

VŠB – Technická univerzita Ostrava
Fakulta elektrotechniky a informatiky
Katedra kybernetiky a biomedicínského inženýrství

Měření deformačního, pulsačního a skrytého výkonu
Measurement of strain, pulsatile and hidden power

2015

Jan Jurenka

Zadání diplomové práce

Student: **Bc. Jan Jurenka**
Studijní program: N2649 Elektrotechnika
Studijní obor: 2601T004 Měřicí a řídicí technika
Téma: **Měření deformačního, pulsačního a skrytého výkonu**
Measurement of Strain, Pulsatile and Hidden Power

Zásady pro vypracování:

Cílem řešení diplomové práce je realizace měřicí aplikace pro měření třífázových soustav s nesymetrickým zatížením.

Zásady pro vypracování:

1. Studium teorie elektrických třífázových výkonů a jejich měření.
2. Odvození skrytého, pulsačního a deformačního výkonu.
3. Tvorba aplikace pro měření třífázové soustavy s nesymetrickou zátěží - měření skrytého, pulsačního a deformačního výkonu.
4. Ověření činnosti aplikace pro třífázová měření.
5. Zhodnocení výsledků měření.

Seznam doporučené odborné literatury:

- [1] DRECHSLER, Richard. *Měření, hodnocení a kvalita odběru elektrické energie v provozu tyristorových zařízení*. Praha: SNTL - Nakladatelství technické literatury, 1982. 134 s.
- [2] WITTASSEK, Tomáš. *Virtuální instrumentace I. Sylaby do předmětu Virtuální instrumentace I*. Ostrava, 2012. 264 s.
- [3] VLACH, J., J. HAVLÍČEK a M. VLACH. *Začínáme s LabVIEW*. Praha: BEN - technická literatura, 2008. 248 s. ISBN 978-80-7300-245-9.
- [4] JOHNSON, Gary W. a Richard JENNINGS. *LabVIEW graphical programming*. New York: McGraw-Hill, 2006, 608 s. ISBN 0-07-145146-3.

Formální náležitosti a rozsah diplomové práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.

Vedoucí diplomové práce: **doc. Ing. Ludvík Koval, Ph.D.**

Datum zadání: 01.09.2014

Datum odevzdání: 07.05.2015

doc. Ing. Jiří Koziorek, Ph.D.
vedoucí katedry



prof. RNDr. Václav Snášel, CSc.
děkan fakulty

Prohlášení

Tuto diplomovou práci jsem vypracoval samostatně.

Uvedl jsem všechny literární prameny a publikace, ze kterých jsem čerpal.

V Ostravě, dne 7.5.2015


.....

Poděkování

Děkuji vedoucímu diplomové práce doc. Ing. Ludvíku Kovalovi, Ph.D. za konzultaci a pomoc při vytváření této práce.

Abstrakt

Deformační výkony působí v důsledku přítomnosti proudových a napěťových harmonických v obvodu. Skrytý a pulsační výkon doprovází odběr, když je nesymetrický. Tato diplomová práce se zabývá měřením výkonů trojfázové soustavy v jejím nejobecnějším provozním stavu. Tím je soustava nesymetricky napájeného spotřebiče s nárokem na jalový výkon za nesinusových podmínek.

Klíčová slova

deformační výkon, pulsační výkon, skrytý výkon, ztrátový výkon, nelineární zátěž, sinusové podmínky, trojfázová soustava, nesymetrická zátěž, symetrické složky, LabVIEW

Abstract

Distortion powers act due to the presence of current and voltage harmonics in the circuit. The Hidden and Pulsatile power act due to the load unbalance. This thesis deals with measurement of the three phase-phase system powers in the most general case. That means an unbalanced system with the reactive load under non-sinusoidal conditions.

Key words

distortion power, pulsatile power, hidden power, power loss, non-linear load, sinusoidal conditions, three-phase system, unbalanced load, symmetrical components, LabVIEW

Obsah

1	Úvod	3
2	Povaha střídavého elektrického výkonu	4
3	Jednofázový elektrický výkon	6
3.1	Činný výkon	8
3.2	Jalový výkon	9
3.3	Zdánlivý výkon	9
3.4	Deformační výkon	10
3.5	Neaktivní výkon	11
3.6	Účinník	11
4	Trojfázová soustava	13
4.1	Nesymetrie	14
4.2	Metoda symetrických složek	15
4.2.1	Rozklad nesouměrné trojfázové soustavy na souměrné složky	15
5	Trojfázový elektrický výkon	19
5.1	Zdánlivý výkon	21
5.2	Činný výkon	22
5.3	Jalový výkon	23
5.4	Neaktivní výkon	23
5.5	Deformační výkon	23
5.6	Výkon nesymetrie	24
5.7	Ukazatele využití sítě	24
5.8	Výkon nesymetrie zátěže	25
5.8.1	Pulsační výkon	25
5.8.2	Skrytý výkon	26
6	Aplikace pro měření výkonů	28
6.1	Sběr dat	29
6.2	Výpočty	30
7	Měření	34
8	Závěr	38

1 Úvod

Deformační, pulsační a skrytý výkon jsou ztrátové. Deformační výkony působí v důsledku přítomnosti proudových a napěťových harmonických v obvodu. Skrytý a pulsační výkon doprovází odběr, když je nesymetrický. Je-li zátěž lineární a v napájecí síti nejsou přítomny harmonické, nevzniká deformační výkon. Je-li napěťová i proudová trojfázová soustava symetrická, nevzniká pulsační výkon. Je-li napěťová i proudová vícefázová soustava vyvážená, nevzniká skrytý výkon. Naopak, když nejsou tyto podmínky splněny, jsou nároky na odběr zvýšené – výkony deformační, pulsační a skrytý vznikají. Jsou však ztrátové a žádnou činnou práci konat nemohou. Parazitují na elektrické síti a jejich důsledkem je především navyšování ztrát a zhoršování přenosových možností sítě.

Tato diplomová práce se zabývá měřením výkonů trojfázové soustavy v jejím nejobecnějším stavu provozu. Tím je deformovaná soustava nesymetricky napájeného spotřebiče s nárokem na jalový výkon. Práce se opírá o mezinárodní normu IEEE 1459-2010. Vztahy pro trojfázové výkony, které tato norma definuje (včetně deformačních výkonů a výkonů nesymetrie), jsou podstatou vytvořené měřicí aplikace.

2 Povaha střídavého elektrického výkonu

Elektrický výkon je elektrickou prací vykonanou za jednotku času. Zůstává otázka jaké. Ne vždy výkon působí užitečně a jeho povaha závisí na podmínkách provozu konkrétního elektrického obvodu v konkrétní čas. Koná-li výkon užitečnou elektrickou práci, je nazýván činný. Nekoná-li užitečnou elektrickou práci, pak je (v souladu s novým názvoslovím) nazýván neaktivní. Podmínkami provozu elektrického obvodu z hlediska povahy výkonu je myšlen především požadavek spotřebiče na jalový výkon a sinusový či nesinusový odběr.

Jalový výkon byl zaveden jako veličina udávající míru energie, která střídavě kmitá mezi zdrojem a spotřebičem a nekoná užitečnou energii. Pro nesinusové průběhy napětí a proudu to znamená také jistý přírůstek jalového výkonu harmonických složek. Současná mezinárodní norma IEEE 1459-2010 však toto pojetí nedoporučuje a vztahuje jalový výkon výhradně na základní harmonickou.

Ať už je zátěž více induktivní anebo kapacitní, její převládající charakter způsobí fázový posun mezi napětím a proudem, které pak nelze maximálně využívat. Využití celkové dodávané energie, jejíž mírou je zdánlivý výkon, tedy předpokládá napětí a proud ve fázi, jinak vznikají jalové ztráty. Účinnost využití napětí a proudu je dána poměrem činného ke zdánlivému výkonu – zkráceně účínkem. Dle požadavku provozovatele je dovolená hodnota účínku v rozsahu 0,95 až 1 induktivního charakteru.

Pro řízení výkonu velmi používané výkonové polovodičové součástky mohou zpětně působit na napájecí síť a tím i na ostatní připojená zařízení. Po průchodu harmonických proudů vedením se na jeho impedancích vytváří úbytky vyšších řádů, které se superponují na síťové napětí. Pak nemusí jít o požadavek spotřebiče a přesto je mu nesinusový proud vnucen. Problémem generování nízkofrekvenčního rušení (harmonických) nelineárními spotřebiči do elektrické sítě se zabývá oblast elektromagnetické kompatibility (EMC). [3] Mezi další zpětné vlivy nelineárních spotřebičů na síť patří posunutí fázoru proudu vůči napětí (měniče s fázovým řízením), což může vytvářet anebo zvyšovat jalový výkon. [5]

Kvalita sítě z hlediska tvaru napětí a proudu je na základní harmonické vyhodnocována účínkem a na celém harmonickém spektru pak činitelem *THD*. Dle normy nesmí napěťový činitel *THD* překročit 8%. Dále jsou pro napětí stanoveny úrovně jednotlivých harmonických vyjádřených v procentech základní harmonické. Tyto úrovně nesmí být překročeny v libovolném týdenním období v 95% desetiminutových středních efektivních hodnot. [6] Pokud není některý požadavek v rámci provozu elektrického zařízení dodržen, je třeba získat povolení od distributora sítě na základě nápravných opatření či omezením provozu zařízení.

Přítomnost harmonických napětí a proudů v obvodu způsobuje deformační výkony, jejichž důsledkem jsou ztráty v činných odporech, reaktancích a magnetických obvodech přenosové soustavy. Deformační výkony mohou v sítích způsobovat i rezonance a jiné nepříznivé jevy. [4]

Problematiku zpětných vlivů nelineárních spotřebičů a vlastně i celého střídavého elektrického výkonu lze rozložit na řešení problému harmonických odděleně od základní harmonické. Způsob analýzy i elim-

inace zpětných vlivů je pro každou část jiný. Odebíraný proud lze pomyslně rozložit na základní harmonickou, jejíž zpětné vlivy budou vázány na vznik jalového výkonu, a proud, zahrnující všechny ostatní harmonické. [4] Ty tvoří tzv. zbytkovou křivku a její působení je spojeno především se vznikem proudového deformačního výkonu. Principem aktivních filtrů je generování převrácené zbytkové křivky.

Tam, kde je to nutné anebo žádoucí, lze problém jalového i deformačního výkonu řešit dohromady spoluprací spotřebiče s tzv. filtračně-kompenzačním zařízením. V souvislosti se vznikem jalového řídicího a jalového komutačního výkonu u měničů, je snaha eliminovat tyto výkony kompenzací účinníku. Jednoduché filtry pak spočívají v naladění na příslušnou harmonickou, kterou je potřeba eliminovat. Složitější laděné filtry mají stejné vlastnosti jako skupina filtrů jednoduchých a dokážou tak potlačit současně více harmonických. [3]

U trojfázových obvodů má symetrie či nesymetrie soustavy napětí a proudu rozhodující vliv na hospodárnost provozu. Oboustraná symetrie, při které jsou symetrická síťová napětí i odebírané proudy, je nejefektivnější stav trojfázového obvodu, při kterém nedochází ke vzniku ztrátových výkonů. K uvedeným podmínkám provozu obvodu z hlediska povahy výkonu se proto též přidává souměrnost či nesouměrnost odběru a napájecí sítě. Poměrem zpětné a sousledné složky napětí v rozsahu dvou procent norma stanovuje a zároveň zajišťuje normální podmínky hospodárného provozu elektrické sítě. [6]

Obecnou nesymetrii zohledňují definice normy IEEE 1459-2010. Trojfázový neaktivní výkon kombinuje jak ztráty jalové a deformační, tak výkon nesymetrie.

3 Jednofázový elektrický výkon

Následující definice popisují výkonové poměry jednofázového obvodu za nesinusových podmínek. To znamená, že je napětí, proud či obojí deformováno. To je obvykle důsledkem přítomnosti nelineárního prvku v obvodu. Tento prvek odebírá nesinusový proud a po průchodu proudem obvodem vytvoří na jeho impedancích harmonické úbytky, které se superponují na základní harmonickou a deformují napětí. Vlivem rozšíření nelineárních spotřebičů už nelze napětí apriorně považovat za sinusové. [3]

Jsou-li měřené napětí a proud nesinusové, ale periodické, lze je rozložit harmonickou analýzou na Fourierovu řadu a pracovat výhodně pouze se dvěma složkami: základní harmonickou u_1 , resp. i_1 a deformační u_H , resp. i_H , zahrnující všechny obsažené harmonické včetně případné stejnosměrné složky U_0 , resp. I_0 . Pro okamžitý průběh napětí a proudu tedy platí:

$$u = u_1 + u_H \tag{3.1}$$

$$i = i_1 + i_H \tag{3.2}$$

přičemž

$$u_1 = \sqrt{2}U_1 \sin(2\pi ft - \alpha_1) \tag{3.3}$$

$$u_H = U_0 + \sqrt{2} \sum_{h \neq 1} U_h \sin(2h\pi ft - \alpha_h) \tag{3.4}$$

$$i_1 = \sqrt{2}I_1 \sin(2\pi ft - \beta_1) \tag{3.5}$$

$$i_H = I_0 + \sqrt{2} \sum_{h \neq 1} I_h \sin(2h\pi ft - \beta_h) \tag{3.6}$$

[1]

kde

U_1, I_1 je základní harmonické napětí a proudu (rozumí se vždy efektivní hodnota),

α_1, β_1 je počáteční fáze základní harmonické napětí a proudu,

U_h, I_h je efektivní hodnota napětí a proudu harmonického řádu h ,

α_h, β_h je počáteční fáze napětí a proudu harmonického řádu h ,

f je frekvence a

t je čas.

Deformace průběhu signálu je ekvivalentní superpozici jednoho a více sinusových průběhů na základní harmonickou. Efektivní hodnoty okamžitého napětí a proudu jsou součtem efektivních hodnot jednotlivých harmonických složek:

$$U = \sqrt{\frac{1}{kT} \int_{\tau}^{\tau+kT} u^2 dt} = \sqrt{U_1^2 + U_H^2} \quad (3.7)$$

$$I = \sqrt{\frac{1}{kT} \int_{\tau}^{\tau+kT} i^2 dt} = \sqrt{I_1^2 + I_H^2} \quad (3.8)$$

přičemž

$$U_H = U_0 + \sum_{h \neq 1} U_h = \sqrt{U^2 - U_1^2} \quad (3.9)$$

$$I_H = I_0 + \sum_{h \neq 1} I_h = \sqrt{I^2 - I_1^2} \quad (3.10)$$

[1]

jsou efektivní hodnoty u_H a i_H , čili suma efektivních hodnot všech složek signálu mimo základní harmonickou. V praxi má větší význam a přesnost výpočet geometrického rozdílu (odmocniny rozdílu čtverců) efektivní hodnoty měřené veličiny a její základní harmonické. Podobně je definován i celkový obsah zkreslení *TDC* (total distortion content), ten však neuvažuje stejnosměrnou složku. [3]

Deformaci signálu lze posoudit činitelem *THD* (total harmonic distortion), který je pro napětí:

$$THD_U = \frac{U_H}{U_1} \quad (3.11)$$

a proud:

$$THD_I = \frac{I_H}{I_1} \quad (3.12)$$

[1]

THD není omezeno řádem harmonické, takže zahrnuje složky libovolně vysokého, celočíselného i ne-celočíselného řádu (všechny harmonické a meziharmonické). Takto definovaný činitel *THD* reflektuje i přítomnost stejnosměrné složky. Vlivný stejnosměrný proud je ve výkonových systémech přítomen jen zřídka, nicméně malý obsah stejnosměrné složky je běžný. [1]

3.1 Činný výkon

Okamžitý výkon je součinem okamžité hodnoty napětí a proudu:

$$p = ui \quad (3.13)$$

Činný výkon je definován jako střední hodnota okamžitého výkonu p během časového intervalu měření, který je celočíselným násobkem periody T obvodových veličin:

$$P = \frac{1}{kT} \int_{\tau}^{\tau+kT} p dt \quad (3.14)$$

kde

k je kladné celé číslo a

τ je moment, kdy započalo měření.

[1]

Činný výkon vyjadřuje množství energie za sekundu, která se v obvodu přemění na užitečnou formu energie. Je tvořen činným výkonem základní harmonické, činným výkonem harmonických složek shodného řádu a stejnosměrným výkonem napětí a proudu:

$$P = P_1 + P_H \quad (3.15)$$

přičemž

$$P_1 = \frac{1}{kT} \int_{\tau}^{\tau+kT} u_1 i_1 dt = U_1 I_1 \cos \varphi_1 \quad (3.16)$$

je činný výkon základní harmonické P_1 a zbytek:

$$P_H = U_0 I_0 + \sum_{h \neq 1} U_h I_h \cos \varphi_h = P - P_1 \quad (3.17)$$

harmonický činný výkon P_H ,

[1]

kde

$\cos \varphi_1$ je účinník,

φ_1 je fázový posun napětí a proudu základní harmonické a

φ_h fázový posun proudové a napěťové složky téhož řádu (mimo základní harmonickou).

Činný výkon základní harmonické a všech harmonických složek shodného řádu je podmíněn vzájemným fázovým posunem napětí a proudu různým od $\pm 90^\circ$.

Pro střídavé pohony není činný výkon P_H užitečný. Nepodílí se totiž na synchronním točivém momentu. Vzhledem k tomu, že střídavé pohony tvoří velmi častou zátěž, je smysluplné oddělovat harmonický činný výkon P_H od činného výkonu základní harmonické P_1 . [1]

3.2 Jalový výkon

Jalový výkon představuje ztráty základní harmonické napětí a proudu v důsledku jejich nenulového fázového posunu:

$$Q_1 = U_1 I_1 \sin \varphi_1 \quad (3.18)$$

[1]

Je-li kladný, zátěž má induktivní charakter, je-li záporný, pak kapacitní. Jalový výkon byl zaveden jako veličina udávající míru energie, která střídavě kmitá mezi zdrojem a spotřebičem. [3] Současná norma však nedoporučuje používat takto definovaný jalový výkon Q :

$$Q = \sum_{h=1}^{\infty} Q_h = \sum_{h=1}^{\infty} U_h I_h \sin \varphi_h = Q_1 + \sum_{h=2}^{\infty} U_h I_h \sin \varphi_h \quad (3.19)$$

[3]

Norma používá jen jalový výkon Q_1 , tedy na základní harmonické, a namísto jalového výkonu harmonických je zaveden harmonický deformační výkon D_H (harmonic distortion power), který jej obsahuje. Navíc však D_H pojímá deformační ztráty vlivem vzájemného působení harmonických (včetně stejnosměrné složky). [1]

3.3 Zdánlivý výkon

Zdánlivý výkon je maximální činný výkon, který by mohl poskytovat zdroj spotřebiči za ideálních podmínek. To předpokládá, že by spotřebič napájený sinusovým napětím odebíral sinusový proud bez nároku na jalový výkon. Zdánlivý výkon je součinem efektivních hodnot napětí a proudu:

$$S = UI \quad (3.20)$$

Dosažením vztahů (3.7) a (3.8) lze rozložit zdánlivý výkon na více výkonů se samostatným významem:

$$S = UI = (U_1 + U_H)(I_1 + I_H) = U_1 I_1 + U_1 I_H + U_H I_1 + U_H I_H = \sqrt{S_1^2 + S_N^2} \quad (3.21)$$

přičemž

$$S_1 = U_1 I_1 = \sqrt{P_1^2 + Q_1^2} \quad (3.22)$$

$$S_N = \sqrt{(U_1 I_H)^2 + (U_H I_1)^2 + (U_H I_H)^2} = \sqrt{D_1^2 + D_U^2 + S_H^2} = \sqrt{S^2 - S_1^2} \quad (3.23)$$

kde

S_N je zdánlivý výkon mimo základní harmonickou (nonfundamental apparent power),

D_1 je proudový deformační výkon (current distortion power) a

D_U je napěťový deformační výkon (voltage distortion power).

[1]

Definice harmonického zdánlivého výkonu (harmonic apparent power) vychází rovněž z (3.21):

$$S_H = U_H I_H = \sqrt{P_H^2 + D_H^2} \quad (3.24)$$

kde

D_H je harmonický deformační výkon (harmonic distortion power).

[1]

3.4 Deformační výkon

Deformační výkon, obdobně jako výkon jalový, představuje neúčinnou složku zdánlivého výkonu, která vede ke zvyšování ztrát v síti a snižování její využitelnosti. [3] Jeho původ je v deformovaném proudu, napětí anebo deformaci obou těchto obvodových veličin harmonickými. Ty se na činném výkonu podílejí pouze v rámci shodného řádu a to ještě omezeně (3.17). Jejich veškeré ostatní působení je ztrátové. Norma definuje tyto tři deformační výkony: proudový, napěťový a harmonický. [1]

Deformační výkon působí nejčastěji v důsledku nesinusového odběru. Průchodem deformovaného proudu sítí je deformováno i napětí. Nesinusový odběr je tedy doprovázen proudovým deformačním výkonem D_1 :

$$D_1 = U_1 I_H = S_1 (THD_1) \quad (3.25)$$

a napěťovým deformačním výkonem D_U :

$$D_U = U_H I_1 = S_1 (THD_U) \quad (3.26)$$

Oba jsou definovány na základě vztahu (3.21) s přihlédnutím k (3.1) až (3.10) jako vzájemné působení harmonických (včetně stejnosměrné složky) se základní harmonickou, které je nutně ztrátové. Činný výkon totiž může vznikat pouze na shodné frekvenci. Produktem vzájemného působení harmonických jsou další ztráty nazývané harmonický deformační výkon D_H , který lze vyjádřit ze vztahů (3.17) a (3.24):

$$D_H = \sqrt{S_H^2 - P_H^2} \quad (3.27)$$

Tento výkon mění obvyklou koncepci. Obsahuje totiž jalový výkon harmonických patrný z konečné úpravy vztahu (3.19).

Obvyklá bilance těchto veličin umožňuje hrubé posouzení ztrát za nesinusových podmínek v obvodu:

$$D_I > D_U > S_H > P_H \quad (3.28)$$

3.5 Neaktivní výkon

Neaktivní výkon N reprezentuje všechny složky okamžitého výkonu, které se nepodílejí na tvorbě činného výkonu P :

$$N = \sqrt{S^2 - P^2} \quad (3.29)$$

[1], [3]

3.6 Účinit

Účinnost základní harmonické napětí a proudu je hodnocena účinitkem, který je poměrem výkonu přenášeného ke spotřebiči a maximálního výkonu, který k němu může být přenášen při týchž ztrátách na vedení:

$$\cos \varphi_1 = \frac{P_1}{S_1} \quad (3.30)$$

Účinnost má původ v obvodových veličinách. Účinit λ je míra účinného využití napětí a proudu pro přenos energie. To předpokládá sinusový průběh obvodových veličin a jejich nulový fázový posun ($\cos \varphi_1=1$). Pro úplný účinit λ platí:

$$\lambda = \frac{P}{S} \quad (3.31)$$

[1], [3]

Pro odlišení od účinníku $\cos \varphi_1$, který se týká výhradně základní harmonické, je účinník λ uváděn s pří-
vlastkem opravdový anebo je nazýván power factor – zkráceně *PF*. [3]

Tabulka 1 sjednocuje všechny uvedené výkony a ukazatele normy IEEE 1459-2010 a dělí je dle povahy
na úplné (kombinované), působící na základní harmonické a mimo ni.

Tab. 1 Shrnutí a rozdělení jednofázových výkonů za nesinusových podmínek [1]

Výkon, ukazatel	Úplný	Základní harmonická	Mimo základní harmonickou
Zdánlivý	S (VA)	S_1 (VA)	S_N S_H (VA)
Činný	P (W)	P_1 (W)	P_H (W)
Neaktivní	N (var)	Q_1 (var)	D_U D_1 D_H (var)
Využití sítě	$\lambda = \frac{P}{S}$	$\cos \varphi_1 = \frac{P_1}{S_1}$	—
Deformace	—	—	$\frac{S_N}{S_1}$

4 Trojfázová soustava

Jsou-li absolutní velikosti všech tří fázových napětí stejné:

$$U_U = U_V = U_W = U$$

a jejich fázory posunuty vzájemně o 120° , hovoříme o souměrné napěťové soustavě, pro niž platí:

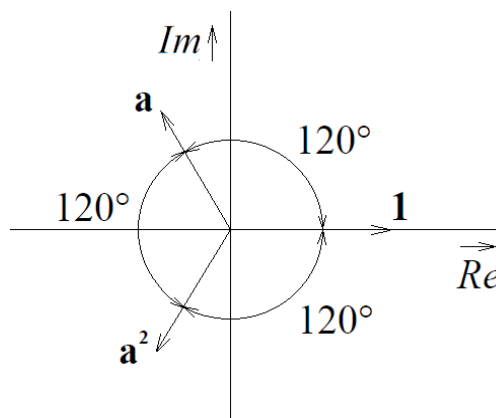
$$\mathbf{U}_V = \mathbf{a}^2 \mathbf{U}_U \quad (4.1)$$

$$\mathbf{U}_W = \mathbf{a} \mathbf{U}_U \quad [2]$$

Natočení fázorů o 120° a -120° je docíleno operátory (obr. 1):

$$\mathbf{a} = e^{j(2/3)\pi} = -\frac{1}{2} + j\frac{1}{2}\sqrt{3} \quad (4.2)$$

$$\mathbf{a}^2 = e^{-j(2/3)\pi} = e^{j(4/3)\pi} = -\frac{1}{2} - j\frac{1}{2}\sqrt{3} \quad [1], [2]$$



Obr. 1 Operátory natočení v komplexní rovině [7]

Připojením symetrické zátěže na tuto napěťovou soustavu vznikne symetrická soustava proudová, pro kterou v případě čtyřvodičového rozvodu platí:

$$I_U = I_V = I_W = I$$

$$\varphi_U = \varphi_V = \varphi_W = \varphi$$

$$I_N = 0$$

kde

$\varphi_{U,V,W}$ jsou fázové posuny ve fázi U, V, W,

$I_{U,V,W}$ jsou fázové proudy a

I_N je proud v nulovém vodiči.

[2]

Pro proudovou symetrickou soustavu platí obdobně jako u napěťové:

$$I_V = a^2 I_U \quad (4.3)$$

$$I_W = a I_U$$

[2]

4.1 Nesymetrie

Pro ideální vlastnosti výroby, přenosu a spotřeby elektrické energie z hlediska symetrie soustavy platí, že má na celé síti vzájemně shodné hodnoty fázových napětí a proudů se shodnými fázovými natočeními po sobě jdoucích fází. Lze tedy rozlišit nesymetrii:

- napěťovou a

- proudovou,

které lze dle charakteru dále dělit na:

- amplitudovou a

- fázovou (úhlovou).

Souměrnost je teoretickým stavem, ke kterému je možné se jen více méně blížit, a tak jsou všechny reálné soustavy determinovány jistou mírou nesouměrnosti obecné, charakteru amplitudového i fázového. Zdroje i vedení však můžeme bez problému považovat za symetrické. Nesymetrie je v elektrizační soustavě způsobena především spotřebiči (nesouměrný odběr) a poruchovými stavy. Pomineme-li zkratky, přerušení vodičů a jiné poruchové stavy, jsou nejvýznamnějším zdrojem nesymetrie trojfázové nesouměrné a jednofázové spotřebiče (pokud je nelze souměrně rozložit na všechny fáze). [5]

Provoz nesouměrného spotřebiče je charakterizován rozdílným odběrem. Tedy protéká-li v daný okamžik fázovými vodiči soustavy rozdílný proud, nebo některou fází vůbec neprotéká (nejhorší případ), jde o proudovou nesymetrii. Přestože jsou odběry z distribuční sítě nízkého napětí nejčastěji jednofázové, nezpůsobují významnou nesymetrii. Snahou o rovnoměrné využití fází je již při návrhu odběrných celků tento problém z části potlačen. Naopak jednofázové spotřebiče připojované k hladinám vysokého

a velmi vysokého napětí (např. elektrická trakce) už mohou vytvářet vážný problém (u vlaků řešeno na dispečinku rovnoměrným rozložením odběru na všechny fáze).

Kromě nevyužití přenosových možností napájecích sítí má nesouměrnost elektrické soustavy další nepříznivé dopady. Při provozu trojfázových souměrných spotřebičů (např. motory) může při větší nesy-metrii docházet ke zvýšenému namáhání a rychlejšímu opotřebování některých jeho částí. Obecně pak platí, že nesouměrnost soustavy zvyšuje její ztráty a má jednoznačně nepříznivý vliv na využitelnost sítě. Výkon nesymetrie S_{U1} , pulsační výkon S_b a skrytý výkon S_0 , které jsou vysvětleny dále v textu, se pokoušejí ztráty nesymetrie vyčíslit.

4.2 Metoda symetrických složek

Nesymetrie v trojfázových sítích vede ke složitějším analýzám a výpočtům. Je tedy snaha nahradit nesy-metrickou soustavu soustavami symetrickými. Používá se metoda symetrických složek. Použití metody je všestrannější, ale v této práci umožní posoudit vliv nesymetrie trojfázové soustavy na kvalitu odběru a dodávky elektrické energie. Podstatou metody je rozložení nesouměrné n -fázové soustavy proudu či napětí na n souměrných složkových soustav. Trojfázovou soustavu lze pak rozložit na tři souměrné trojfázové soustavy:

- souslednou, neboli synchronní, která má stejný sled fází,
- zpětnou, neboli inverzní, která má opačný sled fází a
- nulovou, neboli netočivou, bez vzájemného fázového natočení.

Sousledné složky napětí a proudu umožňují výpočet důležitých symetrických výkonů, které určují míru využití sítě na základní harmonické. To je často důležité pro posouzení kvality provozu točivých el-ektrických strojů. Složky zpětné a nulové lze použít k vyčíslení míry nesouměrnosti, nevyváženosti a ztrátových nesymetrických výkonů.

4.2.1 Rozklad nesouměrné trojfázové soustavy na souměrné složky

Každou nesymetrickou trojfázovou soustavu lze rozložit na tři trojfázové soustavy (obr. 2). Pro proudovou soustavu reprezentovanou fázory I_U, I_V, I_W, I_N platí:

Sousledná složková soustava:

$$\begin{aligned} I_{aU} &= I_a \\ I_{aV} &= a^2 I_a \\ I_{aW} &= a I_a \end{aligned} \tag{4.4}$$

Zpětná složková soustava:

$$I_{bU} = I_b$$

$$I_{bV} = aI_b \tag{4.5}$$

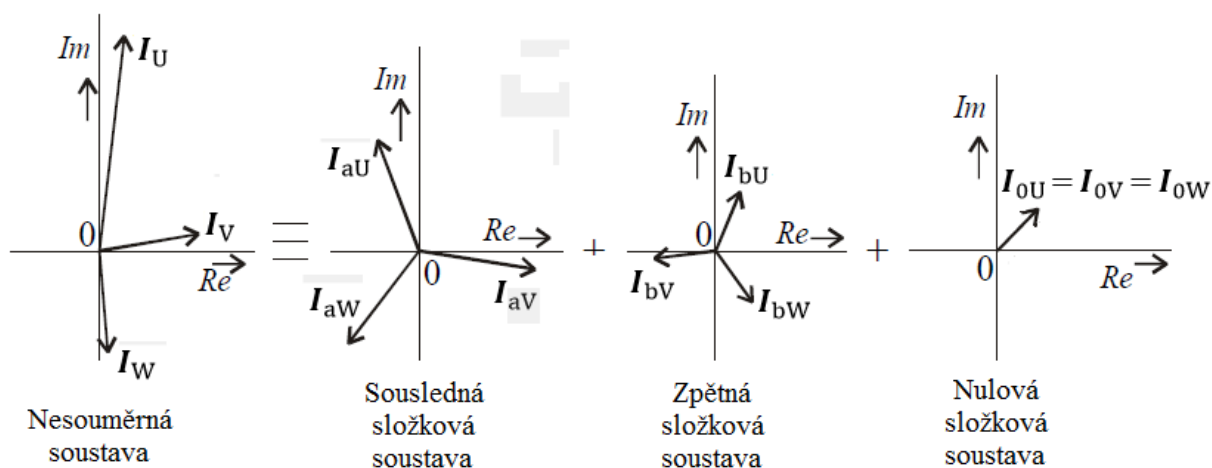
$$I_{bW} = a^2I_b$$

Nulová složková soustava:

$$I_{0U} = I_{0V} = I_{0W} = I_0$$

[7]

Jak je patrné, každou symetrickou soustavu lze definovat jediným fázorem. Absolutní hodnoty těchto fázorů, proudy I_a , I_b , I_0 jsou hledané symetrické složky proudu.



Obr. 2 Rozklad nesouměrné soustavy metodou souměrných složek [7]

Pro libovolnou nesouměrnou soustavu platí, že její fázory jsou součtem fázorů symetrických složek:

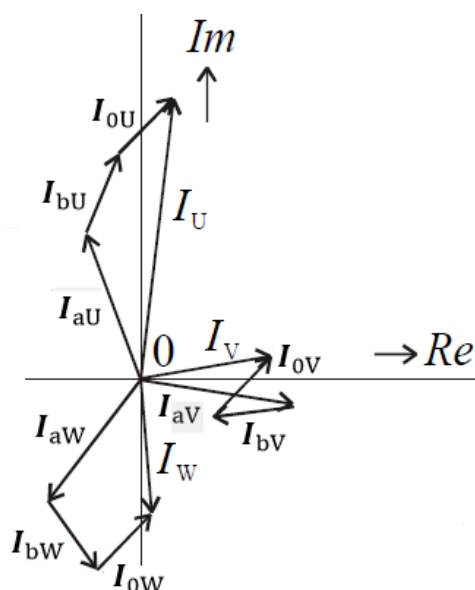
$$I_U = I_a + I_b + I_0$$

$$I_V = a^2I_a + aI_b + I_0 \tag{4.6}$$

$$I_W = aI_a + a^2I_b + I_0$$

$$I_N = 3I_0$$

[2]



Obr. 3 Souvislost fázorů symetrických složek a nesouměrné proudové soustavy, kompozice složek [7]

Právě tak lze fázory souměrných složek vyjádřit využitím fázorů nesouměrné soustavy:

$$I_a = \frac{1}{3}(I_U + aI_V + a^2I_W)$$

$$I_b = \frac{1}{3}(I_U + a^2I_V + aI_W) \quad (4.7)$$

$$I_0 = \frac{1}{3}(I_U + I_V + I_W) = \frac{1}{3}I_N$$

[2]

Na základě symetrických složek je založen způsob hodnocení kvality provozu trojfázových soustav a tedy přenosu elektrické energie od zdroje ke spotřebiči. Míra nesouměrnosti a nevyváženosti je v případě proudové soustavy vyjádřena těmito činiteli:

Činitel proudové nesouměrnosti:

$$\rho_I = \frac{I_b}{I_a} \quad (4.8)$$

Činitel proudové nevyváženosti:

$$\varepsilon_I = \frac{I_0}{I_a} \quad (4.9)$$

[2], [6]

Je-li netočivá složka nulová (tím pádem i činitel proudové nevyváženosti), je odběr vyvážený. Přitom platí, že je-li soustava vyvážená, nulovým vodičem neprotéká proud.

Obdobně lze rozložit napět'ovou nesymetrickou soustavu na tři složkové soustavy symetrické, definované sousledným, zpětným a nulovým fázorem. Jejich absolutní velikosti jsou hledané symetrické složky a pomocí nich se hodnotí napět'ová nesouměrnost:

Činitel napět'ové nesouměrnosti:

$$\rho_U = \frac{U_b}{U_a} \quad (4.10)$$

Činitel napět'ové nevyváženosti:

$$\varepsilon_U = \frac{U_0}{U_a} \quad (4.11)$$

[2], [6]

Za normálních provozních podmínek musí být během každého týdne 95% desetiminutových středních efektivních hodnot zpětné složky napájecího napětí v rozsahu 0-2% sousledné složky a ve výjimečných případech 3%. [6]

5 Trojfázový elektrický výkon

Symetricky napájená a zatěžovaná trojfázová soustava bez deformace a nároku na jalovou energii – tak se dá charakterizovat bezeztrátový, ideální stav provozu elektrického zařízení. Ten může být do jisté míry motivací, ale především hlediskem pro vytváření nových definic, norem a způsobů měření.

Definice následujících výkonů předpokládají nejobecnější případ čtyřvodičové trojfázové soustavy. Reflektují tedy jak nesinusový odběr a deformované napětí, tak obecnou proudovou i napěťovou nesymetrii. Pouze výkony pulsační a skrytý se týkají výhradně proudové nesymetrie. Jelikož je tato nesymetrie nejběžnější, může být výhodné tyto výkony určit. Pulsační a skrytý výkon neposkytují informaci o celkovém výkonu nesymetrie, lze je však zařadit mezi obecné trojfázové výkony už proto, že s nimi lze vyčíslit ztráty proudové nesymetrie samotné, odděleně od napěťové.

Standard IEEE 1459-2010, ze kterého tato práce přejímá většinu definic, zavádí koncepci virtuální symetrizace obvodu, který má stejné fázové ztráty jako vlastní řešený obvod. Takto definované výkony tedy berou soustavu jako celek a zohledňují ztrátový výkon nesouměrnosti. Jsou zavedeny tzv. efektivní veličiny. Pro úplný efektivní proud I_e a jeho základní harmonickou I_{e1} platí:

$$I_e = \sqrt{I_{e1}^2 + I_{eH}^2} \quad (5.1)$$

$$I_{e1} = \sqrt{\frac{I_{U1}^2 + I_{V1}^2 + I_{W1}^2 + \rho_1 I_{N1}^2}{3}} \quad (5.2)$$

[1]

kde

I_{eH} je superpozice všech složek proudu mimo základní harmonickou,

$I_{U1, V1, W1}$ jsou základní harmonické proudů fází U, V, W,

I_{N1} je základní harmonická proudu v nulovém vodiči a

ρ_1 je poměrem odporu nulového vodiče k odporu fázového vodiče

V praxi je u většiny soustav s deformací poměr ρ_1 neznámý a navíc je funkcí teploty, zátěže a topologie sítě. Pro zjednodušené měření za nej normu doporučuje dosadit jedničku. Praktické definice pro efektivní proud jsou pak následující:

$$I_e = \sqrt{\frac{I_U^2 + I_V^2 + I_W^2 + I_N^2}{3}} \quad (5.3)$$

$$I_{e1} = \sqrt{\frac{I_{U1}^2 + I_{V1}^2 + I_{W1}^2 + I_{N1}^2}{3}} \quad (5.4)$$

$$I_{eH} = \sqrt{\frac{I_{UH}^2 + I_{VH}^2 + I_{WH}^2 + I_{NH}^2}{3}} = \sqrt{I_e^2 - I_{e1}^2} \quad (5.5)$$

kde

$I_{UH,VH,WH}$ jsou superpozice všech složek proudů fází U, V, W mimo základní harmonickou

I_{NH} je superpozice všech složek proudu v nulovém vodiči

[1]

Praktické vztahy pro efektivní napětí U_e , napětí jeho základní harmonické U_{e1} a ostatních složek U_{eH} jsou pak následující:

$$U_e = \sqrt{U_{e1}^2 + U_{eH}^2} \quad (5.6)$$

$$U_e = \sqrt{\frac{3(U_U^2 + U_V^2 + U_W^2) + U_{UV}^2 + U_{VW}^2 + U_{WU}^2}{18}} \quad (5.7)$$

$$U_{e1} = \sqrt{\frac{3(U_{U1}^2 + U_{V1}^2 + U_{W1}^2) + U_{UV1}^2 + U_{VW1}^2 + U_{WU1}^2}{18}} \quad (5.8)$$

$$U_{eH} = \sqrt{\frac{3(U_{UH}^2 + U_{VH}^2 + U_{WH}^2) + U_{UVH}^2 + U_{VWH}^2 + U_{WUH}^2}{18}} = \sqrt{U_e^2 - U_{e1}^2} \quad (5.9)$$

[1]

kde

$U_{U,V,W}$ jsou fázová napětí,

$U_{U1,V1,W1}$ jsou jejich základní harmonické,

$U_{UH,VH,WH}$ jsou superpozice všech složek fázových napětí mimo základní harmonickou,

$U_{UV,VW,WU}$ jsou sdružená napětí,

$U_{UV1,VW1,WU1}$ jsou základní harmonické sdružených napětí a

$U_{UVH,VWH,WUH}$ jsou superpozice všech složek sdružených napětí mimo základní harmonickou.

Pro hodnocení vlivu nežádoucích složek signálu na soustavu se z těchto hodnot určuje napěťový a proudový činitel THD :

$$THD_{eU} = \frac{U_{eH}}{U_{e1}} \quad (5.10)$$

$$THD_{eI} = \frac{I_{eH}}{I_{e1}} \quad (5.11)$$

[1]

5.1 Zdánlivý výkon

Pro výpočet zdánlivého výkonu soustavy existuje více definic. Ty nejjednodušší se omezují pouze na ideální provoz soustavy. Aritmetický zdánlivý výkon S_A je součtem zdánlivých výkonů fází. Geometrickým součtem (odmocninou součtu čtverců) fázových zdánlivých výkonů lze získat vektorový zdánlivý výkon S_v . Žádná z těchto definic nereflektuje nesymetrii soustavy, která společně s jalovým a deformačním výkonem zvětšuje její ztráty. Při nesymetrii zdánlivý výkon trojfázové soustavy roste. To znamená, že ji nelze uvažovat jenom jako tři nezávislé fáze. [1]

Pro efektivní zdánlivý výkon trojfázové soustavy platí:

$$S_e = 3U_e I_e \quad (5.12)$$

[1]

V porovnání s ostatními zmíněnými definicemi vychází vždy větší (účinník λ tím pádem menší). V ideálním případě, pokud by se dal provoz trojfázové soustavy považovat za symetrický, platí ekvivalence:

$$S_v = S_A = S_e = S_U + S_V + S_W \quad (5.13)$$

a zdánlivý výkon soustavy je roven součtu fázových zdánlivých výkonů (3.20). [1]

Dosazením (5.1) a (5.6) do vztahu (5.12) získáme podobný vztah jako u jednofázového výkonu (3.21):

$$S_e = 3U_e I_e = 3(U_{e1} + U_{eH})(I_{e1} + I_{eH}) = 3U_{e1}I_{e1} + 3U_{e1}I_{eH} + 3U_{eH}I_{e1} + 3U_{eH}I_{eH} \quad (5.14)$$

$$S_e = \sqrt{S_{e1}^2 + D_{eI}^2 + D_{eU}^2 + S_{eH}^2} = \sqrt{S_{e1}^2 + S_{eN}^2} \quad (5.15)$$

kde

D_{eI} je proudový deformační výkon (current distortion power),

D_{eU} je napěťový deformační výkon (voltage distortion power),

D_{eH} je harmonický deformační výkon (harmonic distortion power),

S_{eH} je harmonický zdánlivý výkon (harmonic apparent power) a

S_{eN} je zdánlivý výkon mimo základní harmonickou (nonfundamental apparent power).

[1]

Odtud pro efektivní zdánlivý výkon na základní harmonické platí:

$$S_{e1} = 3U_{e1}I_{e1} \quad (5.16)$$

[1]

Známe-li zdánlivé výkony S_{e1} a S_e lze pro efektivní zdánlivý výkon mimo základní harmonickou psát:

$$S_{eN} = \sqrt{S_e^2 - S_{e1}^2} = \sqrt{D_{e1}^2 + D_{eU}^2 + S_{eH}^2} \quad (5.17)$$

přičemž harmonický zdánlivý výkon na základě (5.14) je:

$$S_{eH} = 3U_{eH}I_{eH} \quad (5.18)$$

[1]

Na základní harmonické je zdánlivý výkon vyhodnocován také symetrickým zdánlivým výkonem (positive-sequence apparent power):

$$S_{a1} = 3U_{a1}I_{a1} \quad (5.19)$$

[1]

kde

U_{a1} je napěťová sousledná složka a

I_{a1} je proudová sousledná složka.

5.2 Činný výkon

Přestože efektivní zdánlivý výkon je větší než součet fázových zdánlivých výkonů (5.13), všechny odebíraný trojfázový výkon navíc je mařen. Úplný činný výkon soustavy totiž nemůže být větší než součet fázových činných výkonů:

$$P = P_U + P_V + P_W \quad (5.20)$$

Činný výkon soustavy na základní harmonické je produktem proudové a napěťové sousledné složky a funkcí jejich fázového posunu:

$$P_{a1} = 3U_{a1}I_{a1} \cos \varphi_{a1} = P_{U1} + P_{V1} + P_{W1} \quad (5.21)$$

[1]

Pro harmonický činný výkon platí:

$$P_H = P - P_{a1} \quad (5.22)$$

5.3 Jalový výkon

Jalový výkon trojfázové soustavy vzniká, pokud sousledná složka napětí a proudu není ve fázi:

$$Q_{a1} = 3U_{a1}I_{a1} \sin \varphi_{a1} \quad (5.23)$$

[1]

5.4 Neaktivní výkon

Neaktivní výkon kombinuje celkové ztráty soustavy. Stejně jako u jednofázového, je i celkový neaktivní výkon závislý na přítomnosti harmonických složek a fázového posunu napětí a proudu. Oproti součtu fázových neaktivních výkonů je však zpravidla trojfázový neaktivní výkon znatelně větší, jelikož kombinuje také výkon nesymetrie S_{U1} . Jednoduše lze neaktivní výkon soustavy vyjádřit jako chybějící stranu trojúhelníka ze znalosti trojfázového zdánlivého a činného výkonu:

$$N = \sqrt{S_e^2 - P^2} \quad (5.24)$$

[1]

5.5 Deformační výkon

Stejně jako u jednofázových deformačních výkonů, navyšují také trojfázové deformační výkony bez užítku hodnotu celkového zdánlivého výkonu S_e . Jednotlivé deformační výkony jsou definovány na základě vztahu (5.14). Pro proudový deformační výkon trojfázové soustavy platí:

$$D_{eI} = 3U_{e1}I_{eH} \quad (5.25)$$

Napěťový deformační výkon trojfázové soustavy:

$$D_{eU} = 3U_{eH}I_{e1} \quad (5.26)$$

Harmonický deformační výkon soustavy:

$$D_{eH} = \sqrt{S_{eH}^2 - P_{eH}^2} \quad (5.27)$$

[1]

5.6 Výkon nesymetrie

Výkon v důsledku nesymetrie napěťové a proudové soustavy je definován tímto vztahem:

$$S_{u1} = \sqrt{S_{e1}^2 - S_{a1}^2} \quad (5.28)$$

a vyjadřuje nároky nesouměrně provozované soustavy na dodávku energie, která je mařena. Tento výkon nelze zaměňovat s hodnotou čistě napěťové nesymetrie a nepředstavuje ani výkon vázaný na fázi U, jak může působit index. Ten však pochází z originálního unbalanced (nesymetrický).

5.7 Ukazatele využití sítě

Ukazatelem využití sítě se stejnou důležitostí jako účinníky v jednotlivých fázích je tzv. line utilization factor:

$$PF_{a1} = \frac{P_{a1}}{S_{a1}} \quad (5.29)$$

[1]

Je-li soustava souměrná, je line utilization factor roven 1.

Úplným ukazatelem účinnosti soustavy je účinník PF :

$$PF = \frac{P}{S_e} \quad (5.30)$$

[1]

Ukazatelem nesymetrie je tzv. load unbalance factor definovaný poměrem výkonu nesymetrie S_{1U} a symetrického zdánlivého výkonu S_{a1} . [1] Ukazatelem deformace je pak tzv. harmonic pollution factor, daný poměrem zdánlivého výkonu mimo základní harmonickou S_{eN} a na ní S_{e1} . [1]

Tabulka 2 shrnuje všechny uvedené výkony a ukazatele normy IEEE 1459-2010 a dělí je na jedné straně dle povahy výkonu (zdánlivý, činný a neaktivní) a na straně druhé dle harmonického obsahu (úplný, základní harmonická a mimo základní harmonickou).

Tab. 2 Shrnutí a rozdělení trojfázových výkonů nesouměrné soustavy za nesinusových podmínek [1]

Výkon, ukazatel	Úplný	Základní harmonická	Mimo základní harmonickou
Zdánlivý	S_e (VA)	S_{e1} S_1^+ S_{u1} (VA)	S_{eN} S_{eH} (VA)
Činný	P (W)	P_1^+ (W)	P_H (W)
Neaktivní	N (var)	Q_1 (var)	D_{eU} D_{eI} D_{eH} (var)
Využití sítě	$PF = \frac{P}{S_e}$	$PF_{a1} = \frac{P_{a1}}{S_{a1}}$	—
Deformace	—	—	$\frac{S_{eN}}{S_{e1}}$
Nesymetrie	—	$\frac{S_{1U}}{S_{a1}}$	—

5.8 Výkon nesymetrie zátěže

Nesouměrný odběr je nejčastějším důvodem nesymetrie trojfázových soustav. Je-li v soustavě přítomna proudová nesymetrie, dochází zpravidla i k určité napěťové nesymetrii. Napěťová neymetrie způsobená proudovou je většinou relativně nevýznamná, a tak lze vztahy pro výpočet ztrát nedokonalého provozu trojfázových soustav zjednodušit. Pak lze uvažovat pouze dva výkony: pulsační, který reflektuje nesymetrii, a skrytý, vznikající při nevyváženosti soustavy. Tyto výkony mají opodstatnění i z hlediska vymezení vlivu nesymetrické zátěže samotné.

5.8.1 Pulsační výkon

Jak bylo uvedeno, pulsační i skrytý výkon se týkají výhradně proudové nesymetrie. Soustavu napětí pak považujeme za symetrickou a pro definování těchto výkonů si tak vystačíme s jedním fázovým napětím a symetrickými složkami proudové soustavy. Je-li odběr v trojfázové soustavě nesymetrický a zároveň nevyvážený, proudová zpětná složka je nenulová a vzniká pulsační výkon S_b . [2]

Použijeme-li pro výpočet pulsačního výkonu fázor napětí \mathbf{U}_U , lze pulsační výkon vyjádřit společně s fázorem proudové zpětné složky \mathbf{I}_{bU} :

$$S_b = 3\mathbf{U}_R \mathbf{I}_{bR}^* \quad (5.31)$$

a jeho absolutní hodnota je:

$$S_b = 3U_{bR} \quad (5.32)$$

[2]

Okamžité hodnoty fázových pulsačních výkonů jsou pomocí operátorů natočení a , a^2 vyjádřeny takto:

$$\begin{aligned} p_{bR} &= \frac{1}{3} \operatorname{Re}(\mathbf{S}_b + \mathbf{S}_b^* e^{j4\pi ft}) \\ p_{bS} &= \frac{1}{3} \operatorname{Re}(a\mathbf{S}_b + \mathbf{S}_b^* e^{j4\pi ft}) \end{aligned} \quad (5.33)$$

$$p_{bT} = \frac{1}{3} \operatorname{Re}(a^2\mathbf{S}_b + \mathbf{S}_b^* e^{j4\pi ft})$$

[2]

Tyto parciální pulsační výkony jednotlivých fází mají svou konstantní část:

$$\frac{1}{3} \operatorname{Re}(\mathbf{S}_b); \quad \frac{1}{3} \operatorname{Re}(a\mathbf{S}_b); \quad \frac{1}{3} \operatorname{Re}(a^2\mathbf{S}_b)$$

a společnou kmitavou část:

$$\frac{1}{3} \operatorname{Re}(\mathbf{S}_b^* e^{j4\pi ft})$$

Avšak v součtu okamžitých hodnot se projeví pouze část kmitavá:

$$p_b = p_{bR} + p_{bS} + p_{bT} = \operatorname{Re}(\mathbf{S}_b^* e^{j4\pi ft}) \quad (5.34)$$

[2]

Nemá-li obecný výkon konstantní složku, jeho střední hodnota je nulová, a výkon nekoná činnou práci. Pulsační výkon je parazitní, zvyšuje ztráty na vedení, prohřívá jej a omezuje jeho přenosové možnosti.

5.8.2 Skrytý výkon

Je-li odběr elektrické energie v trojfázové soustavě nevyvážený, je odebíraný zdánlivý výkon doprovázen skrytým výkonem S_0 . [2] Použijeme-li pro výpočet pulsačního výkonu fázor napětí \mathbf{U}_U , lze skrytý výkon komplexně vyjádřit ve společné závislosti s fázorem proudové nulové složky \mathbf{I}_{0U} :

$$S_0 = 3\mathbf{U}_U \mathbf{I}_0^* \quad (5.35)$$

a jeho absolutní hodnota je:

$$S_0 = 3UI_0 \quad (5.36)$$

[2]

Pro okamžité hodnoty fázových skrytých výkonů platí:

$$p_{0U} = \frac{1}{3} \operatorname{Re}(S_0 + S_0^* e^{j4\pi ft})$$

$$p_{0V} = \frac{1}{3} \operatorname{Re}(a^2 S_0 + a^2 S_0^* e^{j4\pi ft}) \quad (5.37)$$

$$p_{0W} = \frac{1}{3} \operatorname{Re}(aS_0 + aS_0^* e^{j4\pi ft})$$

[2]

Jednotlivé fázové skryté výkony mají svou konstantní část:

$$\frac{1}{3} \operatorname{Re}(S_0); \quad \frac{1}{3} \operatorname{Re}(aS_0); \quad \frac{1}{3} \operatorname{Re}(a^2 S_0)$$

a kmitavou část:

$$\frac{1}{3} \operatorname{Re}(S_0^* e^{j4\pi ft}); \quad \frac{1}{3} \operatorname{Re}(aS_0^* e^{j4\pi ft}); \quad \frac{1}{3} \operatorname{Re}(a^2 S_0^* e^{j4\pi ft})$$

[2]

V součtu okamžitých hodnot jsou však nulové:

$$p_0 = p_{0R} + p_{0S} + p_{0T} = 0 \quad (5.38)$$

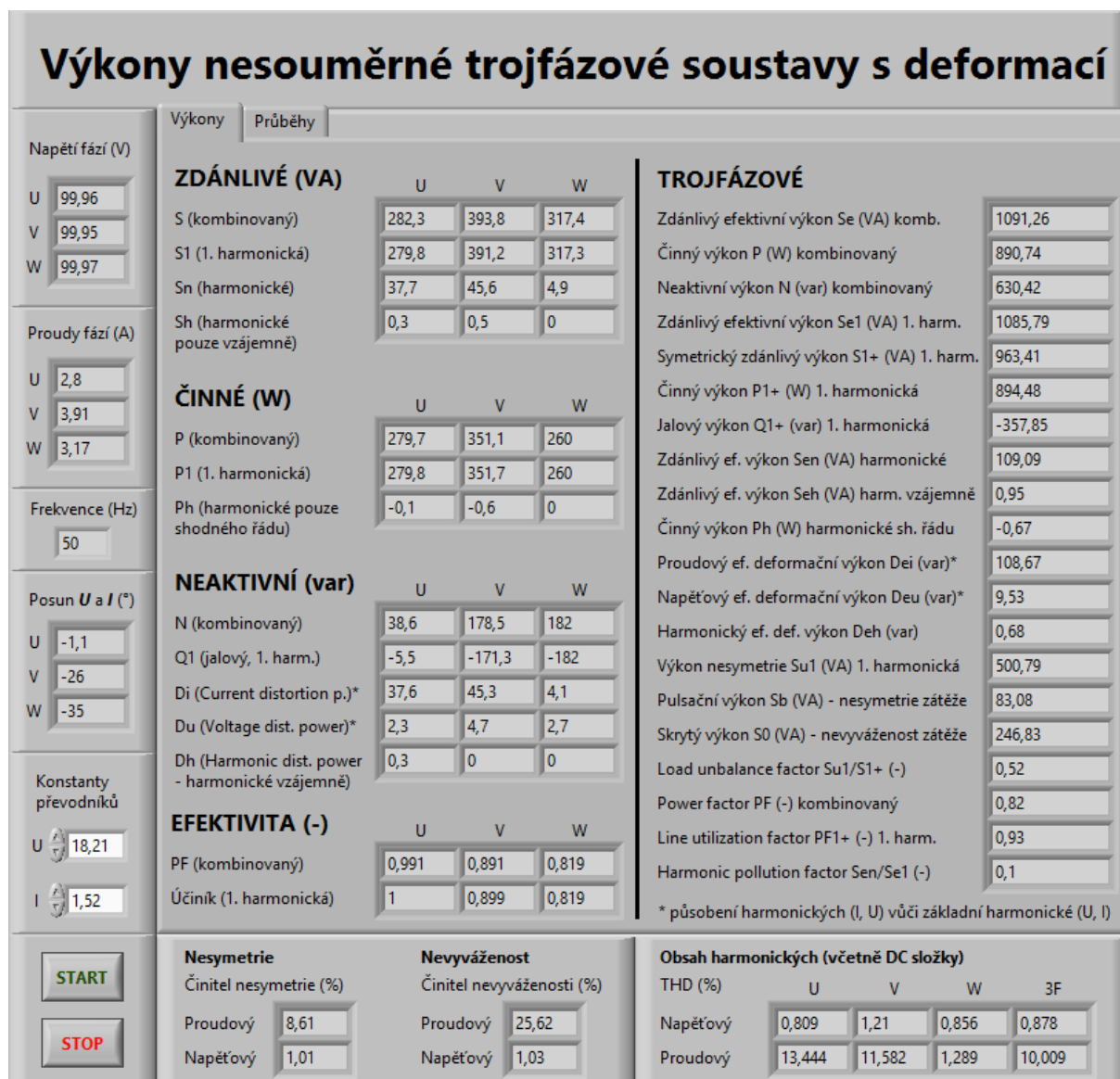
[2]

Skrytý výkon působí na jednotlivých fázích, a přesto je jeho trojfázový výkon v každém okamžiku nulový. Proto i střední hodnota během jedné periody vnučeného napětí je rovna nule. Jeho působení se omezuje ne jednotlivé fáze, je proto parazitní a na vedení zvětšuje ztráty, prohřívá jej a omezuje jeho přenosové možnosti.

Vyvážením je skrytý výkon sice odstraněn, ale pouze v tom smyslu, že jeho hodnota je připsána výkonu pulsačnímu. Snížit výkon nesouměrnosti vyvážením soustavy tedy nelze. Vyvažování amplitudové nesouměrnosti je totiž vázáno na zvětšenou fázovou nesouměrnost a naopak.

6 Aplikace pro měření výkonů

Vytvořená aplikace měří výše definované výkony nesouměrné trojfázové soustavy s nesusovými průběhy napětí a proudu. Jejím cílem je určení podílu ztrátových výkonů v nejobecnějším případě provozu čtyřvodičové trojfázové soustavy. Aplikace byla vytvořena v graficky orientovaném vývojovém prostředí LabVIEW (obr. 4 a 5).

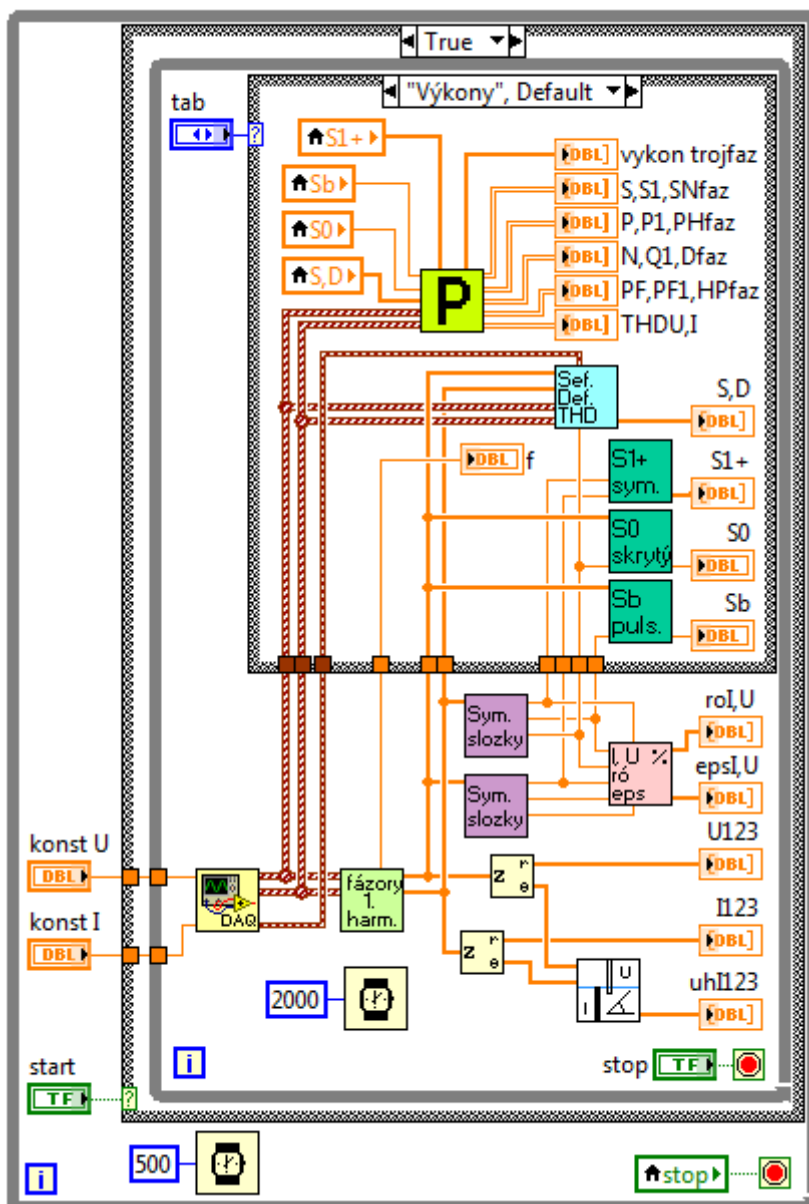


Obr. 4 Aplikace pro měření výkonů

Aplikace měří všechny výše definované výkony dle standardu IEEE 1459-2010. Dále vyhodnocuje pulsační a skrytý výkon, činitele nesymetrie a nevyváženosti. Samozřejmostí je zobrazení hodnot napětí a proudů měřené trojfázové soustavy, jejich frekvence, posuvu i průběhů (záložka Průběhy).

6.1 Sběr dat

K počítači s LabVIEW 2014 je pro měření napětí a proudů trojfázové soustavy připojena multifunkční měřicí karta pracující s malým napětím převodníku. Pro návrh aplikace i měření, jehož výsledky jsou v kapitole 7, byla použita karta NI PCI-6221. Aplikaci lze ovšem používat s jakýmkoli HW, který dokáže dostatečně rychle měřit střídavý signál (bipolární vstup) a má podporu v LabVIEW (NI MAX).



Obr. 5 Kód vytvořené měřicí aplikace (VI Main)

V DAQ (SubVI) je nutné nastavit úlohu (task) přes rozhraní DAQ Assistant. Přidáním fyzických kanálů v logickém sledu napětí a proudů za sebou je pro každou fázi vytvořena prvotní konfigurace sběru dat. Pro měření za nesinusových podmínek je potřeba znát také proud v nulovém vodiči. Kanály mají následující pořadí: $U_U, I_U, U_V, I_V, U_W, I_W, I_N$, kterému ovšem odpovídá i propojení převodníků s piny na kartě.

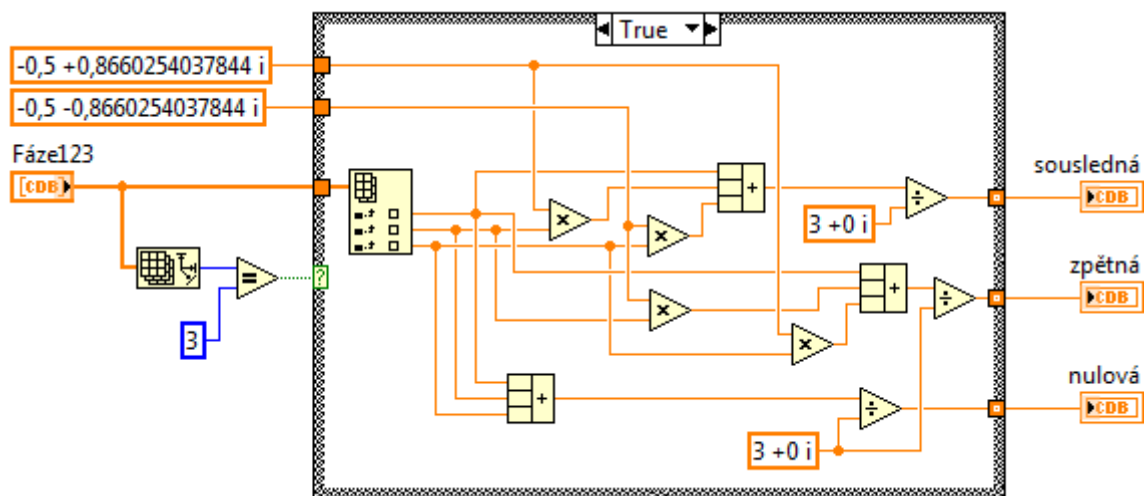
Dle úrovně měřeného napětí a konstanty převodníků je vstupní rozsah nastaven například na $\pm 10V$. Podobně je rozsah nastaven pro měřený proud. Vstupy všech kanálů jsou nastaveny vůči společné zemi vytvořené na kartě (RSE). Režim sběru dat je nastaven na konečný počet vzorků (N samples). Je-li vzorkováno síťové napětí a požadován celistvý počet period o 128 vzorcích na periodu, je příslušná vzorkovací frekvence 6,4 kHz (nastavení rate). Pro deset period je nastaven počet vzorků 1280 (number of samples). Tím jsou definovány tzv. virtuální kanály jednotlivých fyzických kanálů a měřicí úloha je připravena k odstartování.

DAQ (SubVI) dále umožňuje vybrat (case selector) mezi výpočtem na základě měření či simulace průběhů včetně definování harmonických složek napětí a proudu.

6.2 Výpočty

Konstanty převodníků napětí a proudu jsou jedinými vstupy aplikace na jejím panelu a nastavují se zde jednotně. Jestliže nelze použít stejné převodníky anebo je požadavek na větší přesnost, je možné konstantu úměrnosti každého převodníku definovat zvlášť uvnitř DAQ (SubVI). Aplikace je ovládána tlačítky start a stop. Chod a tempo aplikace určuje vnitřní smyčka while (obr. 5). Cyklus aplikace, během kterého se změní požadovaný počet period všech napětí a proudů, ze kterých se následně počítají výkony, závisí především na délce trvání sběru dat. Opakování je nastaveno na 2 sekundy, ale může se podle potřeby měnit v závislosti na připojené měřicí kartě. Měřená data jsou uspořádána do polí fázových napětí a proudů datového dypu Waveform. Waveform proudu nulového vodiče je veden samostatně.

Fázová napětí a proudy ústí do subVI pro výpočet základní harmonické na základě FFT analýzy. V témže subVI jsou základní harmonické jednotlivých fází převedeny na fázory, kterých používá jiné subVI pro výpočet symetrických složek (obr. 6).



Obr. 6 SubVI pro rozklad nesouměrné soustavy na souměrné složky

Podle vztahů (4.7) je vypočtena sousledná, zpětná a nulová složka proudové a napěťové soustavy. Tyto hodnoty umožňují určit jednak výkony nesymetrie a jednak činitele nesouměrnosti a nevyváženosti proudové a napěťové soustavy dle (4.8) až (4.11).

Vstupem subVI pro výpočet pulsačního výkonu ze vztahů (5.31) a (5.32) jsou napěťové fázory (ze kterých využívá pouze fázi U) a fázor zpětné složky I_b proudové soustavy. Skrytý výkon je vypočten podobně ze vztahů (5.35) a (5.36) přivedením fázoru U_U a nulové složky I_0 do příslušného sub VI. Ze sousledné složky proudové I_a a napěťové U_a je vypočten symetrický zdánlivý výkon S_{a1} (5.19) a na základě jejich vzájemného fázového posunu také trojfázový činný výkon P_{a1} (5.21) a jalový Q_{a1} (5.22).

Z průběhu fázových napětí a proudů a dále fázorů jejich základních harmonických a hodnoty proudu nulového vodiče počítá subVI Obecná 3F soustava tyto tzv. efektivní veličiny:

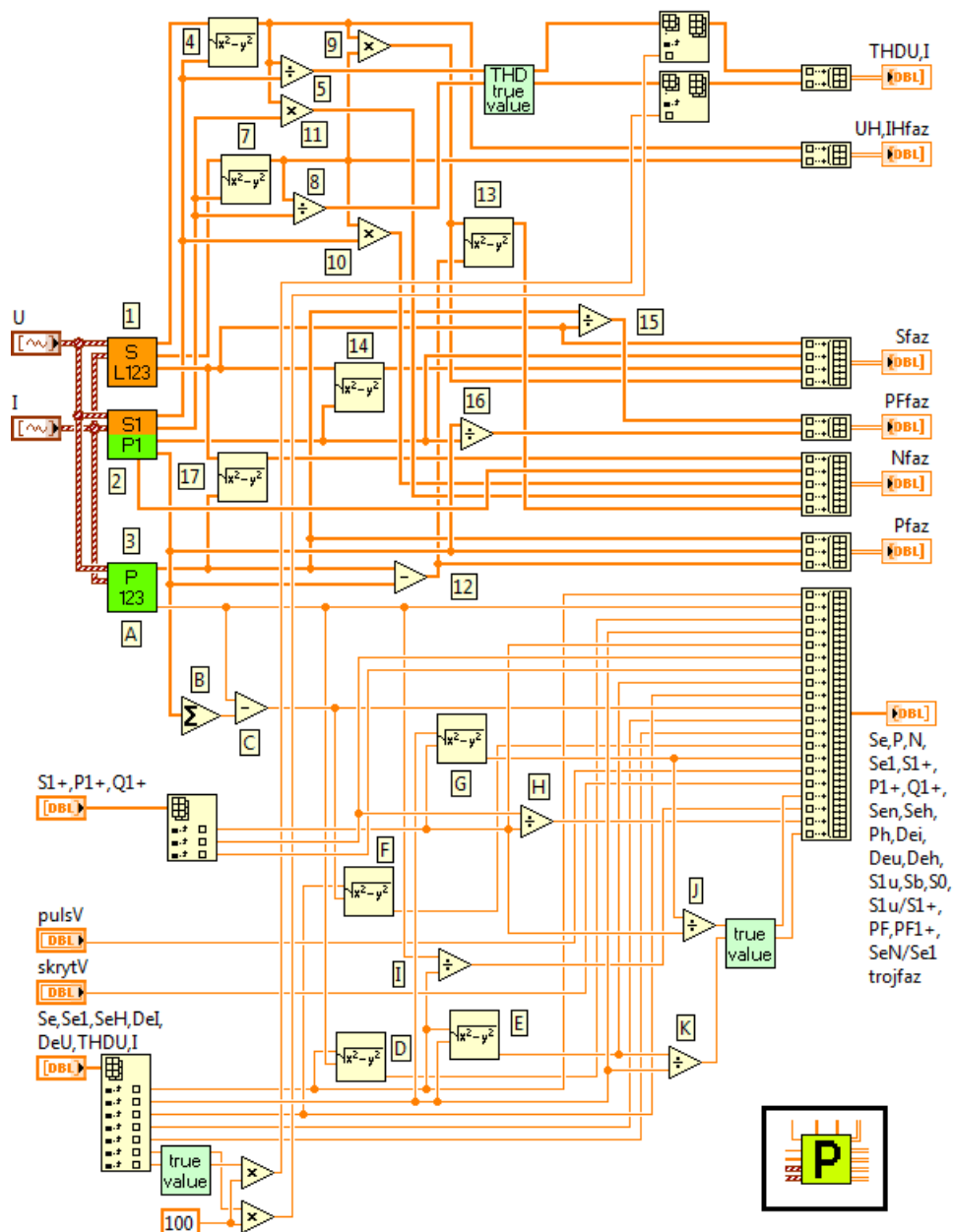
- efektivní proud I_e (5.3)
- efektivní proud základní harmonické I_{e1} (5.4)
- efektivní proud I_{eH} mimo základní harmonickou (5.5)
- efektivní napětí U_e (5.7)
- efektivní napětí základní harmonické U_{e1} (5.8)
- efektivní napětí mimo základní harmonickou U_{eH} (5.9)

a z nich pak počítá tyto trojfázové výkony:

- efektivní výkon S_e (5.12)
- zdánlivý efektivní výkon S_{e1} na základní harmonické (5.16)
- zdánlivý efektivní výkon S_{eH} mimo základní harmonickou (5.18)
- proudový deformační výkon D_{eI} (5.24)
- napěťový deformační výkon D_{eU} (5.26)

Totéž sub VI počítá ještě činitele celkového harmonického zkreslení napětí THD_U (5.10) a proudu THD_I (5.11) celé deformované soustavy.

Na základě výsledků subVI Obecna 3F soustava lze již vypočítat všechny ostatní výše definované trojfázové výkony normy IEEE 1459-2010. O to se stará (spodní) polovina kódu subVI Vykony obecné 3F soustavy (obr. 7). Druhá polovina kódu (horní) počítá výkony fází U, V, W na základě polí dat typu Waveform s průběhy fázových napětí a proudů. Rozdělení subVI je na první pohled patrné z poměrně širších datových vodičů, kterými jsou v LabVIEW značena pole a které zde přenášejí fázové veličiny.



Obr. 7 SubVI pro výpočet výkonů obecné trojfázové soustavy s označením početních operací

Písmeny v tomto kódu (obr. 7) jsou označeny definice trojfázových výkonů a ukazatelů využití sítě:

- A) činný výkon P (úplný, tj. základní harmonická, harmonické a stejnosměrná složka) – (5.20)
- B) činný výkon P_1 (na základní harmonické) – (5.21)
- C) harmonický činný výkon P_H (harmonické shodného řádu včetně dc složky) – (5.21) a (5.22)
- D) neaktivní výkon N (úplný, tj. základní harmonická, harmonické a stejnosměrná složka) – (5.24)
- E) efektivní zdánlivý výkon S_{eN} (mimo základní harmonickou) – (5.17)
- F) deformační výkon D_{eH} (harmonické pouze vzájemně včetně stejnosměrné složky) – (5.27)
- G) výkon nesymetrie S_{u1} (základní harmonická) – (5.28)
- H) line utilization factor PF_{a1} (ukazatel účinnosti na základní harmonické) – (5.29)
- I) power factor PF (úplný ukazatel účinnosti) – (5.30)
- J) load unbalance factor S_{u1}/S_{a1} (ukazatel nesymetrie) – Tab. 2
- K) harmonic pollution factor S_{eN}/S_{e1} (ukazatel deformace) – Tab. 2

Číslicemi jsou v kódu na obr. 7 označeny definice fázových veličin, výkonů a ukazatelů:

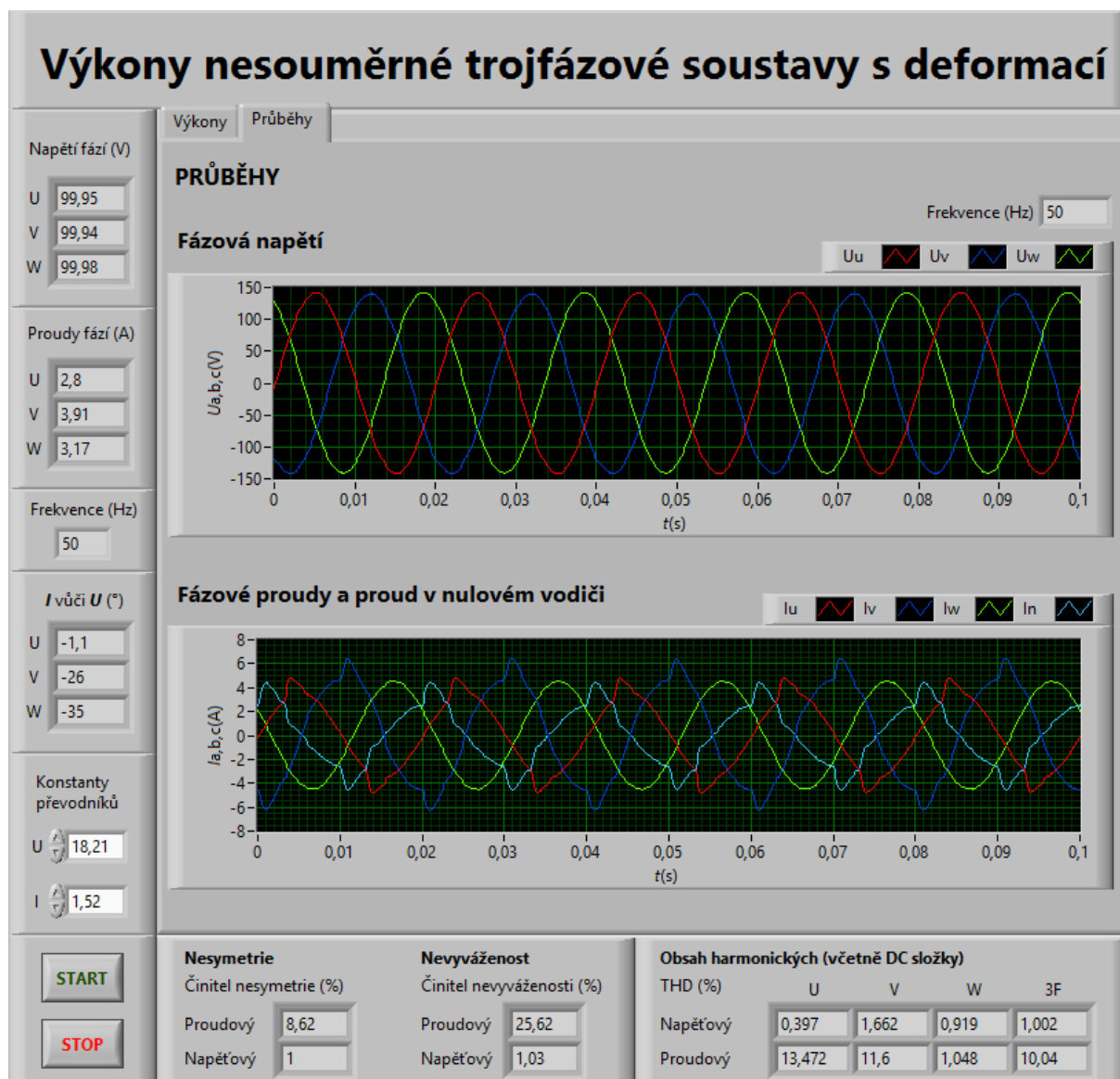
- 1) zdánlivý výkon S (úplný, tj. základní harmonická, harmonické a stejnosměrné složka) – (3.20)
- 2) zdánlivý S_1 , činný P_1 a jalový výkon Q_1 (na základní harmonické) – (3.22), (3.17) a (3.18)
- 3) činný výkon P (úplný, tj. základní harmonická, harmonické a stejnosměrná složka) – (3.14)
- 4) efektivní hodnota superpozice harmonických napětí U_H (včetně stejnosměrné složky) – (3.9)
- 5) celkové harmonické zkreslení napětí THD_U (včetně stejnosměrné složky) – (3.11)
- 6) celkové harmonické zkreslení $THD_{U\%}$ a $THD_{U\%}$ v procentech – (3.11), (3.12)
- 7) efektivní hodnota superpozice harmonických proudů I_H (včetně stejnosměrné složky) – (3.10)
- 8) celkové harmonické zkreslení proudu THD_I (včetně stejnosměrné složky) – (3.12)
- 9) zdánlivý výkon S_H (harmonické včetně stejnosměrné složky pouze mezi sebou) – (3.24)
- 10) proudový deformační výkon D_I (harmonické proudy reprezentované I_H vůči U_1) – (3.25)
- 11) napěťový deformační výkon D_U (harmonická napětí reprezentovaná U_H vůči I_1) – (3.26)
- 12) harmonický činný výkon P_H (harmonické shodného řádu včetně stejnosměrné složky) – (3.17)
- 13) harmonický deformační výkon D_H (harmonické vzájemně včetně stejnosměrné složky) – (3.27)
- 14) zdánlivý výkon S_N (mimo základní harmonickou) – (3.23)
- 15) účinník λ (úplný ukazatel účinnosti) – (3.31)
- 16) účinník (ukazatel účinnosti na základní harmonické) – (3.30)
- 17) neaktivní výkon N (úplný, tj. základní harmonická, harmonické a stejnosměrná složka) – (3.29)

7 Měření

Měření bylo provedeno na čtyřvodičové trojfázové soustavě zatížené v této konfiguraci:

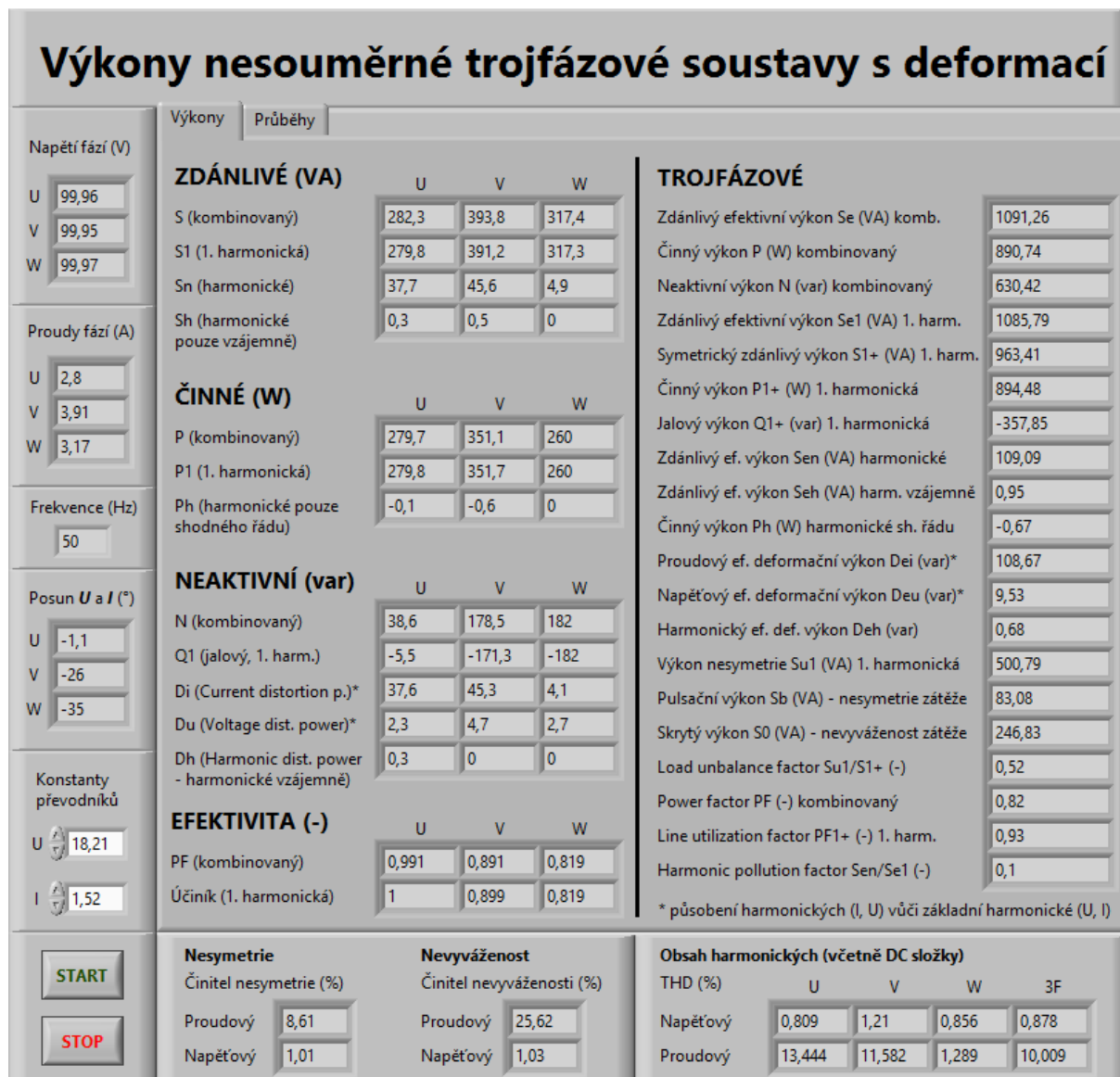
- Fáze U: činný odpor a nelineární odběr (tři počítačové monitory)
- Fáze V: kapacitní zátěž RC a nelineární odběr (počítač)
- Fáze W: kapacitní zátěž RC

Zdrojem napětí byl kvalitní a přesný laboratorní zdroj, který soustavu napájel symetricky napětím 100V, Na obr. 8 lze vidět průběhy deformovaných proudů a sinusová, souměrná napětí zdroje.



Obr. 8 Měření ve vytvořené aplikaci – zobrazení panelu s průběhy měřených napětí a proudů

Na obr. 9 lze již vidět výsledky měření. Na hodnotách jednotlivých výkonů se odráží vliv nesouměrné zátěže, která způsobila odběr za doprovodu jalového výkonu fází V, W. Záporná hodnota jalového výkonu znamená kapacitní charakter zátěže.



Obr. 9 Měření výkonů ve vytvořené aplikaci

Z deformačních výkonů vychází vlivem značného nesinusového odběru jednoznačně největší proudový deformační výkon D_I (109 var). Tvoří největší podíl na zdánlivém výkonu S_{eN} mimo základní harmonickou, který lze geometricky rozložit na proudový a napětový deformační výkon a dále harmonický zdánlivý výkon, takže platí:

$$S_{eN} = \sqrt{D_{eI}^2 + D_{eU}^2 + S_{eH}^2}$$

Po dosazení výsledků:

$$S_{eN} = \sqrt{108,67^2 + 9,53^2 + 0,95^2} = 109,09 \text{ VA}$$

[1]

Zdánlivý výkon S_{eN} je mírou elektrické energie, odebírané v důsledku nesinusových podmínek. Pro S_{eH} dále platí:

$$S_{eH} = \sqrt{D_{eH}^2 + P_{eH}^2}$$

[1]

Z toho vyplývá, že jedinou užitečnou prací, která může na základě přítomnosti harmonických složek vznikat, je spojena s činným výkonem P_H .

Výsledek harmonického činného výkonu $P_H = -0,67 \text{ W} < 0$ však není početní chybou, ale jde o zpětný vliv dominantního nelineárního spotřebiče, který tento výkon vytváří a dodává do sítě. Celkový činný výkon je tedy menší než výkon přenášený ke spotřebiči na základní harmonické.

To znamená, že ani tento činný výkon se nepodílí vždy na přenosu užitečné energie ke spotřebiči. Naopak často činný výkon snižuje.

Na základě měření je tím také ověřena typická bilance harmonických výkonů v nesinusovém obvodu:

$$D_I > D_U > S_H > P_H$$

[1]

To dokazuje jednoznačnou ztrátovost provozu elektrických zařízení při deformaci odvodových veličin.

Deformaci lze pro jednotlivé fáze, ale i v rámci soustavy, vyhodnocovat činitelem THD . Pro proud ve fázi U vyšel 13 %. Přestože byla třetí fáze prakticky sinusová, pro celou proudovou soustavu vychází $THD_I=10\%$. Naopak celkový činitel harmonického zkreslení napětí THD_U vyšel příznivě (vzhledem k tomu, že THD uvažuje oproti tradičním definicím také stenosměrnou složku) a nepřekročil 1%, takže i napěťový deformační výkon pak vyšel pouhých 10 var.

Z fázového posunu napětí a proudů uvedených na panelu vlevo je zřejmé, že nesymetrie soustavy je značná. Činitel proudové nesymetrie je 8,6 % a činitel proudové nevyváženosti 25,6%. Oba tyto činitele jsou pro napětí jednoprocenní.

Pulsační S_b a skrytý výkon S_0 , které reflektují poruše zátřátu nesymetrie zátěže vychází:

$$S_b = 83 \text{ VA}$$

$$S_0 = 247 \text{ VA}$$

Výkon obecné nesymetrie S_{u1} takto provozované soustavy je roven 500 VA. Jak bylo uvedeno, efektivní zdánlivý výkon je roven součtu fázových výkonů S pouze v ideálním případě symetrického provozu trojfázové soustavy, jinak zohledňuje ztráty nesymetrie a platí:

$$S_e > S_U + S_V + S_W$$

Po dosažení výsledků měření to lze dokázat:

$$1091 \text{ VA} > 282,3 \text{ VA} + 293,8 \text{ VA} + 317,4 \text{ VA}$$

$$1091 \text{ VA} > 894 \text{ VA}$$

Závěrem lze pro odebíraný zdánlivý efektivní výkon uvést a vytvořit mezi jednotlivými výsledky vztah:

$$S_e = \sqrt{P + Q_{a1}^2 + D_{eI}^2 + D_{eU}^2 + D_{eH}^2 + S_{u1}^2} = \sqrt{P + N}$$

Neaktivní výkon N tedy kombinuje celkové ztráty trojfázové soustavy:

$$N = \sqrt{Q_{a1}^2 + D_{eI}^2 + D_{eU}^2 + D_{eH}^2 + S_{u1}^2}$$

a jeho hodnota rovněž není součtem jednotlivých neaktivních výkonů fází, ale vždy větší.

8 Závěr

Výsledkem této práce je měřicí aplikace pro určení deformačního, pulsačního a skrytého výkonu v trojfázové nesymetrické soustavě s deformací obvodových veličin. Kromě deformačního, pulsačního a skrytého výkonu dokáže vytvořená aplikace měřit další důležité výkony a ukazatele. Ty umožňují vyčíslit ztráty odděleně na základní harmonické od harmonických a rovněž ztráty vlivem jejich vzájemného působení. Znalost těchto ztrát umožňuje kompetentní posouzení podmínek a okolností, za kterých na síti a obecně v trojfázových soustavách dochází k nežádoucím stavům. Rovněž je vyjádřena hodnota výkonu obecné nesymetrie, který působí v důsledku nesouměrnosti soustav proudové i napěťové.

Definované výkony v této práci byly implementovány do kódu měřicí aplikace. Všechny základní měřené výkony a ukazatele byly ověřeny shodou s výkonovým analyzátozem. Ostatní výsledky, které byly vyjádřeny na základě použité normy, s nimi také korespondují.

Měřením bylo dále dokázáno, že hodnota zdánlivého výkonu soustavy je vždy větší než součet jednotlivých fázových výkonů. To znamená, že trojfázové výkony jsou doprovázeny přídatnými ztrátami, a je nutné je uvažovat nejen v kontextu nesinusového odběru a požadavku na jalový výkon, ale i z hlediska symetrie napájení a především odběru.

Proto je nutné zavádět objektivní systém pro hodnocení kvality odběru elektrické energie a provozu zařízení připojovaných k síti.

Literatura

- [1] IEEE std. 1459-2010. IEEE Standard Definitions for the Measurement of Electric Power Quantities Under Sinusoidal, Nonsinusoidal, Balanced, or Unbalanced Conditions. New York: The Institute of Electrical and Electronics Engineers, Inc., 2010. ISBN 978-0-7381-6058-0 STD95967. 40 s.
- [2] DRECHSLER, Richard. Měření, hodnocení a kvalita odběru elektrické energie v provozu tyristorových zařízení. Praha: SNTL - Nakladatelství technické literatury, 1982. 134 s.
- [3] KŮS, Václav, SKÁLA Jiří, HAMMERBAUER Jiří. Elektromagnetická kompatibilita výkonových elektronických systémů. Praha: BEN – technická literatura, 2013. 374 s.
- [4] CHLEBIŠ, Petr. Zpětné vlivy polovodičových měničů na napájecí síť – studijní text. Ostrava: VŠB, 2007. 15 s.
- [5] RUSEK, Stanislav. Teoretická elektroenergetika. Ostrava, 2007. 75 s.
- [6] TOMAN Petr, DRÁPELA Jiří, MIŠÁK Stanislav, ORSÁGOVÁ Jaroslava, PAAR Martin, TOPOLÁNEK David a kol. Provoz distribučních soustav. Praha: ČVUT, 2011. 264 s.
- [7] SEDLÁČEK, Jiří, VALSA, Juraj. Elektrotechnika II. Brno, VUT. 186 s.