energie pri neharmonických priebehoch je nižšia v dôsledku výskytu deformačného výkonu. Pretože názov *účinník* sa zaužíval a mal by byť vyhradený iba pre „cos φ“, resp. použitiu geometrického zdanlivého výkonu, je treba pre neharmonické priebehy kvôli jednoznačnosti a rozlíšeniu používať pojem *faktor výkonu* (v literatúre tiež power faktor, *PF*, koeficient výkonu, λ).

3.2.2 Niektoré príklady nameraných a vypočítaných veličín v jednofázovej sústave

Viaceré príklady rôznych spotrebičov sú uvedené v [33]. Na obr. 3.6 sú uvedené jednotlivé výkony a faktory výkonu troch rozdielnych zdrojov svetla (žiarovka, úsporná žiarovka, LED žiarovka) so svetelným výkonom 100W žiarovky.

P =100 W
S = 100 VA
I = 0,43 A
Q = 0 var
D = 0 VA
PF = 1
k_z = 1

P = 23 W
S = 36, 5 VA
I = 0,158 A
Q = 9 var
D = 27 VA
PF = 0,62
k_z = 2,6

P = 11 W
S = 18,8 VA
I = 0,076 A
Q = 9 var
D = 12 VA
PF = 0,58
k_z = 2,92

Obr. 3.6 Výkony rôznych zdrojov svetla so svetelným výkonom 100W žiarovky

4 Trojfázová sústava. Zdanlivé výkony a ich zložky

4.1 Trojfázová sústava, harmonické napätie a prúd

Reálna zložka vektora výkonu ***S*** je aj v trojfázovej sústave, zloženej z troch jednofázových sústav s harmonickými priebehmi, činný výkon *P* a jeho imaginárna zložka je jalový výkon *Q*. Platí:

$$P = U_{01}.I_{c1}.\cos(\varphi_1) + U_{02}.I_{c2}.\cos(\varphi_2) + U_{03}.I_{c3}.\cos(\varphi_3) = P_1 + P_2 + P_3 \tag{4.1}$$

$$Q = U_{01}.I_{c1}.\sin(\varphi_1) + U_{02}.I_{c2}.\sin(\varphi_2) + U_{03}.I_{c3}.\sin(\varphi_3) = Q_1 + Q_2 + Q_3 \tag{4.2}$$

Zdanlivý výkon v trojfázovej sústave s harmonickými priebehmi je možné vyjadriť dvomi spôsobmi.

4.1.1 Geometrický zdanlivý výkon

Ak vychádzame z veľkosti vektora výkonu ***S***, teda z činného a jalového výkonu podľa (3.3) ako v jednofázovej sústave, dostaneme *geometrický zdanlivý výkon*

$$S_g = |\boldsymbol{S}| = \sqrt{P^2 + Q^2} = \sqrt{\left(\sum_{i=1}^{3} P_i\right)^2 + \left(\sum_{i=1}^{3} Q_i\right)^2} \tag{4.3}$$

Definícia zohľadňuje vplyv fázového posunu, nezohľadňuje však vzájomné vplyvy medzi fázami.

4.1.2 Aritmetický zdanlivý výkon

V trojfázovej sústave s harmonickými veličinami je možné počítať aj zdanlivý výkon ako aritmetický súčet jednotlivých fázových zdanlivých výkonov. *Aritmetický zdanlivý výkon* S_a je

$$S_a = S_1 + S_2 + S_3 = \sum_{i=1}^{3} U_i I_i \tag{4.4}$$

Ako bude zhodnotené v ďalšom, definícia vyhovuje trojfázovým sieťam so symetrickou záťažou, nezohľadňuje však vzájomné súvislosti medzi fázami.

4.2 Trojfázová sústava - neharmonické napätie a prúd

Tu je situácia výrazne zložitejšia. S využitím rozkladu na jednotlivé zložky bude
Činný výkon

$$P = P_1 + P_2 + P_3 = P \sum_{i=1}^{3} \sum_{k=0}^{\infty} U_{0i}^{(k)} I_{ci}^{(k)} . \cos \varphi_i^{(k)} \tag{4.5}$$

Jalový výkon

$$Q = Q_1 + Q_2 + Q_3 = \sum_{i=1}^{3} \sum_{k=0}^{\infty} U_{0i}^{(k)} I_{ci}^{(k)} . \sin \varphi_i^{(k)} \tag{4.6}$$

Deformačný výkon v zmysle (3.13) a (3.14)

$$D = \sqrt{\sum_{i=1}^{3} \sum_{k=0}^{\infty} \sum_{\substack{l=0 \\ l \neq k}}^{\infty} \left[U_{0i}^{(k)\,2} I_{ci}^{(l)\,2} - U_{0i}^{(k)} I_{ci}^{(l)} U_{0i}^{(l)} I_{ci}^{(k)} \cos\left(\varphi_i^{(k)} - \varphi_i^{(l)}\right) \right]} \tag{4.7}$$

alebo aplikáciou (3.13)

$$D = \sqrt{D_1^2 + D_2^2 + D_3^2} \tag{4.8}$$

Pri definovaní zdanlivého výkonu v trojfázovej sústave s neharmonickým priebehom napätia a/alebo prúdu nie sú definície dodnes zjednotené a ich posúdenie, porovnanie a doplnenie je aj predmetom tejto práce. V praxi sa stretávame s viacerými vyjadreniami, ktoré platia za určitých podmienok.

4.2.1 Geometrický zdanlivý výkon trojfázovej sústavy, neharmonické napätie a prúd

Geometrický zdanlivý výkon pre harmonické napätie a prúd je definovaný vzťahom (4.3). Po úprave, s použitím predchádzajúcich vzťahov, bude pre trojfázovú sústavu s neharmonickými napätiami a prúdmi

$$S_g = \sqrt{\left(\sum_{i=1}^{3} \sum_{k=0}^{\infty} U_{0i}^{(k)} I_{ci}^{(k)} . \cos\varphi_i^{(k)}\right)^2 + \left(\sum_{i=1}^{3} \sum_{k=0}^{\infty} U_{0i}^{(k)} I_{ci}^{(k)} . \sin\varphi_i^{(k)}\right)^2} \tag{4.9}$$

Ako bude ukázané pri porovnaniach v ďalšom, je to od súčasnej reality najvzdialenejšia definícia, pretože nezohľadňuje ani vplyv deformačného výkonu, ani vzájomné vplyvy medzi fázami.

4.2.2 *Aritmetický zdanlivý výkon trojfázovej sústavy, neharmonické napätie a prúd*

Aritmetický zdanlivý výkon S_a je daný súčtom jednofázových zdanlivých výkonov

$$S_a = S_1 + S_2 + S_3 = \sum_{i=1}^{3} U_{0i} I_{ci} = \sum_{i=1}^{3} \sqrt{\sum_{k=0}^{\infty} U_{0i}^{(k)^2} \cdot \sum_{l=0}^{\infty} I_{ci}^{(l)^2}} \tag{4.10}$$

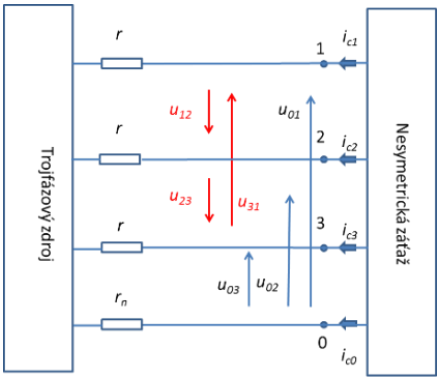
Ako bude zhodnotené v ďalšom, definícia vyhovuje trojfázovým sieťam so symetrickou záťažou, zohľadňuje vplyv fázového posunu aj vplyv vyšších harmonických, nezohľadňuje však vzájomné súvislosti medzi fázami.

4.2.3 *Zdanlivý výkon trojfázovej sústavy podľa štandardu IEEE 1459, ekvivalentný zdanlivý výkon*

S uvedenými definíciami a ich obmedzenou platnosťou nebolo spokojných viacero odborníkov a prišli s teóriami, ktoré majú všeobecnejšiu platnosť. Teória zdanlivého výkonu, ktorú vypracoval Lyon [42], sa stala základom pre štandard IEEE 1459 – 2010 [40].

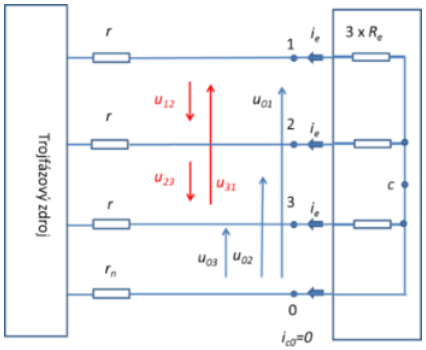
Na obr. 4.1 je znázornená všeobecná trojfázová štvorvodičová sústava s nesymetrickou záťažou. Ohmický odpor prívodných fázových vodičov je r, r_n je ohmický odpor nulového vodiča. ΔP vyjadruje Joulove straty na odporoch prívodných vodičov:

$$\Delta P = r(I_{c1}^2 + I_{c2}^2 + I_{c3}^2) + r_n I_{c0}^2 \tag{4.11}$$



Obr. 4.1 všeobecná trojfázová štvorvodičová sústava

Teória vychádza z porovnania vyjadrenia strát reálnej sústavy s hypotetickou trojfázovou sústavou, ktorá je dokonale symetrická a má iba odporovú záťaž, tzv. *ekvivalentnou sústavou* so symetrickou záťažou, pričom straty zostanú nezmenené (obr.4.2).



Obr.4.2 hypotetická sieť

Jouleove straty hypotetickej siete budú: $\Delta P = 3rI_e^2$ (4.12)

Porovnaním (4.11) a (4.12) dostaneme vyjadrenie pre *ekvivalentný* (v literatúre tiež efektívny) fázový prúd

$$I_e = \sqrt{\frac{1}{3}(I_{c1}^2 + I_{c2}^2 + I_{c3}^2 + \rho I_{c0}^2)} \tag{4.13}$$

kde $\rho = \frac{r_n}{r}$ je pomer odporov nulového a fázového vodiča.

a pre stanovenie ekvivalentného (efektívneho) napätia

$$U_e = \sqrt{\frac{3(U_{01}^2 + U_{02}^2 + U_{03}^2) + U_{12}^2 + U_{23}^2 + U_{31}^2}{18}} \tag{4.14}$$

Určenie efektívneho zdanlivého výkonu je potom s použitím (4.13) a (4.14)

$$S_e = 3\, U_e I_e = 3 \sqrt{\frac{3(U_{01}^2 + U_{02}^2 + U_{03}^2) + U_{12}^2 + U_{23}^2 + U_{31}^2}{18}} \cdot \sqrt{\frac{1}{3}(I_{c1}^2 + I_{c2}^2 + I_{c3}^2 + \rho I_{c0}^2)} \tag{4.15}$$

4.2.4 Správny zdanlivý výkon (Rechtleistung)

Mierne odlišnou matematickou cestou je odvodené ďalšie vyjadrenie zdanlivého výkonu [35], pre ktoré v roku 1933 nemecká komisia pre definovanie jednotiek a vzťahov prijala názov Rechtleistung [34], (u nás preložené ako *správny zdanlivý výkon*). Odvodenie vychádza z rovnakých predpokladov ako v predchádzajúcom prípade, t.j. z rovnosti strát v skutočnej a ekvivalentnej ideálnej sústave pri rovnakom spotrebovávanom činnom výkone.
Na základe predpokladu rovnosti Jouleových strát vychádza rovnaký prúd v takejto sústave ako vyššie uvedený ekvivalentný fázový prúd (4.13), teraz označený ako *správny fázový prúd* I_r

$$I_r = \sqrt{\frac{1}{3}(I_{c1}^2 + I_{c2}^2 + I_{c3}^2 + \rho I_{c0}^2)} \tag{4.16}$$

Z rovnosti strát zvodom medzi všeobecnou a ekvivalentnou sústavou [$3GU_r^2 = G(U_{01}^2 + U_{02}^2 + U_{03}^2)$] vychádza pre tzv. *správne fázové napätie* vyjadrenie

$$U_r = \sqrt{\frac{1}{3}(U_{01}^2 + U_{02}^2 + U_{03}^2)} \tag{4.17}$$

Pre správny zdanlivý výkon potom platí

$$S_r = 3\,.\,U_r I_r = 3\,.\,\sqrt{\frac{1}{3}(U_{01}^2 + U_{02}^2 + U_{03}^2)}\,.\sqrt{\frac{1}{3}(I_{c1}^2 + I_{c2}^2 + I_{c3}^2 + \rho I_{c0}^2)} \tag{4.18}$$

Pri predpoklade, že odpory fázových a nulového vodiča sú zhodné, teda $\rho = 1$, potom

$$S_r = \sqrt{(U_{01}^2 + U_{02}^2 + U_{03}^2)}\,.\sqrt{(I_{c1}^2 + I_{c2}^2 + I_{c3}^2 + I_{c0}^2)} \tag{4.19}$$

Následným odvodením [37] je možné následne dospieť k ďalším vzťahom a výsledku v zložkovom tvare, ktorý platí pre trojvodičovú sústavu, resp. pri zanedbaní prúdu nulového vodiča:

$$S_r^2 = P^2 + Q^2 + D^2 + A^2 + B^2 \tag{4.20}$$

Pribudli dve nové výkonové veličiny, zohľadňujúce vzájomné vplyvy medzi fázami. Výkon nesymetrie *A* vyjadruje istým spôsobom ako sa líšia výkonové pomery v rôznych fázach, pričom „porovnáva“ tieto rozdiely zvlášť po

jednotlivých harmonických. Nesymetrický deformačný výkon *B* vyjadruje rozdiely medzi rôznymi harmonickými napätia a prúdu v rôznych fázach.
Pre výkon nesymetrie *A* platí

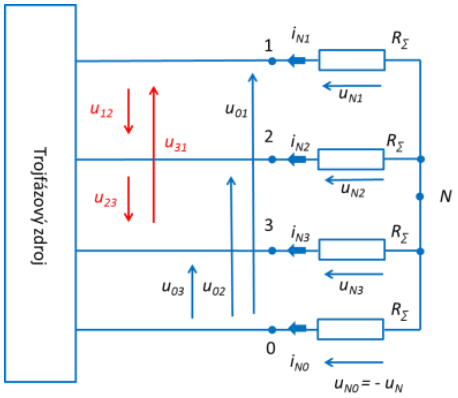
$$A = \sqrt{\sum_{i=1}^{3}\sum_{\substack{j=1\\ j\neq i}}^{3}\sum_{k=0}^{\infty}\left[U_{0i}^{(k)^2} I_{cj}^{(k)^2} - U_{0i}^{(k)} I_{cj}^{(k)} U_{0j}^{(k)} I_{ci}^{(k)} \cos\left(\varphi_i^{(k)} - \varphi_j^{(k)}\right)\right]} \tag{4.21}$$

Pre nesymetrický deformačný výkon *B* platí

$$B = \sqrt{\sum_{i=1}^{3}\sum_{\substack{j=1\\ j\neq i}}^{3}\sum_{k=0}^{\infty}\sum_{\substack{l=0\\ l\neq k}}^{\infty}\left[U_{0i}^{(k)^2} I_{cj}^{(l)^2} - U_{0i}^{(k)} I_{cj}^{(l)} U_{0j}^{(l)} I_{ci}^{(k)} \cos\left(\varphi_i^{(k)} - \varphi_j^{(l)}\right)\right]} \tag{4.22}$$

4.2.5 Štandard DIN 40110, kolektívny zdanlivý výkon

Treťou významnou teóriou zdanlivého výkonu je metóda FBD (Fryze-Buchholz-Depenbrock), [41], [32], ktorá sa stala základom nemeckej normy DIN 40110-2:2002-11.
Teória FBD je založená na predpoklade vytvorenia ekvivalentnej záťaže pomocou 4 odporov R_Σ a vytvorením nulového referenčného bodu N, obr. 4.3, $u_{01} - u_{03}$ sú fázové napätia zdroja, $u_{12} - u_{31}$ združené napätia.



Obr. 4.3 Sieť podľa metódy FBD, DIN 40110

Odvodením s viacnásobným využitím 2. Kirchhoffovho zákona bude výsledné vyjadrenie pre kolektívny prúd

$$I_\Sigma = \sqrt{I_{c1}^2 + I_{c2}^2 + I_{c3}^2 + I_{c0}^2} \tag{4.23}$$

a pre kolektívne napätie

$$U_\Sigma = \sqrt{\frac{1}{4}\left[U_{01}^2 + U_{02}^2 + U_{03}^2 + U_{12}^2 + U_{23}^2 + U_{31}^2\right]} \tag{4.24}$$

Tieto hodnoty sú v trojfázovej sústave za daných podmienok maximálne možné. Nie sú to hodnoty vyjadrené vzťahmi pre jednu fázu ako v prípade predchádzajúcich teórií. Kolektívny zdanlivý výkon je potom definovaný ako

$$S_\Sigma = U_\Sigma I_\Sigma = \sqrt{\frac{1}{4}\left[U_{01}^2 + U_{02}^2 + U_{03}^2 + U_{12}^2 + U_{23}^2 + U_{31}^2\right]} \cdot \sqrt{I_{c1}^2 + I_{c2}^2 + I_{c3}^2 + I_{c0}^2} \tag{4.25}$$

4.3 Porovnanie napätí a prúdov rôznych definícií zdanlivých výkonov

V práci sú porovnávané dva aspekty, definície napätí a prúdov pre ekvivalentný (efektívny) (4.15), pre správny (4.18) a pre kolektívny (4.25) zdanlivý výkon. Ako sa líšia?

Pri symetrickej napäťovej sústave budú všetky tri fázové napätia, ekvivalentné, správne aj kolektívne rovnaké a takisto rovnaké tri združené napätia budú odmocnina z troch krát väčšie.

Platí:

$$U_{12}=U_{23}=U_{31}=\sqrt{3}U_{01}=\sqrt{3}U_{02}=\sqrt{3}U_{03} \tag{4.26}$$

Ak sa (4.26) dosadí do vyššie uvedených vzorcov, po úprave budú všetky pri symetrickej napäťovej sústave zhodné, a to rovné správnemu fázovému napätiu (4.17).

Pri nesymetrickej napäťovej sústave sa uvedené tri hodnoty napätia líšia. Z výsledkov práce je zrejmé, že:

$$U_r \geq U_e \geq U_{\sum} \tag{4.27}$$

Hoci platí nerovnosť, porovnania ukazujú, že výsledky výpočtov napäťovej časti zdanlivého výkonu podľa troch porovnávaných metód možno považovať v bežnej praxi za prakticky zhodné a rozdiely za zanedbateľné. Pretože správne fázové napätie je najjednoduchšie vypočítateľné, nakoľko potrebuje len fázové napätia, ktoré na rozdiel od združených napätí merajú všetky existujúce elektromery, považujeme za najefektívnejšie používať pri výpočte zdanlivého výkonu a objasňovaní ďalších súvislostí v ďalšej časti práce práve toto napätie podľa vzťahu (4.17).

Druhým aspektom sú prúdy, ktoré vstupujú do vzťahov pre výpočet zdanlivých výkonov.

Kolektívny prúd (4.23) je definovaný jednoznačne, pri ekvivalentnom (4.13) a správnom (4.16) je potreba stanovenia veľkosti koeficientu ρ. Odporúčanie autorov normy je pracovať s rovnakými vodičmi a hodnotou $\rho = 1$. Vtedy sú všetky uvedené vzorce rovnaké.

4.3.1 Prúd nulového vodiča

Väčšina elektromerov pracuje len s tromi prúdmi, a to aj vo štvorvodičovej sústave. Ako je to s prúdom nulového vodiča? Možno ho zanedbať?

V trojvodičovej sústave tento problém neexistuje. Vo vzťahoch (4.13), (4.16) a (4.23) je posledný člen vždy nulový a teda výsledok výpočtu je vždy rovnaký.

Pri štvorvodičovom zapojení v trojfázovej sieti je želateľný stav, aby nulovým vodičom tiekol iba minimálny (ideálne nulový) prúd. V skutočnosti to tak nie je. Nulový vodič sa stáva z pohľadu Jouleových strát vodičom rovnocenným fázovým vodičom a môže byť preto nemalým problémom v súčasnej technickej praxi.

Podľa Kirchoffovho zákona platí pre prúdy (okamžité hodnoty) vzťah

$$i_{c1}(t)+ i_{c2}(t)+ i_{c3}(t)= - i_{c0}(t) \tag{4.28}$$

Pre kvadrát efektívnej hodnoty potom platí:

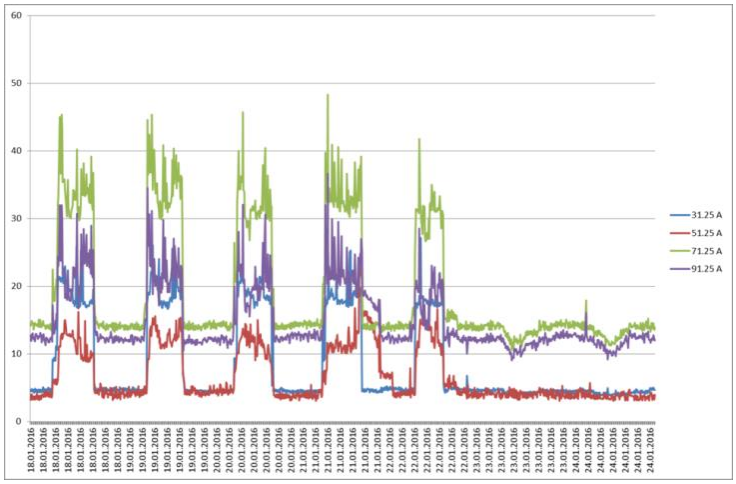
$$I_{c0}^2 = \frac{1}{T}\int_0^T [i_{c1}(t)+i_{c2}(t)+i_{c3}(t)]^2 \mathrm{d}t \tag{4.29}$$

Prúd nulového vodiča bude mať hodnotu

$$I_{c0}^2=I_{c1}^2+ I_{c2}^2+I_{c3}^2=\frac{2}{T}\int_0^T i_{c1}(t).i_{c2}(t)\mathrm{d}t+\frac{2}{T}\int_0^T i_{c1}(t).i_{c3}(t)\mathrm{d}t+\frac{2}{T}\int_0^T i_{c2}(t).i_{c3}(t)\mathrm{d}t \tag{4.30}$$

Tri členy so strednými hodnotami vyjadrujú vzájomnú súvislosť vždy dvoch prúdov.

Reálny príklad veľkosti prúdov je na obr. 4.4, kde sú zobrazené skutočné efektívne hodnoty všetkých štyroch prúdov štvorvodičovej sústavy (označené v zmysle OBIS). Ide o týždňový záznam z administratívnej budovy. Fialová stopa je práve prúd nulového vodiča, ktorý dosahuje vysoké hodnoty, vyššie ako u dvoch fázových vodičov.



Obr. 4.4 Prúdy, admin. budova, 1 týždeň, okamžité hodnoty

4.3.2 Zložkový tvar zdanlivého výkonu, trojvodičová a štvorvodičová sústava

Porovnaných bolo viacero vyjadrení zdanlivého výkonu z pohľadu napätia a prúdu, kde výsledky troch teórií vykazujú s akceptovateľnými rozdielmi zhodu. Analyzujme ďalej z čoho, z akých zložiek pozostáva tento zdanlivý výkon. Ak vychádzame zo správneho zdanlivého výkonu (4.17):

$$S_r = 3 \,.\, U_r I_r = 3 \,.\, \sqrt{\frac{1}{3}(U_{01}^2 + U_{02}^2 + U_{03}^2)} \,.\, \sqrt{\frac{1}{3}(I_{c1}^2 + I_{c2}^2 + I_{c3}^2 + \rho I_{c0}^2)} \tag{4.31}$$

pre $\rho = 1$ platí:

$$S_r^2 = 9.\left\{\frac{1}{3}(U_{01}^2 + U_{02}^2 + U_{03}^2)\right\} .\left\{\frac{1}{3}(I_{c1}^2 + I_{c2}^2 + I_{c3}^2 + I_{c0}^2)\right\} \tag{4.32}$$

$$S_r^2 = 9.U_r^2\left\{\frac{1}{3}(I_{c1}^2 + I_{c2}^2 + I_{c3}^2 + I_{c0}^2)\right\} = 3.U_r^2\left\{(I_{c1}^2 + I_{c2}^2 + I_{c3}^2)\right\} + 3.U_r^2 I_{c0}^2 \tag{4.33}$$

Pri trojvodičovej sústave sa vzťah (4.19) zjednoduší. Použime zložkový tvar podľa (4.20), kde sú však komponenty *A* a *B* vyjadrené a pomenované spoločne ako *N*

$$S_{r3}^2 = 3.U_r^2(I_{c1}^2 + I_{c2}^2 + I_{c3}^2) = P^2 + Q^2 + D^2 + N^2 \tag{4.34}$$

kde *N* nazveme *výkon nesymetrie (impedancie) záťaže*. Zložky *P, Q, D* získame podľa vzťahov (4.5), (4.6) a (4.8). Použité je označenie S_{r3}, aby bolo zrejmé, že ide o výsledok dosiahnutý z 3 fázových prúdov bez nulového vodiča. Platí:

$$N^2 = 3.U_r^2(I_{c1}^2 + I_{c2}^2 + I_{c3}^2) - P^2 - Q^2 - D^2 \tag{4.35}$$

Pre štvorvodičovú sústavu vyjadrime podobne

$$S_r^2 = U_r^2(I_{c1}^2 + I_{c2}^2 + I_{c3}^2) + 3.U_r^2 I_{c0}^2 = P^2 + Q^2 + D^2 + N^2 + N_0^2 = S_{r3}^2 + N_0^2 \tag{4.36}$$

kde N_0 nazveme *výkon nesymetrie prúdov*. Zložky *P, Q, D* sú počítané opäť podľa vzťahov (4.5), (4.6) a (4.8), *N* podľa (4.35). Tento vzťah predstavuje úplný popis situácie v trojfázovej sieti, s prihliadnutím a dopadom na hodnotenie strát trojvodičovej aj štvorvodičovej sústavy.

Aké sú dôsledky vyššie uvedených vzťahov?

Ak platí: $\frac{U_1}{I_1} = \frac{U_2}{I_2} = \frac{U_3}{I_3}$, potom $N = 0$ (4.37)

Uvedená podmienka hovorí o symetrii záťaže, teda o rovnosti veľkostí impedancií v jednotlivých fázach sústavy.

$$\text{Ak platí} \qquad I_1 = I_2 = I_3\,, \quad \text{potom} \quad N_0 = 0 \tag{4.38}$$

Táto podmienka hovorí o symetrii (rovnosti) fázových prúdov, a teda aj o prúde a zdanlivom výkone nulového vodiča.

Takáto sústava je vyvážená. Ak budú splnené obe vyššie uvedené podmienky, obe nesymetrie budú nulové. Čo je podstatné, vzťahy platia pre harmonické aj neharmonické prúdy.
Pri splnení podmienok (4.37) a (4.38) bude platiť:

$$S_a = S_r \tag{4.39}$$

4.3.3 Rekapitulácia zdanlivých výkonov v trojfázovej sústave

Pripomeňme si všetky tri uvedené všeobecné definície zdanlivého výkonu (pre troj aj štvorvodičovú sústavu) vyjadrené v zložkovom tvare:

$$S_r = \sqrt{P^2 + Q^2 + D^2 + N_r^2} \tag{4.40}$$

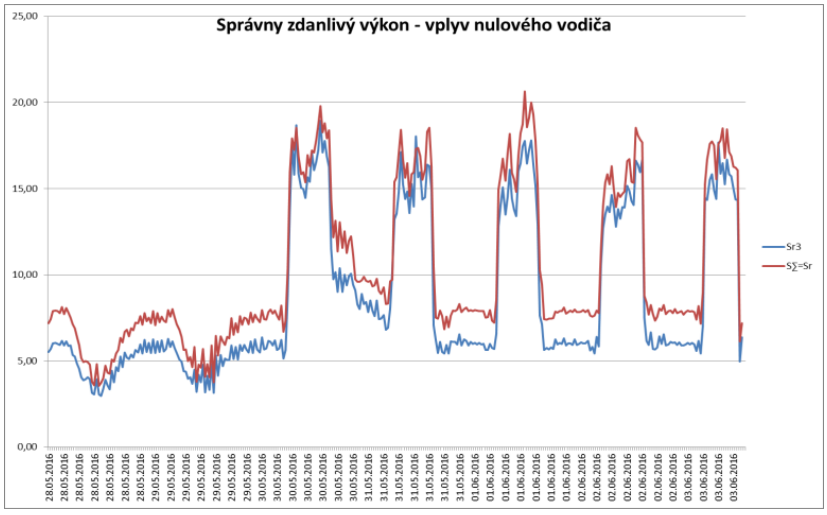
$$S_e = \sqrt{P^2 + Q^2 + D^2 + N_e^2} \tag{4.41}$$

$$S_\Sigma = \sqrt{P^2 + Q^2 + D^2 + N_\Sigma^2} \tag{4.42}$$

Bolo overené, že ich hodnoty sa líšia iba minimálne. Porovnaním výrazov uvedených vyššie je zrejmé, že rozdiely sú tvorené hodnotami vyjadrenia výkonu nesymetrie. Možno konštatovať, že výsledky všetkých troch prinášajú pre praktické použitie dostatočnú zhodu, nakoľko rozdiely sú pod hranicou akceptovateľných chýb merania a prístrojov.

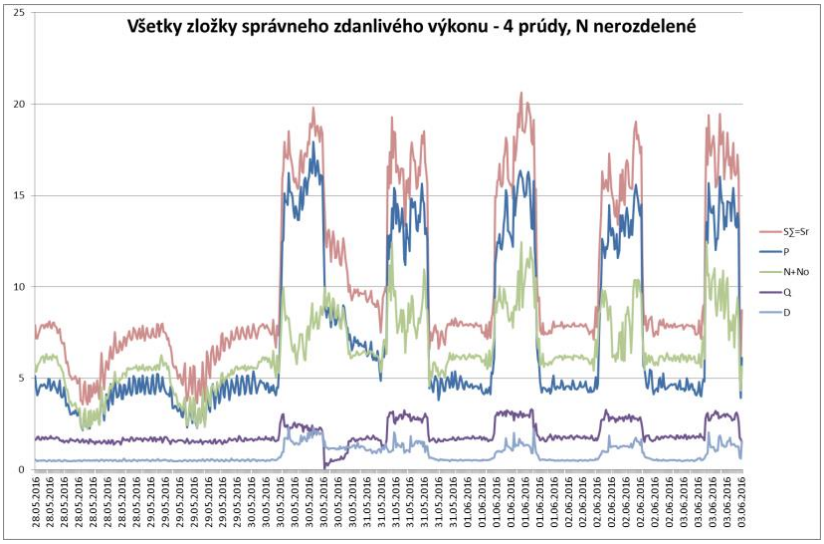
4.3.4 Ako je to v praxi? Príklady a výstupy z meraní

V práci je uvedených viacero príkladov. Na obr. 4.5 je znázornený priebeh zdanlivých výkonov s meraním prúdu nulového vodiča (červená) a bez merania prúdu nulového vodiča (modrá).



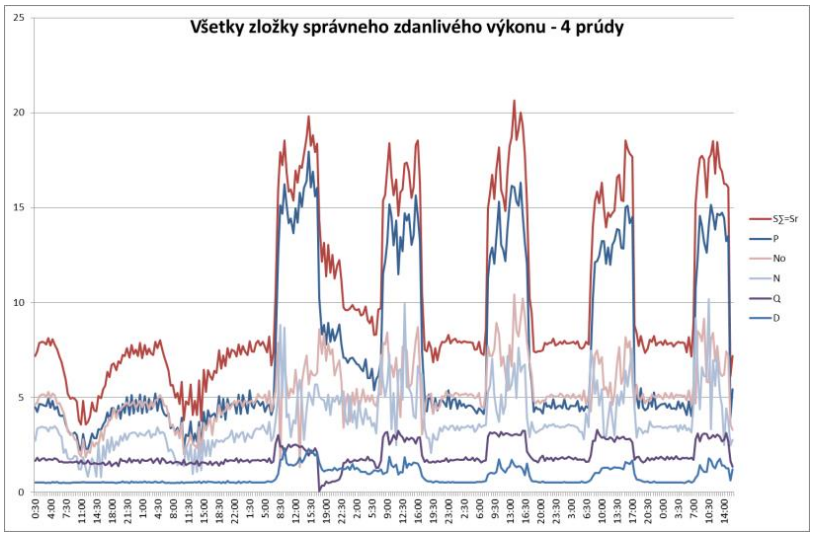
Obr. 4.5 Porovnanie zdanlivých výkonov S_{r3} a $S_\Sigma = S_r$, týždeň, admin. budova

Na ďalšom príklade meraných výkonov elektromer NXT4-PQ vyhodnocuje priamo kolektívny (správny) zdanlivý výkon, v ktorom sú zahrnuté oba výkony nesymetrie do spoločnej nesymetrie ($N + N_0$), obr. 4.6.



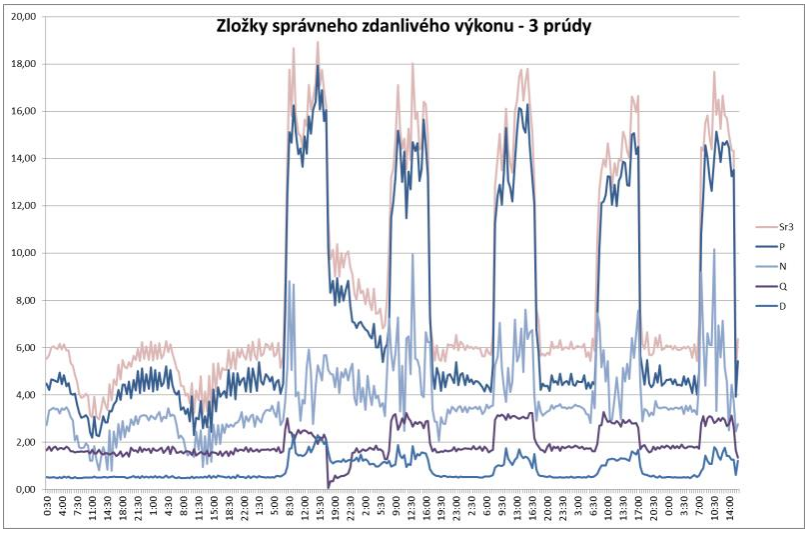
Obr. 4.6 Priemer. hodnoty rôznych výkonov, spoločné $N + N_0$, týždeň, admin. budova

Podrobnejšiu analýzu poskytuje obr. 4.7, s rozdelenými výkonmi nesymetrie záťaže N a nesymetrie prúdov N_0. Najväčší vplyv na nárast zdanlivého výkonu tu má práve N_0.



Obr. 4.7 Priemer. hodnoty rôznych výkonov, týždeň, admin. budova vrátane, N aj N_0

Na obr. 4.8 je pre porovnanie vidieť priebeh výkonov v prípade nemerania prúdu nulového vodiča.



Obr. 4.8 Priemer. hodnoty rôznych výkonov, N bez N_0, týždeň, admin. budova

5 Faktor výkonu, vplyv jalového výkonu, deformačného výkonu a výkonov nesymetrie na straty v sústave

Hoci výraz $PF = P/S$ je jasný, v trojfázovej sústave panuje nejednoznačnosť, v závislosti od stanovenia zdanlivého výkonu. V tejto práci sú spomenuté geometrický (index g), aritmetický (a), ekvivalentný (e), správny (r), kolektívny (∑). Čitateľ výrazu, ktorým je činný výkon, je definovaný jednoznačne (4.5).

5.1 Geometrický faktor výkonu

V praxi je pre vyjadrenie účinnosti využívania elektrickej energie najčastejšie používaným pojmom účinník, čo reprezentuje faktor výkonu s geometrickým zdanlivým výkonom v zmysle (3.3), PF_g. Pracuje s „klasickou“ veličinou, ktorou je účinník cos φ. Ten ale reálne reprezentuje iba fázový posun korešpondujúcich harmonických u a i (4.9), pri harmonickom napätí teda len prvých harmonických. V praxi býva počítaný prostredníctvom P a Q pomocou funkcie tangens:

$$\cos\varphi = PF_g = \frac{P}{S_g} = \cos\left(\operatorname{arctg}\left(\frac{Q}{P}\right)\right) \tag{5.1}$$

Vyjadrenie hodnoty účinnosti pomocou (5.1) vychádza "najlepšie" (dáva najvyššie hodnoty), pretože menovateľ S_g je najmenší zo všetkých zdanlivých výkonov, pravdu o situácii v sieti sa ale, žiaľ, nedozvieme. Vzťah pre geometrický faktor výkonu zohľadňuje len vplyv fázového posunu.

5.2 Aritmetický faktor výkonu

Ďalšie v rade je použitie aritmetického zdanlivého výkonu S_a (4.4)

$$PF_a = \frac{P}{S_a} \tag{5.2}$$

Pretože zdanlivý výkon je tu daný súčtom zdanlivých výkonov jednotlivých fáz, dosiahnutý výsledok už zahŕňa vplyv fázového posunu aj vplyv neharmonických komponentov a deformačného výkonu v jednotlivých fázach. Ani tento vzťah však nezohľadňuje vnútorné súvislosti v trojfázovej sústave, ktoré reprezentujú výkony nesymetrie N.

5.3 Správny, ekvivalentný a kolektívny faktor výkonu

Ak do menovateľa dosadíme správny zdanlivý výkon S_r, (resp. ekvivalentný, alebo kolektívny zdanlivý výkon), dostaneme faktor výkonu, ktorý zohľadňuje všetky zložky aj vzájomné súvislosti medzi fázami bežnej trojfázovej siete.

$$PF_r = \frac{P}{S_r} \tag{5.3}$$

Takto vyjadrený faktor výkonu je najbližší realite, pretože zohľadňuje vplyv fázového posunu, vyšších harmonických aj nesymetrie.

Fyzikálny význam faktora výkonu je viazaný na fyzikálny význam použitého zdanlivého výkonu. A fyzikálny význam oboch je viazaný na činný výkon, resp. straty činného výkonu.

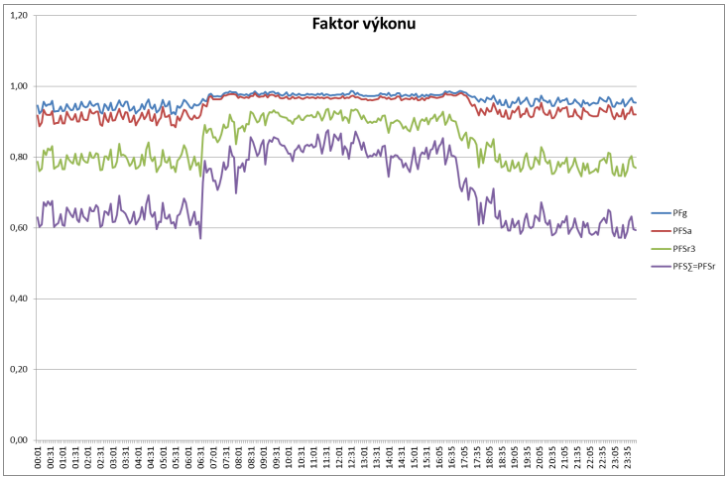
Ak na základe vzťahov z predchádzajúcej kapitoly 4. analyzujeme, od čoho sú závislé straty na vedení v nesymetrickej trojfázovej sústave (kde R_v je odpor komponentov siete), pre správny zdanlivý výkon dostaneme:

$$\Delta P = 3R_v I_r^2 = R_v(I_{c1}^2 + I_{c2}^2 + I_{c3}^2 + I_{c0}^2) = R_v \frac{S_r^2}{3U_r^2} = R_v \frac{P^2+Q^2+D^2+N^2+N_0^2}{U_{01}^2+U_{02}^2+U_{03}^2} \tag{5.4}$$

Je zrejmé, že straty spôsobuje tok prúdu potrebný pre tvorbu činného výkonu, čo je veličina, ktorú musíme akceptovať. Ďalej je to negatívny vplyv fázového posunu prúdov a napätí spôsobený reaktanciami v sieti a pôsobením regulátorov výkonu a meničov. Istý vplyv má aj deformácia prúdu voči napätiu a nesymetria záťaže a prúdov siete.

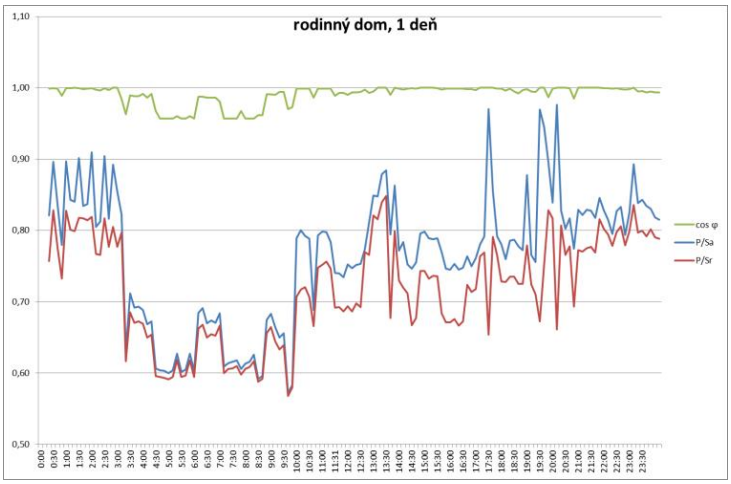
5.4 Porovnanie priebehov rôznych vyjadrení faktorov výkonu, príklady

Na obr. 5.1 je porovnanie štyroch priebehov faktorov výkonu administratívnej budovy počas 1 dňa. Rozdiely sú veľmi výrazné. Bledomodrá stopa je geometrický PF_g ($\cos\varphi$, λ_g). Červená stopa je aritmetický PF_a (λ_a). Zelená stopa ukazuje priebeh správneho faktora výkonu bez uvažovania vplyvu nulového vodiča, PF_{r3}. Modrá stopa je najreálnejším vyjadrením pomerov v sieti so správnym zdanlivým výkonom PF_r (λ_r).



Obr. 5.2 Okamžité hodnoty rôznych faktorov výkonu, jeden deň, admin. budova

Na obr. 5.2 je zobrazený priebeh faktorov výkonu z merania na rodinnom dome, kde je vidieť rozdiel medzi štandardným meraním PF_g , meraním PF_a a meraním pomocou správneho zdanlivého výkonu S_r, PF_r.



Obr. 5.3 Denný priebeh faktorov výkonu, rodinný dom

Dôležitejšie ako časové zobrazenie priebehov rôznych faktorov výkonu sa však javí celkové vyhodnotenie faktorov výkonu na báze kumulatívnych veličín. V tab. 5.1. je vyhodnotené obdobie jedného týždňa v administratívnej budove z pohľadu energií. Zobrazené sú činná a jalová a viaceré zdanlivé energie. Z týchto údajov sú vypočítané priemerné hodnoty faktorov výkonu, pričom hodnota *P/Sg*, t.j. $\cos\varphi$, je hodnota, ktorá sa objavuje na faktúre za spotrebu elektrickej energie. Porovnanie rôznych faktorov výkonu v tabuľke ukazuje, ako vzdialený od reality je tento údaj.

Tab. 5.1 Rôzne vyjadrenia faktora výkonu na základe energií, týždeň, admin. budova

AP	***AQ***	***ASg***	***ASa***	***ASr3***	***AS$_\Sigma$=ASr***	***P/Sg*=cosφ**	***P/Sa***	***P/Sr3***	***P/S$_\Sigma$***
[kWh]	[kvarh]	[kVAh]	[kVAh]	[kVAh]	[kVAh]				
1173	311	1220	1269	1379	1629	0,96	0,92	0,85	0,72

5.5 Koeficient zvýšenia strát

Na prenos činného výkonu s veľkosťou *P* je potrebný prúd s minimálnou veľkosťou I_{min}.

$$I_{min} = \frac{P}{U} \tag{5.5}$$

Tento prúd vytvára na vedení s elektrickým odporom *R* straty s veľkosťou $R.I^2_{min}$. Tieto straty spôsobené odporom vodičov a komponentov siete, sú minimálne možné straty, pretože aj prúd je minimálne možný pre daný výkon. Skutočný prúd *I* vytvára ale väčšie straty $R.I^2$.

$$I = \frac{S}{U} \tag{5.6}$$

Pomer týchto skutočných a minimálne možných strát definujme ako *koeficient zvýšenia strát*

$$k_z = \frac{\mathrm{I}^2}{I^2_{min}} = \frac{S^2}{P^2} = \frac{1}{PF^2} \tag{5.7}$$

Napriek tomu, že nie sú známe skutočné straty v sieti, je možné takto vyhodnotiť, koľkokrát sú skutočné straty väčšie ako minimálne možné za daných podmienok.

Ak vzťah vyjadríme v zložkovom tvare, v jednofázovej sústave podľa (3.15) platí

$$k_z = \frac{P^2 + Q^2 + D^2}{P^2} = 1 + \frac{Q^2}{P^2} + \frac{D^2}{P^2} \tag{5.8}$$

Je zrejmé, že straty na vedení sú ovplyvňované jednotlivými zložkami zdanlivého výkonu, jalovým a deformačným výkonom.

V trojfázovej sústave vyberme na analýzu správny zdanlivý výkon (4.19). Pre zložkovú kompozíciu platí:

$$k_{zr} = \frac{S_r^2}{P^2} = 1 + \frac{Q^2}{P^2} + \frac{D^2}{P^2} + \frac{N_3^2}{P^2} + \frac{N_0^2}{P^2} \tag{5.9}$$

Okrem vplyvu jalového a deformačného výkonu sú straty ovplyvňované aj výkonmi nesymetrie.

Vzťahy (5.8) a (5.9) definujú, akou mierou sa jednotlivé zložky výkonov v trojfázovej sieti podieľajú na vzniku strát. *Q* je obrazom jalového výkonu, ktorý je v reálnej praxi spôsobený fázovým posunom 1. harmonických medzi napätím a prúdom. V praxi je ho možné eliminovať kompenzáciou. Vznik deformačného výkonu *D* je daný používaním nelineárnych prvkov. Je ho možné eliminovať filtráciou vyšších harmonických, používaním aktívnych filtrov (*PFC*), prípadne inteligentným radením rôznych spotrebičov, nelineárnych a lineárnych. Vplyv výkonov nesymetrie, ktoré charakterizujú nerovnomerné zaťaženie jednotlivých fáz a následne nulového vodiča, býva v nn sústave často najväčší. Eliminácia tohto fenoménu je možná dôslednejšou analýzou rozloženia odberu a úpravou zapojenia.

6 Vplyv OZE na výkonové pomery a kvalitatívne parametre elektrickej siete

Pripojenie zdroja na výrobu elektrickej energie do prenosovej aj distribučnej sústavy je regulovaný proces, ktorý podlieha aktuálnej energetickej legislatíve (v zmysle zákona 309/2009 Z.z. o podpore obnoviteľných zdrojov energie a vysoko účinnej kombinovanej výroby a jeho novelizácií, doplnení a zmien).
Z pohľadu dodržiavania kvality elektriny platia v podmienkach SR hlavne:

- vyhláška URSO č.275/2012 Z.z, ktorá definuje štandardy kvality pri distribúcii elektriny;
- norma STN EN 50160 Charakteristiky napätia elektrickej energie dodávanej z verejnej distribučnej siete;
- technické podmienky prevádzkovateľov distribučnej sústavy

6.1 Analýza najdôležitejších negatívnych vplyvov malých fotovoltických elektrární na siete nízkeho napätia

Súčasné nn siete neboli technicky ani koncepčne navrhnuté na rozptýlenú výrobu v podobe malých zdrojov. Zhoršenie kvality napätia v DS spôsobené vplyvom niektorých zariadení výrobcov elektriny sa môže prejaviť najmä kolísaním napätia, krátkodobými poklesmi napätia, rýchlymi zmenami napätia, harmonickým skreslením priebehu napätia, napäťovou nesymetriou, môže nepriaznivo ovplyvňovať prevádzku DS, alebo blízkych pripojených a komunikačných zariadení.

Analýza pripojiteľnosti FVE vzhľadom na dovolenú zmenu napätia v ustálenom stave preukázala závislosť medzi schopnosťou nn siete odolávať spätným vplyvom a miestom pripojenia. Na konci vývodu je možné pripojiť do nn siete menej inštalovaného výkonu FVE ako pri prevádzke týchto zdrojov v blízkosti transformátora, predovšetkým v dôsledku veľkosti skratového výkonu v uzloch nn siete. Rovnaká závislosť platí aj pre nesymetriu napätia. V prípade použitia trojfázových zdrojov je nesymetria v sieti daná spravidla počiatočným nesymetrickým zaťažením jednotlivých fáz z dôvodu rozloženia odberu. Z hľadiska napäťovej nesymetrie a dovolenej zmeny napätia má trojfázové zapojenie menší dopad na kvalitu elektriny, jednofázové väčší, je potrebné zabezpečiť rovnomerné rozmiestnenie výkonu do jednotlivých fáz nn siete.

Počet pripojených FVE a celkový inštalovaný výkon v danej nn oblasti je limitovaný aj veľkosťou inštalovaného výkonu distribučných transformátorov. Aby nedošlo k preťaženiu transformátora z dôvodu vysokých spätných tokov, je potrebné obmedziť celkový prietok inštalovaného výkonu v danej nn sieti. Voľná pripojiteľná kapacita s uvažovaním spätného toku je väčšia ako pri podmienke bez spätného toku z nn do vn siete.

6.2 Meranie a analýza výkonových pomerov a efektívnosti vybraných OZE, príklady

Z pohľadu analýzy výkonových pomerov, strát a efektívnosti využitia elektrickej energie sú v práci definované matematické vzťahy, ktoré ich popisujú, ako aj príklady nameraných výsledkov zo vzorky OZE.

Príklad nameraných a vyhodnotených údajov z malej FVE 50 kW inštalovanej na streche objektu je na obr. 6.1. Rozdiel medzi činným a zdanlivým výkonom je malý. Hodnoty faktora výkonu, resp. koeficientu zvýšenia strát sú dobré. Možno konštatovať, že kvalita súčasných striedačov je v tomto zmysle vynikajúca.

Technické údaje elektromera

Elektromer / výrobné č.:	FV_SCH / 2785503
Miesto:	FV_SCH
Dátum a čas odpočtu:	25.05.2016 09:30:00

Základné veličiny v čase odpočtu

Veličina	Suma	L1	L2	L3
činný výkon [kW]	-28.28	-9.46	-9.40	-9.40
jalový výkon [kvar]	0.44	0.17	0.16	0.11
zdanlivý výkon aritmetický Sa [kVA]	28.59	9.57	9.50	9.50
faktor výkonu P/Sa	-0.98	-0.98	-0.98	-0.98
napätie [V]		243.01	242.59	241.98
prúd [A]		39.40	39.19	39.29

Výkony v čase odpočtu

Neštandardné veličiny v čase odpočtu

Veličina	Suma	L1	L2	L3
deformačný výkon [kvar]	4.17	1.44	1.37	1.37
výkon nesymetrie [kvar]	-			
zdanlivý výkon správny Sr [kVA]	28.59			
neaktívny výkon [kvar]	4.20	1.45	1.37	1.37
Kz	1.02	1.02	1.02	1.02
cos fi	1.00	1.00	1.00	1.00
faktor výkonu (P/Sa)	-0.98	-0.98	-0.98	-0.98
faktor výkonu (P/Sr)	-0.99			

Originálne údaje odčítané z elektromera

Obr. 6.1 Údaje FVE 50 kW, slnečný deň

Iným príkladom je zobrazený „nočný“ stav 1 MW FVE, obr. 6.2, kedy je tu vidieť značnú nesymetriu napätia na úrovni 22kV. Navyše, kondenzátory na výstupe striedačov generujú do siete kapacitný prúd. Hodnoty faktora výkonu sú veľmi nízke.

Technické údaje elektromera

Elektromer / výrobné č.:	Jovice_2 / 0566258
Miesto:	Jovice_2
Dátum a čas odpočtu:	23.05.2016 20:45:02

Základné veličiny v čase odpočtu

Veličina	Suma	L1	L2	L3
činný výkon [kW]	**0.50**	0.00	0.00	0.50
jalový výkon [kvar]	**-13.25**	-4.00	-4.50	-4.25
zdanlivý výkon aritmetický Sa [kVA]	**13.50**	4.00	4.75	4.50
faktor výkonu P/Sa	**0.08**	0.00	0.00	0.15
napätie [V]		12549.00	13844.00	13009.00
prúd [A]		0.34	0.35	0.35

Výkony v čase odpočtu

Neštandardné veličiny v čase odpočtu

Veličina	Suma	L1	L2	L3
deformačný výkon [kvar]	**2.91**	-	1.52	1.39
výkon nesymetrie [kvar]	**1.71**			
zdanlivý výkon správny Sr [kVA]	**13.61**			
neaktívny výkon [kvar]	**13.22**	4.00	4.75	4.47
Kz	**740.70**	-	-	81.00
cos fí	**-0.04**	-	-	-0.12
faktor výkonu (P/Sa)	**0.08**	0.00	0.00	0.15
faktor výkonu (P/Sr)	**0.04**			

Originálne údaje odčítané z elektromera

Obr. 6.2 Údaje 1 MW FVE – nočná prevádzka

6.3 Meranie zmiešaného odberu a dodávky

V súvislosti s distribuovanými zdrojmi, napr. na distribučných transformačných staniciach, do ktorých ústia fotovoltické elektrárne, môže nastať situácia, kedy je činný výkon v určitých fázach kladný (odber), v iných fázach záporný (dodávka). Tok energie v jednotlivých fázach môže byť rôzny, opačný. Rovnaký stav môže nastať aj u odberateľa s výrobou (prosumera). Rôzny smer toku energie v rôznych fázach je v praxi vyhodnocovaný nejednoznačne tromi rôznymi spôsobmi.

Metóda 1. - Bilancia výkonov

$$P = \sum_{i=1}^{3} P_i \tag{6.1}$$

Metóda 2. - Nerozlišovanie smeru toku energie

$$P = \sum_{i=1}^{3} |P_i| \tag{6.2}$$

Metóda 3. - Nezávislé vyhodnocovanie odberu a dodávky

$$P_+ = \sum_{i=1}^{3} P_i \ \ pre\ P_i \geq 0 \tag{6.3}$$

$$P_- = \sum_{i=1}^{3} P_i \ \ pre\ P_i < 0 \tag{6.4}$$

Tabuľka 6.1 ukazuje, aké hodnoty by prezentovali prístroje (elektromery) v troch uvedených príkladoch nastavenia. Použitá je symbolická hodnota fázového výkonu +/- 1.

Tab. 6.1 Porovnanie metód vyhodnocovania zmiešaného odberu

Metóda	P_1	P_2	P_3	S	P_+	P_-
	[kW]	[kW]	[kW]	[kVA]	[kW]	[kW]
1	1	1	-1	3	1	-
2	1	1	-1	3	3	-
3	1	1	-1	3	2	1

7 Analýza hodnotenia výkonových veličín a kvalitatívnych parametrov elektriny v integrálnej podobe na základe údajov fakturačných elektromerov

Elektromer je fakturačné meradlo, ktoré spadá pod metrologickú legislatívu a poskytuje hodnoty požadované legislatívou, merané podľa platných noriem. Podľa iných platných noriem sú meradlá pravidelne overované. Základnou fakturačnou veličinou je práca, činná, resp. jalová. Ostatné veličiny poskytované elektromermi nespadajú pod metrologickú legislatívu a nie sú ani overované.
Až do obdobia začiatku nasadzovania a používania inteligentných meracích systémov je v energetike podľa noriem a platnej legislatívy meraný iba činný výkon (energia) a niekedy jalový výkon (energia). V prenosovej sústave sa okrem činnej a jalovej energie a činného a jalového výkonu na odovzdávacích miestach na základe interných technických podmienok merajú aj vybrané kvalitatívne parametre siete predpísané normou STN EN 50160 a internými technickými predpismi. V distribučných sústavách sa kvalitatívne parametre siete sledujú na základe interných rozhodnutí ojedinele na rozvodniach a čiastočne u niektorých PDS na distribučných transformačných staniciach. Okrem toho, v zmysle cenníkov pre distribúciu elektriny, je u zákazníkov s meraním typu A predpísané aj sledovanie „účinníka cos φ“, t.j. geometrického faktora výkonu PF_g, ktorý musí byť v rozsahu 0,95 – 1. Pri nedodržaní tejto podmienky je odberateľ penalizovaný tarifnou prirážkou t.j. percentuálnym podielom k tarife za distribúciu. Deformačný výkon, zdanlivé výkony ani výkony nesymetrie nie sú merané ani vyhodnocované. Pri zdrojoch sa sledujú veličiny popísané v kapitole 6.
Širšie požiadavky sú definované pri inteligentných meracích systémoch.

7.1 Vyhláška Ministerstva hospodárstva 358/2013 Z .z. zo dňa 28. 10. 2013 [46]

MH SR ustanovilo Vyhláškou č. 358/2013 Z. z. kritériá a podmienky na zavedenie inteligentných meracích systémov pre jednotlivé kategórie koncových odberateľov elektriny. Ustanovilo aj požadované technické parametre inteligentných meracích systémov, požiadavky na dátové prenosy a spoluprácu jednotlivých systémov a spôsob prístupu k meraným údajom zo strany jednotlivých účastníkov trhu s elektrinou.
Z pohľadu meracej techniky sú dôležité požadované technické parametre inteligentných meracích systémov, hlavne elektromerov, rozdelených do 3 úrovní funkcionality a tým aj investičnej náročnosti. Pre potreby tejto práce vo vzťahu k uvedenej vyhláške je kľúčový odberateľ kategórie 4 a meracie systémy čiastočne s pokročilou a so špeciálnou funkcionalitou IMS, kde sú pre potreby prevádzkovateľov distribučných sústav už definované aj povinnosti merania kvalitatívnych parametrov, zdanlivých výkonov a vyhodnocovanie faktora výkonu.

8 Prínosy pre prax

Výsledkom práce je analýza a vyhodnotenie súčasného stavu merania v energetických sústavách SR a zadefinovanie možných úprav a doplnení potrebných pre riešenie nových skutočností, ktoré priniesol technologický vývoj.

Existujúce systémy obchodného merania sú výsledkom postupného budovania a zdokonaľovania, so snahou o maximálne zabezpečenie spoľahlivosti a vierohodnosti poskytovaných údajov. Základné pravidlá pre meranie a overovanie elektromerov boli definované pred desiatkami rokov, v čase centrálnych zdrojov, keď bola do siete pripojená zväčša lineárna záťaž a priebeh napätia a prúdu bol harmonický. Takéto merania a pravidlá sú, ako sa ukazuje, v dnešných podmienkach nedostatočné.
Elektromery sú prioritne fakturačné meradlá, na ktoré sa vzťahujú požiadavky metrologickej legislatívy, pričom poskytujú predovšetkým údaje podľa pravidiel dohodnutých pre účely fakturácie. V záujme šetrenia sa spravidla nakupujú technológie investične najlacnejšie, spĺňajúce len legislatívne predpísané minimálne požiadavky, bez predpokladu pridanej hodnoty.
Iné, komplexnejšie požiadavky, vo väčšej miere reprezentujúce potreby súčasnosti, sú už definované pri inteligentných meracích systémoch. Tu však paradoxne nastáva situácia, kedy sa pozornosť venuje bezpečnosti a ochrane údajov, spôsobu a rýchlosti komunikácie, systémom spracovania a prezentovania údajov, pričom samotné meranie sa považuje za bezproblémové a samozrejmé. To sa odráža aj v oblasti používania meracej techniky, kedy žiaľ často nastáva situácia, keď ani pre zodpovedných pracovníkov nie je známe čo, ako a z akých dôvodov prístroje merajú a vyhodnocujú.

Výsledkom tejto práce sú detailná analýza zdanlivého výkonu a jeho zložiek, faktor výkonu v súvislosti s efektívnosťou využívania elektriny a analýza technických strát, ktoré sú generované fázovým posunom medzi napätím a prúdom, vyššími harmonickými a nesymetriou.V práci sú odvodené matematické vzťahy pre stanovenie zdanlivého výkonu podľa piatich teórií a ich vzájomné porovnanie s vyhodnotením rozdielov a nedostatkov ich platnosti za určitých konkrétnych podmienok. Na základe spôsobu stanovenia zdanlivého výkonu sú následne odvodené vzťahy pre vyhodnocovanie účinnosti, definície účinníka a faktora výkonu, ako aj koeficientu zvýšenia strát. Časť práce je venovaná podmienkam pripájania a analýze vplyvu obnoviteľných zdrojov energie na výkonové a vybrané kvalitatívne parametre elektriny v mieste pripojenia a na vývodoch DTS. Teoretické predpoklady a poznatky sú overené praktickými meraniami. Výsledky sú konfrontované s platnou legislatívou a zaužívanou praxou, s poukázaním na rozdiely a s návrhom možných úprav a doplnení. Možná eliminácia strát na základe získaných poznatkov predstavuje možnosť ušetriť elektrickú energiu, ktorú nebude treba vyrobiť, prenášať ani distribuovať.

Z výsledkov práce vyplývajú nasledujúce technické konštatovania a odporúčania:

1. *Priebeh prúdu a napätia*
   V praxi nikdy nevieme, aké časové priebehy majú merané prúdy a napätia. Predovšetkým pri prúde nemožno predpokladať, že bude harmonický. Prístroje, ktoré vyhodnocujú len geometrický zdanlivý výkon, nie sú vhodné pre súčasnú prax meracej techniky a prinášajú nesprávne výsledky. Uvedenú skutočnosť je potrebné zohľadniť v praxi.
2. *Nulový vodič v štvorvodičovej NN sústave*
   Nesprávny pohľad na „nulový“ prúd nulového vodiča trojfázovej sústavy prináša riziko škody v podobe zhorených vodičov (požiarov) následkom zle dimenzovaných vodičov. Straty v nulovom vodiči sú neregistrované, čo zvyšuje potrebu používať pri účtovaní elektriny rôzne opravné koeficienty a zavádzať rôzne prirážky, ktoré zahŕňajú nemerané straty.
3. *Zdanlivý výkon*
   Pre posúdenie skutočného zaťaženia elektrickej siete je potrebné merať, resp. stanoviť veľkosť zdanlivého výkonu. V práci bolo odvodených a porovnaných päť teórií výpočtu zdanlivého výkonu. *Geometrický* a *aritmetický* zdanlivý výkon zodpovedajú skutočnosti len za určitých konkrétnych podmienok. *Ekvivalentný, správny a kolektívny* zdanlivý výkon majú všeobecnú platnosť. Tieto tri teórie zdanlivého výkonu sú vhodné a dôležité pre posudzovanie efektívnosti využitia elektrickej energie aj dimenzovanie sústav. Výsledky práce ukazujú, že pri reálnych odchýlkach napätí trojfázovej sústavy od ideálneho stavu sú výsledky všetkých troch teórií prakticky zhodné a rozdiely zanedbateľné. Pretože správne fázové napätie je najjednoduchšie vypočítateľné, potrebuje len fázové napätia, ktoré na rozdiel od združených napätí merajú všetky existujúce elektromery, považujeme za najefektívnejšie v praxi používať *správny* zdanlivý výkon. Zavedenie takéhoto merania a vyhodnocovania zdanlivého výkonu do praxe sa javí potrebné a aktuálne. V praxi meracej techniky, z hľadiska strát, sa pri distribučných štvorvodičových sústavách javí nevyhnutné začať používať pri vyhodnocovaní výkonov aj prúd nulového vodiča.
   Problémom však môže byť praktická realizácia. Väčšina v súčasnosti používaných elektromerov žiadny zo zdanlivých výkonov (4.40), (4.41) a (4.42) nemeria. Neexistuje ani všeobecná legislatíva, a čo je horšie, ani názorová zhoda o potrebe zmeny a spôsobe vyhodnocovania zdanlivého výkonu a z neho vyplývajúceho faktora výkonu.
4. *Vyhodnocovanie faktora výkonu, účinníka*
   Pre trojfázovú sústavu je posudzovanie efektívnosti podľa faktora výkonu $PF = P/S$ s využitím *geometrického* zdanlivého výkonu ($\cos \varphi$) a a*ritmetického* zdanlivého výkonu vyhovujúce len za určitých podmienok. Všeobecnú platnosť majú teórie s využitím *ekvivalentného, správneho* a *kolektívneho* zdanlivého výkonu, ktoré sa ale v praxi nevyužívajú. S predchádzajúcim konštatovaním súvisí skutočnosť, že v bežnej praxi používame za súčasných podmienok nesprávne vyjadrenie účinníka, zohľadňujúceho len vplyv fázového posunu prvých harmonických. Spôsobuje to nutnosť zavádzať pri účtovaní elektriny rôzne prirážky, ktoré zahŕňajú nemerané straty. Aj preto, lebo sa používa neúplná, resp. nesprávna legislatíva, nedostatočná meracia technika a zastarané zaužívané metódy, ktoré nedostatočne zohľadňujú existujúce súčasné podmienky.

5. *Efektívnosť využívania energie*
   V súčinnosti s predchádzajúcimi bodmi 3. a 4. treba zdôrazniť, že používanie nevhodného vyjadrenia faktora výkonu, resp. účinníka, je zodpovedné za nesprávny pohľad na efektivitu využívania elektrickej energie. Pretože je potrebné dôsledné napĺňanie zastaraných legislatívnych predpisov, nie je dostatočne známy ani reálny stav siete, ani možné rezervy. Možné zvýšenie hodnoty faktora výkonu len o malú percentuálnu hodnotu môže predstavovať ušetrenú energiu v desiatkach až stovkách GWh, ktorú nebude treba vyrobiť, prenášať ani distribuovať.
6. *Faktor výkonu, koeficient zvýšenia strát*
   Na prvotné posúdenie efektívnosti využitia elektriny postačuje poznať priebeh faktora výkonu alebo koeficientu zvýšenia strát. Pre podrobnú analýzu zložiek strát a detailné vyhodnotenie (ne)efektívnosti je potrebné poznať priebehy jednotlivých zložiek zdanlivého výkonu v čase.
7. *Zmiešaný odber a dodávka*
   V súvislosti s distribuovanými zdrojmi a možným rôznym tokom výkonov v jednotlivých fázach sa javí potrebné dopracovať teoretické práce a zjednotiť legislatívu na tému zmiešaného odberu (dodávka a odber v rôznych fázach) a navrhnúť vhodnú meraciu techniku. Zanedbanie tejto skutočnosti spôsobí pravdepodobne nespokojnosť na strane dodávateľov, výrobcov aj odberateľov elektrickej energie.
8. *Systémy obchodného merania IMS*
   Inteligentná sieť smart grid predstavuje nevyhnutný prostriedok na dosiahnutie vytýčených cieľov v oblasti ďalšieho rozvoja energetiky. Znamená náročnú a nákladnú modernizáciu a zmenu spôsobu riadenia elektrizačnej sústavy. Podpora implementácie „smart energy“ technológií znamená vyššiu mieru automatizácie, digitalizácie, diaľkového ovládania a zefektívnenia prevádzky a údržby, ako aj možné skrátenie doby výpadkov a zvýšenie spoľahlivosti a efektívnosti prevádzky energetických sústav. Môže predstavovať prostriedky a nástroje pre podporu distribuovanej výroby, riadenia obnoviteľných zdrojov, elektromobility, akumulácie energie, zvýšenia bezpečnosti a spoľahlivosti.

Systémy inteligentného merania sú základným pilierom zavádzania inteligentných sietí. Inteligentné elektromery, predovšetkým so špeciálnou funkcionalitou IMS, disponujú analytickými funkciami. Umožňujú meranie spotreby aj výroby, meranie napätí, prúdov, sledovanie priebehov elektrických veličín v čase, odchýlky meraných parametrov od nastavených hraničných hodnôt, vyhodnocovanie strát, detekciu a hlásenie výpadkov elektriny, obnovenie dodávky, obsahujú aj diaľkovo ovládateľný vypínač a relé pre odpojenie a pripojenie spotreby a mnohé ďalšie. Tento potenciál treba využiť.

Zo strategického smerovania vývoja energetiky aj výsledkov tejto práce je zrejmé, že:

- inteligentné systémy merania s pridanou hodnotou a komunikačnými možnosťami sú pre budúcnosť nevyhnutné;
- nestačí merať len to, čo meriame dnes;
- minimálne na vybraných miestach siete, v distribučných TS, uzlových a koncových bodoch siete a pri väčších odberoch sa javí potrebné merať a vyhodnocovať nielen činnú energiu, ale aj iné výkonové a kvalitatívne parametre siete a vyhodnocovať straty a účinnosť;
- v súvislosti s plánovaným rozvojom inteligentných meracích systémov, ako súčasti inteligentných sietí a platformy inteligentnej energetiky, by bola implementácia len čiastočných, minimalistických funkcionalít a nepreviazaných izolovaných riešení, bez väzby na budúce „smart“ požiadavky účastníkov trhu a internetovú budúcnosť pravdepodobne drahé a málo účelné vynaloženie finančných prostriedkov a priniesla by okrem množstva jednoúčelových dát pre fakturáciu zdraženie energetických služieb bez ďalších prínosov.

Záver

Zmeny fyzikálnych vlastností a infraštruktúry elektrizačnej sústavy vyžadujú zmenu pohľadu na zaužívané a rutinne riešené a vyhodnocované skutočnosti. V súvislosti so zmenami, ktoré sa dejú, je potrebné zodpovedať mnohé otázky:

Sme pripravení eliminovať možné ťažkosti? Poznáme skutočný stav siete? Poznáme, čo a ako ju naozaj ovplyvňuje? Aké sú skutočné straty? Je správne, kto a za čo platí? Aký je podiel jalového a deformačného výkonu a nesymetrie na zaťažení siete? Aký bude vplyv obnoviteľných zdrojov? Aký je energetický stav a efektívnosť našich domácností? Meriame správne? Meriame dostatočne?

Na podrobnejšiu analýzu problematiky a možný návrh odporúčaní je v práci vypracovaná detailná analýza potrieb merania a vyhodnocovania výkonov v elektrických sieťach vo vzťahu k spôsobu vyhodnocovania faktora výkonu, ktorý je ukazovateľom efektívnosti využívania elektriny. Pozornosť je venovaná problematike vyhodnocovania strát vo vzťahu k OZE, moderným spotrebičom a technológiám a inteligentným meracím systémom ako súčasti inteligentných sietí. Cieľom takéhoto merania je poskytovať komplexné a správne namerané dáta a informácie pre všetkých účastníkov energetického trhu. Dáta a informácie pre odberateľov, dáta a informácie pre prevádzkovateľov distribučných sústav, dáta a informácie pre výrobcov, prosumerov a prevádzkovateľov zdrojov, dáta a informácie pre dispečingy, dáta a informácie pre dodávateľov a obchodníkov s elektrinou, dáta a informácie pre nadradenú sústavu, agregátorov, ako aj dáta a informácie pre ostatných relevantných partnerov. Výsledky meraní môžu slúžiť ako podklady pre analýzu stavu siete, optimalizáciu zapojenia a konfigurácie siete, odhalenie a riešenie rezerv, zvýšenie efektívnosti prevádzkovania a zníženie technických strát, riešenie nežiaducich a poruchových stavov. Taktiež na podporu integrácie a riadenia OZE, podporu elektromobility, skladovania elektriny, reguláciu a vyrovnanie bilancie medzi spotrebou a výrobou v záujmovom území, reguláciu odberovej špičky. Môžu pomôcť napĺňať ciele Energetickej politiky SR budovať stabilnú, bezpečnú a efektívnu energetickú infraštruktúru, posilniť postavenie odberateľa, poskytovať informácie o spotrebe a výrobe elektriny a priebehu odoberaného výkonu v čase s možným cieľom šetrenia.

Pri vytváraní reálneho obrazu o efektívnosti využívania elektriny sú potrebné vhodné teórie a adekvátny matematický aparát. Vyvrcholením úsilia je ich overenie a potvrdenie sériou reálnych meraní v praxi. Tu sa napriek veľkej snahe, osobným kontaktom a materiálovému zabezpečeniu podarilo naplniť predsavzatia len čiastočne, na vzorke „izolovaných“ OZE, bez možnosti komplexného vyhodnotenia ich vplyvu na okolité subjekty a celkové vzájomné energetické súvislosti v dotknutých lokalitách, čo môže byť predmetom ďalšej práce.

Táto dizertačná práca dáva dobrý základ pre tvorbu ďalších štúdií a pilotných projektov merania v rámci konkrétnych, aktuálne navrhovaných koncepcií rozvoja budúcich inteligentných sietí.

Literatúra

[25] Legislatívne dokumenty uvedené v 2. kapitole.

[26] MALENGRET, M. 2008. *Definition of apparent power in 3-phase 4-wire non-sinusoidial power systems.* Kapské mesto : The department of Electrical Engineering University of Cape town, 2008. Doktorandská práca

[27] BUCHHOLZ, F. 1950. *Das Begriffsystem Rechtleistung, Wirkleistung, totale Blindleistung*. München : Selbstverlag, 1950.

[28] EMANUEL, A. E. 1995. On the Assessment of Harmonic Pollution, In *IEEE Transactions on Power delivery*. 1995, vol. 10, no. 3, p.1693–98.

[29] Produkthandbuch für den 4-Quadranten-/Kombizähler LZQJ-XC, EMH metering GmbH & Co. KG, 2010.

[30] Produkthandbuch für den NXT4, EMH metering GmbH & Co. KG, 2016.

[31] BUCHHOLZ, F. 1922. Die Drehstrom-Scheinleistung bei Ungleichmassiger Belastung Der Drei Zweige, In *Licht und Kraft.* 1922, no. 2, p. 9–11.

[32] Norma DIN 40110 AC Quantities, Part 1: Single-Phase Circuits, 1994. Part 2: Polyphase Circuits, 2002.

[33] CHRAPČIAK, I. 2014. *Meranie v prenosovej a distribučnej sústave*. Bratislava : FEI STU, 2014. 52s. Písomná práca k dizertačnej skúške.

[34] EMDE, F. 1937. Scheinleistung eines nicht sinusförmigen schiefen Drehstroms. In *Elektrotechnik und Maschinen Bau*. 1937, roč. 55, č. 46, s. 557 - 560.

[35] BUCHHOLZ, F. 1921. Die Darstellung der Begriffe Scheinleistung und Scheinarbeit bei Mehrphasenstrom. In *Elektro-Journal (1.)* 1921 (1929), č. 9, s. 15 – 21.

[36] LURJE, L. S. 1951. Kažuščajasa moščnost trechfaznoj sistemy. In *Električestvo*. 1951, č. I, s. 47-53.

[37] NEDELCU, V. N. 1963. Die einheitliche Leistungstheorie der unsymetrischen und mehrwelligen Mehrphasensystemc. In *ETZ-A*. 1963, roč. 84, č. 5, s. 153-157.

[38] EMANUEL, A. E. 2010. *Power definitions and the physical mechanism of power flow*. Worcester USA : John Wiley & Sons, Ltd., 2010. 263 s. ISBN: 978-0-470-66074-4.

[39] BUDEANU, C. I. 1927. *Puissances réactives et fictives.* Bucarest : Inštitút Roumain de l'Energie, 1927.

[40] Norma IEEE Standard 1459 – 2000, Definitions for the measurement of electric quantities under sinusoidal, non-sinusoidal, balanced, or unbalanced condition. IEEE Trans. Std. 1449-2000, 2000.

[41] SPÄTH, H. A. 2007. General Purpose Definition of Active Current and Non-Active Power Based on German Standard DIN 40110. In *Electrical Engineering*, vol 89, p. 167–175.

[42] LYON, W. V. 1920. Power Factor in Poly-Phase Circuits. In *AIEE*. 1920, vol.39, p. 1449–1520.

[43] FRYZE, S. 1932. Effective, Wattless and Apparent Power in Circuits with Nonsinusoidal Waveforms of Current and Voltage. In *Elektrotechnishe Zeitschrift.* 1932, no. 25, p. 596–99, 625–27, 700–702.

[44] CZARNECKI, L. S. 1984. Considerations on the Reactive Power in Nonsinusoidal Situations. In *IEEE Trans. on Instrumentation and Measurement*. 1984, vol. 34, no. 3, p. 399–404.

[45] DEPENBROCK, M. 1979. Active and Fictitious Power of Periodic Currents in Single-Phase and Polyphase Systems with Periodical Voltages of any Waveforms. In *ETG Fachberichteg*, Berlin, VDE – Verlag 1979, p. 17–59.

[46] Vyhláška Ministerstva hospodárstva 358/2013 Z. z. zo dňa 28. 10. 2013.

Publikované práce

[1] CHRAPČIAK, I., KALUŠ, E. 2010. Efektívne využívanie elektrickej energie. Stačí merať to, čo meriame? In *Energy – Ecology – Economy* [CD-ROM]. Bratislava : STU, 2010. ISBN 978-80-89402-23-6.

[2] CHRAPČIAK, I. 2012. Ako ovplyvňujú straty energetickú efektívnosť? In *10. medzinárodná konferencia ENEF 2012* [CD ROM]. Banská Bystrica, 2012.

[3] CHRAPČIAK, I. 2012. Smart Metering – súčasť inteligentnej energetiky. In *Energofórum 2012* [CD ROM]. Bratislava : Sféra, 2012, s. 79-82. ISBN 978-80-970045-7-6.

[4] CHRAPČIAK, I. 2012. Smart Metering – reálne slovenské ciele a možnosti. In *eFocus 2. ročník odbornej konferencie Smart metering/Smart Grid – čas na zmeny* [CD ROM]. Bratislava : eFocus, 2012.

[5] CHRAPČIAK, I. 2013. Cez selektívny Smart metering bližšie ku Smart grid. In *Trendy elektroenergetiky v evropském kontextu VIII* [CD-ROM]. Špindlerúv Mlýn, 2013.

[6] JANÍČEK, F., BELÁŇ, A., CHRAPČIAK, I., CHOCHOL, P. 2013. Roadmap for smart metering in the Slovak Republic. In: *Energofórum 2013*. Bratislava: Sféra, 2013, s. 67-82. ISBN 978-80-971375-2-6.

[7] CHRAPČIAK, I. 2013. Inteligentné meracie systémy – ako ďalej… In: *eFocus 3. ročník odbornej konferencie Smart metering – ako ďalej v zavádzaní inteligentných meracích systémov na Slovensku v období 2014+* [CD ROM]. Bratislava : eFocus, 2012.

[8] CHRAPČIAK, I. 2013. Zavádzaním inteligentných meracích systémov bližšie k inteligentnej(šej) energetike. In: *Ročenka elektrotechniky a energetiky 2013*. Bratislava : Re-public, s.r.o., 2013, s. 121-122.

[9] LIŠKA, M., BELÁŇ, A., CINTULA, B., CHRAPČIAK, I., JANÍČEK, F., VOLČKO, V. 2014. Excelentné laboratórium inteligentných sietí – Smart Grids. In *Časopis EE*. ISSN 1335-2547, 2014, roč. 20, č. 1, s. 28-31.

[10] JANÍČEK, F., ŠČEPÁNEK, M., BELÁŇ, A., CRAPČIAK, I., CERMAN, A., LENĎÁK, F. 2014. Roadmap for smart metering in the Slovak Republic. In *Energetika*. ISSN 0375-8842, 2014, vol. 64, no. 3 , p. 157-162.

[11] KALUŠ, E., CHRAPČIAK, I., BURDAN, T. 2014. Blízká setkání s analýzami v distribuční soustavě. In *Medzinárodná konferencia Trendy elektroenergetiky v evropském kontextu IX* [CD-ROM], 2014.

[12] KALUŠ, E., CHRAPČIAK, I. 2014. Measurement. Necessity? Inevitability? Ambition? In *Energy-Ecology-Economy* [USB kľúč]. Bratislava : STU, 2014. ISBN 978-80-89402-70-0.

[13] JANÍČEK, F., BELÁŇ, A., CHOCHOL, P., CHRAPČIAK, I., CERMAN, A. 2014. The smart metering in Slovakia is smart grid ready? In *Power Engineering 2014* [USB kľúč]. Bratislava : STU, 2014, s. 79-82. ISBN 978-80-89402-71-7.

[14] LÍŠKA, M., CHRAPČIAK, I. 2014. Sustainable energy in Slovakia. In *Building science and innovation bridges between Denmark and Slovakia* [USB kľúč]. Kodaň : Institute of Power and Applied Electrical Engineering, 2014.

[15] CHRAPČIAK, I. 2015. Ak má zmysel ísť ďalej, tak potom smer Grid. In *eFocus 5. ročník odbornej konferencie Smart metering/Smart Grid 2015* [USB kľúč]. Bratislava : eFocus, 2015.

[16] CHRAPČIAK, I. 2015. Inteligentné meracie systémy – priblíženie ku smart grid. In *Ročenka elektrotechniky a energetiky 2015*. Bratislava : Re-public, s.r.o., 2015, s. 126-128.

[17] JANÍČEK, F., ŠČEPÁNEK, M., BELÁŇ, A., CHRAPČIAK, I., CHOCHOL, P. 2015. Roadmap for smart metering in the Slovak Republic. In *Energy & Environment* [USB kľúč], 2015. s. 35-52.

[18] CHRAPČIAK, I. 2014. *Meranie v prenosovej a distribučnej sústave*. Bratislava : FEI STU, 2014. 52s. Písomná práca k dizertačnej skúške.

[19] CHRAPČIAK, I., BILÍK, P. 2011. Elektroměry pro měření spotřeby i analýzu kvality elektrické energie. In: *AUTOMA* [elektronický zdroj], 12/2011, s.31-32.

[20] KUKUČA, P., CHRAPČIAK, I. 2016. From smart metering to smart grid. *In: Measurement Science Review*. 16. (2016) No.3. ISSN 1335-8871. s. 142-148.

Poznámky: