

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI

FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ

Katedra elektroenergetiky a ekologie

DIPLOMOVÁ PRÁCE

**Diagnostika měřicích systémů nepřímého fakturačního
měření**

Vedoucí práce:

Ing. Jana Jiříčková, Ph.D.

2016

Autor:

Bc. Pavel Polívka

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI
Fakulta elektrotechnická
Akademický rok: 2015/2016

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE
(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Bc. Pavel POLÍVKA**
Osobní číslo: **E14N0025K**
Studijní program: **N2644 Aplikovaná elektrotechnika**
Studijní obor: **Aplikovaná elektrotechnika**
Název tématu: **Diagnostika měřicích systémů nepřímého fakturačního měření**
Zadávající katedra: **Katedra elektroenergetiky a ekologie**

Z á s a d y p r o v y p r a c o v á n í :

1. Popište měřicí systémy nepřímého fakturačního měření.
2. Zpracujte diagnostické možnosti statických elektroměrů pro fakturační měření.
3. Optimalizujte diagnostiku měřicích systémů nepřímého fakturačního měření pro napěťové hladiny nn, vn (vvn).

Rozsah grafických prací: podle doporučení vedoucího

Rozsah kvalifikační práce: 40 - 60 stran

Forma zpracování diplomové práce: tištěná/elektronická

Seznam odborné literatury:

Student si vhodnou literaturu vyhledá v dostupných pramenech podle doporučení vedoucího práce.

Vedoucí diplomové práce: **Ing. Jana Jiříčková, Ph.D.**
Katedra elektroenergetiky a ekologie

Datum zadání diplomové práce: **15. října 2015**

Termín odevzdání diplomové práce: **16. května 2016**



Doc. Ing. Jirí Hammerbauer, Ph.D.
děkan



Doc. Ing. Karel Noháč, Ph.D.
vedoucí katedry

V Plzni dne 15. října 2015

Anotace

Diplomová práce je zaměřena na diagnostiku měřicího obvodu systémů nepřímého fakturačního měření elektrické energie. Uvádí přehled, specifikaci a základní principy měřicích systémů instalovaných v distribučních soustavách nn, vn, vvn. Popisuje možnosti diagnostických funkcí statických elektroměrů. Hlavní část se věnuje diagnostickému procesu a jeho optimalizaci. Na základě výpočtu a analýzy poruchových stavů definuje parametry pro vyhodnocení plošné i lokální on-line diagnostiky.

Klíčová slova

Měřicí systém, statický elektroměr, polopřímé měření, nepřímé měření, diagnostika nepřímých měřicích systémů, vektorový diagram.

Abstract

The thesis is focused on the diagnostics of measurement systems of indirect billing electricity metering. Features an overview, specifications and basic principles of measuring systems installed in distribution systems for low, high and very high voltage. It describes possibilities diagnostic functions of static electricity meters. The main part is devoted to the diagnostic process and its optimization. Based on the calculation and analysis of fault conditions defines the parameters for evaluating the surface and local on-line diagnostics.

Key words

Measuring system, static meter, instrument transformer, transformer measuring, diagnostic of transformers metering systems, vector diagrams.

Prohlášení

Předkládám tímto k posouzení a obhajobě diplomovou práci, zpracovanou na závěr studia na Fakultě elektrotechnické Západočeské univerzity v Plzni.

Prohlašuji, že jsem tuto diplomovou práci vypracoval samostatně, s použitím odborné literatury a parametrů uvedených v seznamu, který je součástí této diplomové práce.

Dále prohlašuji, že veškerý software, použitý při řešení této diplomové práce, je legální.

.....

podpis

Poděkování

Tímto bych rád poděkoval vedoucímu práce Ing. Janě Jiříčkové Ph.D. za cenné profesionální rady, připomínky a metodické vedení práce.

Obsah

1	Úvod.....	9
2	Měřicí systémy nepřímého fakturačního měření	11
2.1	Třísystémové - čtyřvodičově připojené nepřímé měřicí systémy nn a vvn	15
2.2	Provedení polopřímých měřicích systémů v soustavě nn	17
2.3	Provedení nepřímých měřicích systémů v soustavě vvn	20
2.4	Dvousystémové - trojvodičově připojené nepřímé měřicí systémy vn	22
2.5	Provedení nepřímých měřicích systémů v soustavě vn	24
3	Využití statických elektroměrů pro online diagnostiku	27
3.1	Diagnostické veličiny měřené statickým elektroměrem.....	30
3.2	Monitorovací a kontrolní funkce statického elektroměru.....	34
3.3	Komunikační rozhraní pro zobrazení a odečet diagnostických dat	36
4	Optimalizace diagnostiky nepřímého měřicího systému fakturačního měření	38
4.1	Diagnostický proces	40
4.2	Referenční parametry pro diagnostiku napěťového obvodu měřicího systému.....	44
4.3	Referenční parametry pro diagnostiku proudového obvodu měřicího systému	50
4.4	Matematický model pro analýzu chybného zapojení měřicích obvodů.....	51
4.5	Diagnostika metodou porovnáním naměřené energie.....	56
4.6	Diagnostika zapojení měřicího obvodu metodou analýzy vektorového diagramu ...	60
4.7	Základní kontrola obvodu měřicího systému.....	62
5	Závěr	63
6	Použitá literatura	65
7	Přílohy	66

Seznam symbolů a zkratk

A	[kW/h]	činná elektrická energie
AMS		autorizované metrologické středisko
I	[A]	efektivní hodnota proudu
I	[A]	fázor proudu
i	[A]	okamžitá hodnota proudu
L1, L2, L3		označení fáze trojfázové soustavy
LP		zátěžový profil
MT		měřicí transformátor
MTP		měřicí transformátor proudu
MTN		měřicí transformátor napětí
nn		nízké napětí
N		převod, transformační poměr
OPM		odběrné předací místo
P	[kW]	činný výkon
Q	[kVA]	jalový výkon
R	[kVAr]	jalová elektrická energie
U	[V]	efektivní hodnota napětí
U	[V]	fázor napětí
u	[V]	okamžitá hodnota napětí
vn		vysoké napětí
vvn		velmi vysoké napětí
φ	[°]	úhel fázového posuvu

1 Úvod

Úkolem fakturačních měření zřizovaných v distribuční soustavě je odpovídajícím způsobem a v požadované kvalitě získávat naměřená data o množství odebírané nebo dodávané elektrické energii. V případě průběhových typů měření je měřen a vyhodnocován i dodávaný, nebo odebíraný činný a jalový výkon ve formě zátěžového profilu. Výstupem fakturačního měření jsou naměřená data poskytovaná oprávněným účastníkům trhu s elektřinou pro standardní způsob vyúčtování.

Základní částí fakturačního systému je měřicí systém umístěný v odběrném místě koncového odběratele nebo předacím místě výrobce elektrické energie. Měřicí systém je instalován v měřicím místě co nejbližší k místu rozdělení přípojky od distribuční soustavy. Základní rozdělení vychází ze způsobu připojení měřicího systému k měřené soustavě.

U odběrných nebo předacích míst (OPM) připojených k distribuční soustavě (DS) nn s rezervovaným příkonem do 80A [1] jsou instalovány přímé měřicí systémy. Přímé měřicí systémy obsahující pouze elektroměr, jehož vstupní parametry jmenovitého napětí a proudu umožňují, aby byl připojen přímo k měřené síti a mohl jím procházet veškerý měřený proud.

Pro měření OPM připojených k DS nízkého napětí s rezervovaným příkonem nad 80A a OPM připojených k DS s napěťovou hladinou vysokého a velmi vysokého napětí [1], kde napěťové a proudové parametry měřené soustavy již neumožňují přímé připojení měřicího systému, jsou určeny nepřímé měřicí systémy. Tyto nepřímé měřicí systémy jsou připojeny k měřené soustavě prostřednictvím měřicích transformátorů, které snižují velikost proudu a napětí na stanovené hodnoty umožňující bezpečné připojení elektroměru.

Současný liberalizovaný trh s elektřinou klade provozovatelům distribučních sítí vysoké požadavky na zajištění spolehlivosti fakturačního měření. To znamená provozovat měřicí systémy s minimálním výskytem poruch a odstávek, které ve svém důsledku snižují kvalitu předávaných fakturačních dat na OTE. Jedním z kroků přispívajících ke zvýšení spolehlivosti je i diagnostika nepřímého měřicího systému. Optimálně navrženou diagnostikou dokážeme včasné identifikovat poruchu případně neoprávněný zásah do měřicího systému a tím minimalizovat dobu do odstranění chybného měření. Takto navržený diagnostický postup by

měl na svém začátku zajistit plošnou kontrolu měřicích systémů instalovaných v OPM na celém území daného provozovatele distribuční soustavy. A v konečném důsledku pak splňovat podmínku minimálního omezení nebo přerušování dodávky elektrické energie v OPM pro identifikaci a odstranění nalezené závady. Dalším faktem zdůrazňujícím požadavky na diagnostiku je ten, že nepřímé měřicí systémy jsou osazovány převážně na OPM s přenosem velkého množství elektrické energie, kde i malé nebo časově omezené ovlivnění přesnosti měřicího systému zapříčiní chybné zúčtování s významným finančním dopadem.

V úvodní části předkládané diplomové práce je uveden přehled, specifikace a základní principy měřicích systémů nepřímého fakturačního měření stanovené pro měření elektrické energie v OPM připojených k distribuční soustavě nízkého, vysokého a velmi vysokého napětí. V následující kapitole je uveden popis diagnostických a monitorovacích funkcí statických elektroměrů. Využití uvedených diagnostických funkcí ve spojení s technologií dálkového odečtu rozšiřuje možnosti pro uplatnění plošné on-line diagnostiky.

Hlavní část práce je věnována optimalizaci diagnostiky nepřímých měřicích systémů fakturačního měření. Základní diagnostický proces je rozšířen o on-line diagnostiku umožňující plošnou detekci poruch. Na základě analýzy poruch napěťového a proudového měřicího obvodu jsou stanoveny algoritmy a referenční hodnoty pro optimální vyhodnocení závad. Pro analýzu proudového obvodu je v práci navržen jednoduchý výpočtový model umožňující simulovat chybné zapojení proudového obvodu měřicího systému.

Pro ucelení problematiky jsou v závěru práce popsány diagnostické metody, které lze s využitím matematického modelu částečně uplatnit i pro diagnostiku vn a vvn měřicích systémů.

Praktické uplatnění těchto optimalizačních prostředků vede ve většině případů k včasnému nalezení závady s minimálním omezením dodávky elektrické energie do měřeného OPM a tím i ke zkrácení doby provozování chybného měřicího systému.

2 Měřicí systémy nepřímého fakturačního měření

Povinnost zřizovat a provozovat fakturační měření ukládá provozovatelům přenosové a distribuční soustavy Energetický zákon č.458/2000 Sb. Specifické podmínky pro volbu měřicího systému, způsobu provedení a typu měření jsou upraveny vyhláškou MPO č.82/2011Sb [2][1]. Požadavky vyplývající z této základní legislativy jsou zohledněny provozovateli distribučních a přenosových soustav při stanovení Pravidel provozování přenosové a distribuční soustavy. Tímto dokumentem, schváleným Energetickým regulačním úřadem, jsou v dané distribuční síti zadány podmínky pro připojení OPM včetně způsobu provedení měření elektrické energie. Konkrétní požadavky na umístění a technické provedení měřicích systémů pro jednotlivé napěťové hladiny jsou souhrnně specifikovány v připojovacích podmínkách vydaných jednotlivými provozovateli příslušných distribučních nebo přenosových soustav [3][4].

Měřicí systémy nepřímého fakturačního měření se zřizují především na odběrných a předacích místech konečných zákazníků kategorie A, B a C, kde elektrické parametry měřené soustavy neumožňují z technického i bezpečnostního hlediska použití přímé měřicí soupravy [1]. Výjimkou může být instalace nepřímého měřicího systému v soustavách nn s proudy pod 80A, kdy je potřeba s ohledem na servisní a diagnostickou činnost zajistit zvýšené nároky na zabezpečení plynulosti dodávky elektrické energie, což je bezesporu velkou výhodou všech nepřímých měřicích systémů.

Základním charakteristickým znakem nepřímých měřicích systémů je připojení elektroměru k měřené soustavě prostřednictvím měřicích převodníků - měřicích transformátorů (MT)[5]. Pro stanovení skutečného množství odebrané nebo dodané elektrické energie a výkonu měřené soustavy je proto potřeba naměřené hodnoty násobit příslušnou konstantou N , která je dána převodem měřicích převodníků [5].

- Pro měřicí transformátor proudu (MTP):

$$N_I = \frac{I_{np}}{I_{ns}} \quad (2.1)$$

Kde I_{np} jmenovitý primární proud MTP,
 I_{ns} jmenovitý sekundární proud MTP.

- Pro měřicí transformátor napětí (MTN):

$$N_U = \frac{U_{np}}{U_{ns}} \quad (2.2)$$

Kde U_{np} jmenovité primární napětí MTN,
 U_{ns} jmenovité sekundární napětí MTN.

V měřících systémech, kde je použito obou typů MT je celková konstanta dána vztahem:

$$N = N_I \cdot N_U = \frac{I_{np}}{I_{ns}} \cdot \frac{U_{np}}{U_{ns}} \quad (2.3)$$

Elektroměry instalované v nepřímých měřících systémech fakturačního měření musí svojí funkcí podporovat průběhové měření Typu A nebo B [5][1]. To znamená zaznamenávat střední hodnotu činného výkonu v kW, jalového induktivního výkonu a jalového kapacitního výkonu v kvar ve formě zátěžového profilu (LP) s 15-ti minutovým měřicím intervalem. Z tohoto důvodu jsou v současnosti výhradně používány statické (elektronické) více kvadrantové elektroměry[5].

Nepřímé měřicí systémy osazené tímto typem elektroměrů jsou ve své podstatě shodné pro měření odebrané i dodané elektrické energie. Měřený činný a jalový výkon a tomu odpovídající elektrická energie jsou vyhodnocovány samostatně v každé měřené fázi podle fázového úhlu φ mezi napětím a proudem [5].

Kladným znaménkem je označován činný elektrický výkon $+P$ a energie $+A$ s nulovým úhlem fázového posuvu. Kladné znaménko představuje tok činné elektrické energie z distribuční nebo přenosové soustavy do příslušného OPM (spotřebovaná elektrická energie) [1][5].

Záporným znaménkem je označován činný elektrický výkon $-P$ a energie $-A$ s úhlem fázového posuvu $\varphi = 180^\circ$. Přesné dodržení tohoto úhlu odpovídá směru toku činné

energie z příslušného OPM směrem do distribuční nebo přenosové soustavy (dodaná elektrická energie) [1][5].

Kladný jalový výkon $+Q$ a energie $+R$ dodávané do příslušného OPM odpovídá úhlu fázového posuvu v rozmezí od 0° do 180° . Odebíraný jalový výkon $-Q$ a energie $-R$ pak odpovídá úhlu fázového posuvu 180° až 360° [1][5].

Algoritmus vyhodnocení výsledného množství elektrické energie v daném směru stanovuje vyhláška [1]:

- Pro předpokládanou symetricky zatíženou trojfázovou soustavu je výsledná dodaná nebo odebraná činná elektrická energie A dána prostým součtem – saldem [1][5]:

$$A = (|+A_{L1}| + |+A_{L2}| + |+A_{L3}|) - (|-A_{L1}| + |-A_{L2}| + |-A_{L3}|) \quad (2.4)$$

- Pro nesymetricky zatíženou síť je požadováno vyhodnocení činné elektrické energie, samostatně v jednotlivých fázích, pro oba směry oddělenými součty [1][5]:

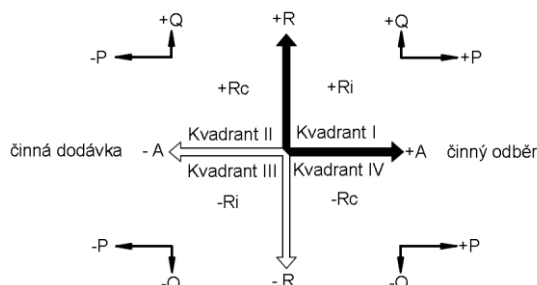
$$+A = |+A_{L1}| + |+A_{L2}| + |+A_{L3}| \quad (2.5)$$

$$-A = |-A_{L1}| + |-A_{L2}| + |-A_{L3}| \quad (2.6)$$

- Jalová energie je pro symetricky i nesymetricky zatíženou síť dána saldem součtu jalové energie každé fáze [1][5]:

$$R = |\pm R_{L1}| + |\pm R_{L2}| + |\pm R_{L3}| \quad (2.7)$$

Přiřazení vyhodnoceného výkonu a elektrické energie do příslušných kvadrantů je názorně zobrazeno na *Obr. 1*.



Obr. 1 Rozdělení kvadrantů vyhodnoceného výkonu a elektrické energie.

Zákon o metrologii č. 505/190 Sb. definuje elektroměry a měřicí transformátory určené pro měřicí systémy fakturační měření jako stanovená měřidla. Toto legislativní ustanovení omezuje použití elektroměrů a MT pro měřicí systémy pouze na přístroje schváleného typu ověřené autorizovaným metrologickým střediskem (AMS)[6]. Legislativou stanovené maximální lhůty pro opakované úřední ověření elektroměrů zajišťuje jejich vlastník, tedy provozovatel distribuční soustavy. Na rozdíl od požadavku na úřední ověření MT, které je dokládáno pouze při prvotní instalaci MT do měřícího systému a je platné po celou dobu životnosti přístroje [1][3][4][6]. Uvedené legislativní opatření zajišťuje splnění požadavku přesnosti pro fakturační měření, která však může být ovlivněna nejen změnou parametrů těchto přístrojů ale i poruchou nebo neoprávněnou manipulací s měřícím obvodem. V těchto případech je pak nutné provádění diagnostiky i mimo rozsah požadovaného úředního ověření a to v ideálním případě plošnou on-line diagnostikou. (Diagnostika nenahrazuje úřední ověření stanovených měřidel, ale pouze ověřuje jejich správné zapojení a bezporuchový provoz).

Pro účely diagnostiky nepřímých měřících systémů je rozhodující znalost principu měření výkonu v trojfázové soustavě, schéma zapojení a konstrukční provedení měřícího systému v jednotlivých napěťových hladinách.

Podle provedení a principu měření výkonu můžeme nepřímé měřicí systémy rozdělit například do následujících skupin:

Podle napěťové hladiny měřené třífázové soustavy, ve které je měřicí systém připojen:

- pro nízké napětí, kde proudové obvody jsou připojené přes MTP, napěťové obvody jsou připojené přímo k měřené soustavě (polopřímé měřicí systémy),
- pro vysoké a velmi vysoké napětí, kde proudové i napěťové obvody jsou připojeny přes MT (nepřímé měřicí systémy).

Podle principu měření výkonu (počtu wattmetrů) a způsobu připojení k měřené soustavě:

- třísystémové, pro připojení k čtyřvodičové soustavě s vyvedeným středním vodičem,
- dvousystémové, pro připojení k třívodičové soustavě bez vyvedeného středního vodiče (Aronovo zapojení).

Podle způsobu umístění vzhledem k silovému transformátoru (v případě, že není součástí distribuční soustavy):

- měřicí systémy primárního měření jsou instalovány na straně vyššího napětí silového transformátoru,
- měřicí systémy sekundárního měření jsou instalovány na straně nižšího napětí silového transformátoru.

2.1 Třísystémové - čtyřvodičově připojené nepřímé měřicí systémy nn a vvn

V trojfázové čtyřvodičově uspořádané soustavě nn a vvn s vyvedeným středním vodičem je výkon měřen pro každou fázi samostatně. Tedy s použitím tří wattmetrů - tří samostatných měřicích systémů [5]. Napěťové vstupy wattmetrů W_1 , W_2 a W_3 jsou paralelně připojené na fázová napětí. Proudové vstupy wattmetrů jsou vřazeny sériovým připojením do obvodu dané fáze. Celkový naměřený výkon je pak dán součtem naměřených výkonů každého z wattmetrů [5][7].

$$P = P_{W_1} + P_{W_2} + P_{W_3} \quad (2.1.1)$$

$$Q = Q_{W_1} + Q_{W_2} + Q_{W_3} \quad (2.1.2)$$

Kde P_W činný výkon naměřený wattmetrem v označené fázi,
 Q_W jalový výkon naměřený wattmetrem v označené fázi.

Činný výkon střídavého harmonického proudu jedné fáze je dán součinem efektivní hodnoty fázového napětí U_L s činnou složkou efektivní hodnoty fázového proudu $I_L \cdot \cos(\varphi)$. Celkový činný výkon P měřené trojfázové soustavy lze obecně vyjádřit vztahem [5][7][9]:

$$P = U_{L1} \cdot I_{L1} \cdot \cos(\varphi_1) + U_{L2} \cdot I_{L2} \cdot \cos(\varphi_2) + U_{L3} \cdot I_{L3} \cdot \cos(\varphi_3) \quad (2.1.3)$$

Kde P činný výkon trojfázové soustavy,
 $U_{L1,2,3}$ velikost fázového napětí mezi danou fází a středním vodičem,
 $I_{L1,2,3}$ velikost proudu dané fáze,
 $\varphi_{1,2,3}$ vzájemný fázový posun napětí a proudu dané fáze.

Pro jednotlivé fáze je úhel $\varphi_{1,2,3}$ určen rozdílem fázového posuvu napětí φ_U a fázového posuvu proudu φ_I [9]:

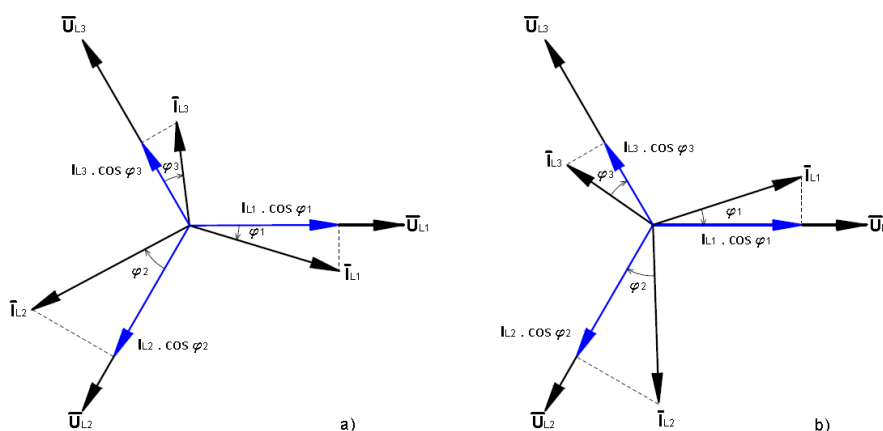
$$\varphi = \varphi_U - \varphi_I \tag{2.1.4}$$

Obdobným způsobem je definován i jalový výkon Q . V jedné fázi je dán součinem efektivní hodnoty fázového napětí U_L a jalové složky efektivní hodnoty fázového proudu $I_L \cdot \sin(\varphi)$ [5][7][9]:

$$Q = U_{L1} \cdot I_{L1} \cdot \sin(\varphi_1) + U_{L2} \cdot I_{L2} \cdot \sin(\varphi_2) + U_{L3} \cdot I_{L3} \cdot \sin(\varphi_3) \tag{2.1.5}$$

Kde Q jalový výkon trojfázové soustavy.

Rozložení vektorů napětí a proudu pro výpočet výkonu v trojfázové soustavě je možné zobrazit pomocí fázorového diagramu. Vzájemné časové rozložení vektorů napětí U_{L1}, U_{L2}, U_{L3} při dodržení sledu fází je 120° . Kladný nebo záporný fázový posun proudů I_{L1}, I_{L2}, I_{L3} je určen induktivním nebo kapacitním charakterem zatížení jednotlivých fází soustavy. Příklad uspořádání vektorů pro obě varianty zatížení zobrazuje fázorový diagram na Obr. 2.



Obr. 2 Příklad fázorových diagramů trojfázové soustavy s induktivním a) a kapacitním b) charakterem zatížení [5].

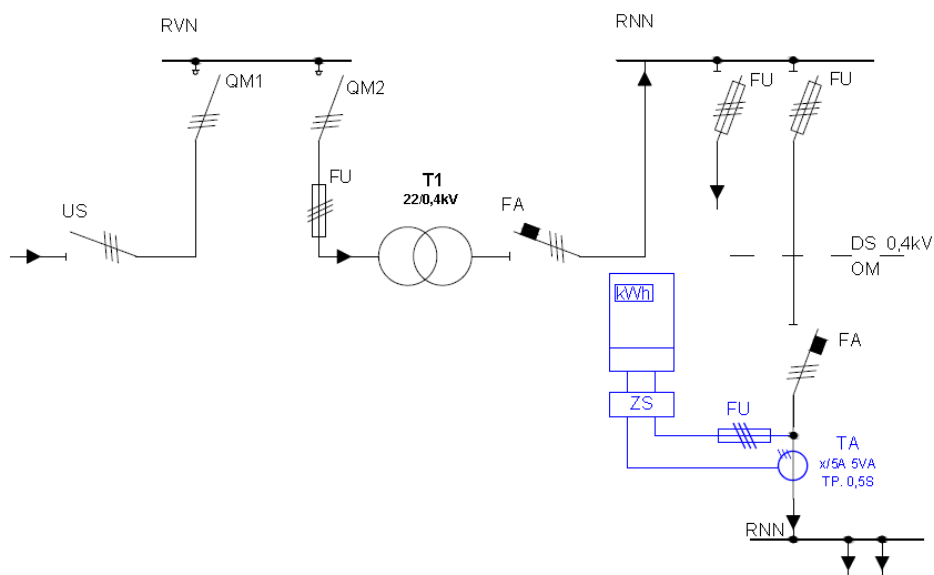
Princip popsané metody měření výkonu pomocí tří wattmetrů v trojfázové soustavě s vyvedeným středním vodičem umožňuje spolehlivě měřit činný a jalový výkon v symetrické i nesymetrické třífázové soustavě se souměrným i nesouměrným zatížením[5][9].

2.2 Provedení polopřímých měřicích systémů v soustavě nn

Pro třífázovou soustavu nízkého napětí v uspořádání TN-C případně TN-C-S, tedy čtyřvodičovým provedení s vyvedeným středním vodičem jsou určeny polopřímé měřicí systémy. Úroveň nízkého napětí (0,4kV) měřené soustavy umožňuje bezpečné přímé připojení napěťového měřicího obvodu k elektroměru. Proudové měřicí obvody jsou z důvodu předpokládaného měřeného proudu převyšujícího 80A k měřené soustavě připojeny prostřednictvím měřicího transformátoru proudu (MTP)[5].

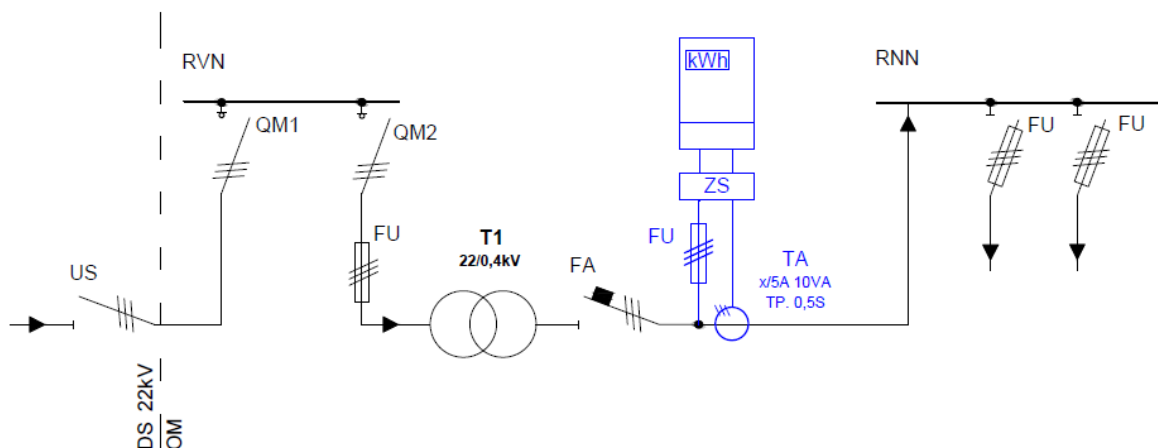
Polopřímé měřicí soupravy jsou používány pro OPM konečných zákazníků kategorie C a B (nebo předací místa malých zdrojů elektrické energie a předací místa mezi distribučními soustavami) připojených přímo k distribuční soustavě nízkého napětí nebo pro OPM připojených k distribuční soustavě vysokého napětí jako měřicí systém sekundárního měření.

V prvním uvedeném případě je silový transformátor součástí distribuční soustavy, jak je naznačeno na jednopólovém schématu zapojení uvedeném na *Obr. 3*. Měřicí systém měří odebranou nebo dodanou elektrickou energii bezprostředně v místě připojení OPM k distribuční soustavě.



Obr. 3 Příklad připojení měřicího systému v OM připojeném k soustavě nn [5].

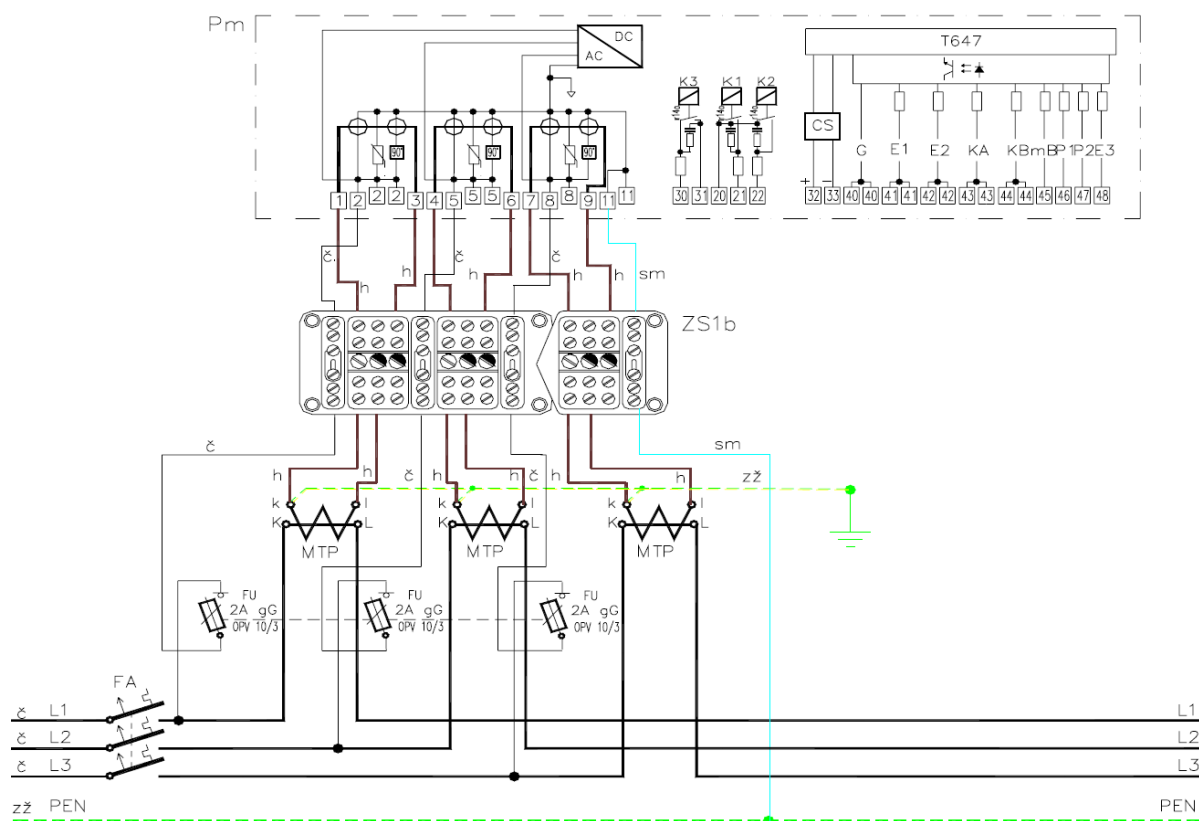
V druhém případě není silový transformátor součástí distribuční soustavy (vlastníkem je zákazník). Transformátor odděluje místo připojení OPM k distribuční soustavě od měřicího místa, které je umístěno na straně nižšího napětí silového transformátoru. Jednopolové schéma sekundárního měření je uvedeno na Obr. 4.



Obr. 4 Příklad připojení sekundárního měřicího systému v OM připojeném k soustavě vn [5].

Naměřený výkon a tím i množství elektrické energie tak ovlivní ztráty vzniklé v silovém transformátoru [1][3]. Z tohoto důvodu se za údaje z měření považují naměřené hodnoty činného výkonu a energie snížené nebo v případě dodávky zvýšené o hodnoty ztrát na silovém transformátoru ve stanovené výši 4%, nebo se stanoví výpočtem na základě skutečných ztrát prokázaných doložením parametrů transformátoru a naměřeném výkonu[10].

Výpočet ztrát a tím i úprava naměřených hodnot není přímou součástí sekundárního měřicího systému. Výpočet je proveden až na úrovni datové centrály při zpracování odečtených dat [5]. Z tohoto důvodu je konstrukce i schéma zapojení polopřímého měřicího systému Obr. 5 shodné pro oba způsoby použití.



Obr. 5 Schéma zapojení polopřímého měřicího systému (sekundární měření) se statickým elektroměrem v síti nn. Převzato z [4].

Měřicí systém je připojen k přípojnícím v hlavní rozvaděči nn, v co nejmenší možné vzdálenosti, za hlavním jističem OM [4].

Měřicí transformátory proudu jsou v sérii připojeny v každé fázi samostatně. Jejich primární jmenovité hodnoty převodu $x/5A$ jsou voleny tak, aby odpovídaly jmenovité proudové hodnotě hlavního jističe a byly ve všech fázích shodné [4][5]. Instalované MTP musí splňovat požadovanou třídu přesnosti $T_p 0,5S$ a jmenovitou zátěž 5 VA, případně 10VA [4] [5].

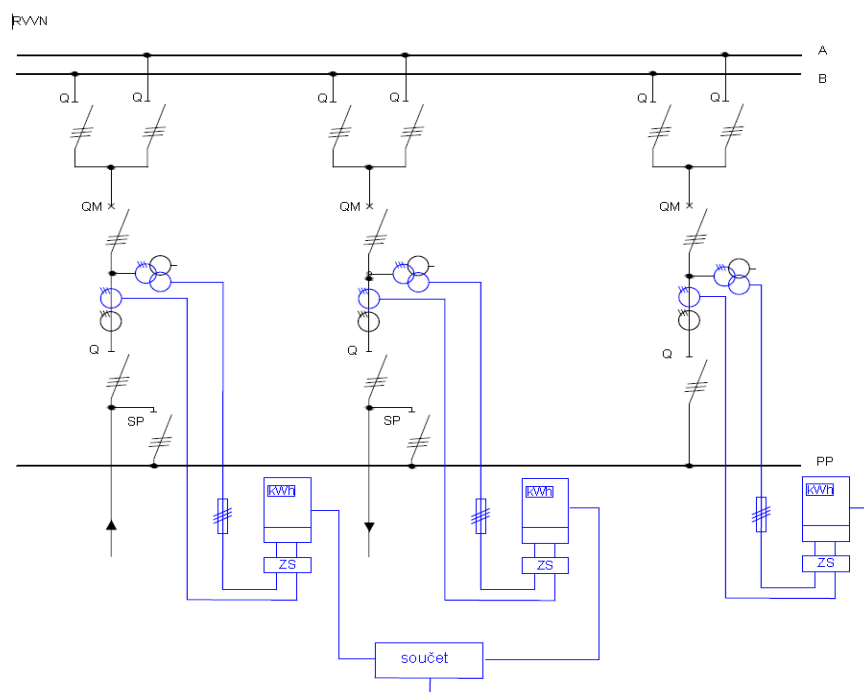
Napěťové měřicí obvody jsou přímo napojené na přípojnice jednotlivých fází v místě před připojením MTP. Doporučená hodnota jištění pro napěťový obvod měřicího systému je 2A [4]. Střední vodič je napojen z přípojnice PEN ve stejném poli nn rozvaděče.

Elektroměr a zkušební svorkovnice měřicího systému jsou umístěné v samostatné k tomuto účelu vyhrazené části nn rozvaděče nebo v samostatné skříni měření.

2.3 Provedení nepřímých měřicích systémů v soustavě vvn

Dalším příkladem použitím třísystémových-čtyřvodičově připojených měřicích systémů je v podobě nepřímého připojení (MTP, MTN) v sítích vvn. Třífázové distribuční sítě velmi vysokého napětí jsou obdobně jako v předchozím případě provozovány v trojvodičovém uspořádání s účinně uzemněným uzlem transformátoru obvykle bez vyvedeného středního vodiče[5]. Proto je možné, z důvodu vyšších nároků na přesnost, měření v napěťové hladině vvn realizovat jako třísystémové primární měření. Pokud je měřicí systém instalován jako sekundární jsou údaje z měření činného výkonu a energie snižené nebo v případě dodávky zvýšené o hodnoty ztrát na silovém transformátoru ve stanovené výši 2% nebo se stanoví výpočtem na základě skutečných ztrát prokázaných doložením parametrů transformátoru a naměřeném výkonu [10].

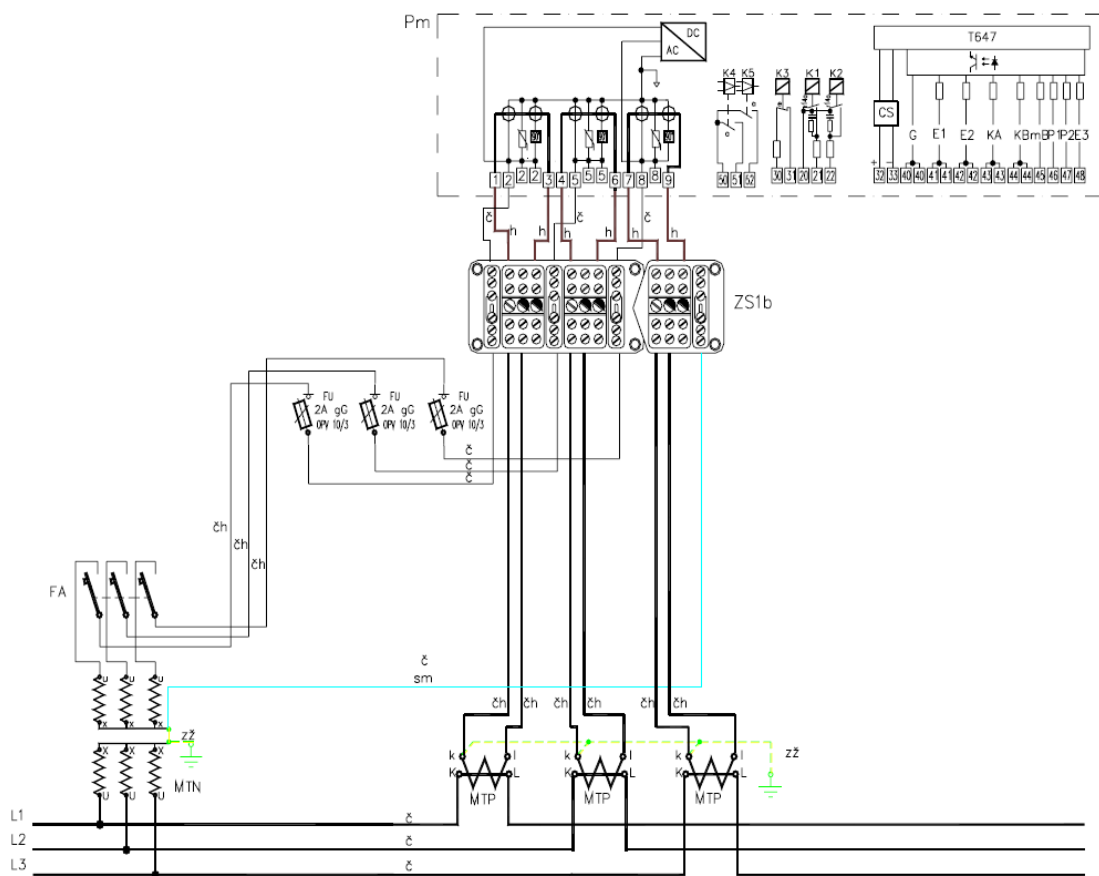
Měřicí systém se obvykle umísťuje do odběrného zařízení konečného zákazníka nebo do rozvodného zařízení výroby. Případně, jedná-li se o bilanční měření, je realizováno v rozvodně či spínací stanici daného provozovatele distribuční soustavy. Měřicí místo je umístěno v jednotlivých vývodech přípojnicového systému rozvodny vvn Obr.6 [5].



Obr. 6 Příklad provedení měřicího systému v rozvodně vvn s pomocnou přípojnici [5].

Vícejádrové kombinované měřicí transformátory napětí a proudu jsou v závislosti na provedení rozvodny umístěny v poli mezi vypínačem a vývodovým odpojovačem. Kombinované MT se instalují do systému přípojnic ve všech třech fázích L1, L2 a L3 [3][5]. Elektroměry a zkušební svorkovnice těchto primárních měřících systémů jsou umístěné mimo rozvodné pole vvn v samostatné skříni měření, která je umístěná obvykle v samostatné budově v bezpečné vzdálenosti od živých částí zařízení vvn rozvodny.

Podrobné schéma zapojení nepřímého měřícího systému pro napětovou úroveň vvn je uvedené Obr. 7.



Obr. 7 Schéma zapojení nepřímého měřícího systému (primární měření) se statickým elektroměrem v síti vvn. Zapojení se třemi jednopólově izolovanými MTN. Převzato z [3].

Parametry měřících transformátorů musí splňovat třídu přesnosti T_p 0,2S pro MTP a T_p 0,2 pro MTN pro jmenovité zatížení 10VA. Jmenovitý převod MTP x/1A je pak požadován

z důvodu dovoleného úbytku napětí při velké délce spojovacího vedení. Zapojení sekundárního vinutí MTN s jmenovitým převodem $x/100/\sqrt{3}$ nebo $x/110/\sqrt{3}$ do hvězdy zajistí pro připojený třísystémový elektroměr fázová napětí o velikosti $100/\sqrt{3}$ V nebo $110/\sqrt{3}$ V [3][5].

2.4 Dvousystémové - trojvodičově připojené nepřímé měřicí systémy vn

V trojfázových soustavách vn bez vyvedeného středního vodiče se pro měření výkonů využívá metoda dvou wattmetrů v Aronově zapojení [5][7][9]. Toto zapojení umožňuje měřit třífázový činný výkon v symetrické i nesymetrické soustavě se souměrným i nesouměrným zatížením i při neharmonickém průběhu napětí a proudů [7][9]. Základní podmínkou metody je vyvážená soustava proudů bez nulové složky. To znamená, že součet okamžitých hodnot proudů $i_L(t)$ je roven nule [7].

$$i_{L1}(t) + i_{L2}(t) + i_{L3}(t) = 0 \quad (2.4.1)$$

Metodu dvou wattmetrů - dvou závislých měřicích systémů W1 a W3 v Aronově zapojení lze popsat pro celkový okamžitý výkon $p(t)$ trojfázové soustavy následující úpravou rovnice [7]:

$$\begin{aligned} i_{L1} \cdot u_{L12} + i_{L3} \cdot u_{L32} &= i_{L1} \cdot (u_{L1} - u_{L2}) + i_{L3} \cdot (u_{L3} - u_{L2}) = \\ &= i_{L1} \cdot u_{L1} + u_{L2} \cdot (-i_{L1} - i_{L3}) + i_{L3} \cdot u_{L3} = \\ i_{L1} \cdot u_{L1} + u_{L2} \cdot i_{L2} + i_{L3} \cdot u_{L3} &= p_{L1} + p_{L2} + p_{L3} = p \end{aligned} \quad (2.4.2)$$

Wattmetry umístěné pouze ve dvou krajních fázích soustavy měří součin velikosti efektivní hodnoty sdružených napětí U_{L12} , U_{L32} a činné složky efektivní hodnoty fázového proudu krajních fází I_{L1} a I_{L3} .

Při uvažování harmonického průběhu je možné z uvedených rovnic odvodit vztah pro celkový výkon trojfázové soustavy naměřený jednotlivými wattmetry W1 a W3 v soustavě s induktivním charakterem zatížení [7][9]:

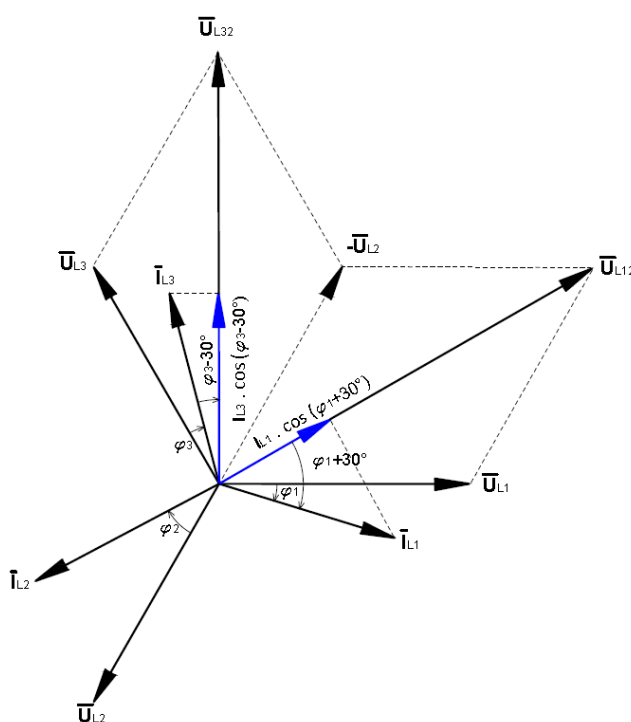
$$P_{W1} = U_{L12} \cdot I_{L1} \cdot \cos(\varphi_1 + 30^\circ) \quad (2.4.3)$$

$$P_{W3} = U_{L32} \cdot I_{L3} \cdot \cos(\varphi_3 - 30^\circ) \quad (2.4.4)$$

$$P = P_{W1} + P_{W3} \quad (2.4.5)$$

Kde $\varphi_{1,3}$ fázový úhel mezi fázovým napětím U_L a proudem I_L podle (2.1.4)

Příklad zobrazení fázorů napětí U_{L12} , U_{L32} , fázorů proudů I_{L1}, I_{L2} a jejich činných složek vycházející z popsaných vztahů je uveden pro induktivní charakter zatížení měřené soustavy na Obr. 8.



Obr. 8 Příklad rozložení fázorů pro induktivní charakter zátěže v trojfázové soustavě měřené metodou Aronova zapojení [5].

Pro měření jalového výkonu je použití metody Aronova zapojení omezeno pouze pro symetrické trojfázové soustavy se souměrným zatížením. Při splnění této podmínky je celkový jalový výkon Q měřené trojfázové soustavy dán vztahem[7][9]:

$$Q = \sqrt{3} \cdot (P_{W3} - P_{W1}) \quad (2.4.6)$$

Pro jalový výkon naměřený jednotlivými wattmetry W1 a W3 lze použít rovnice v obdobném tvaru jako v případě činného výkonu[9]:

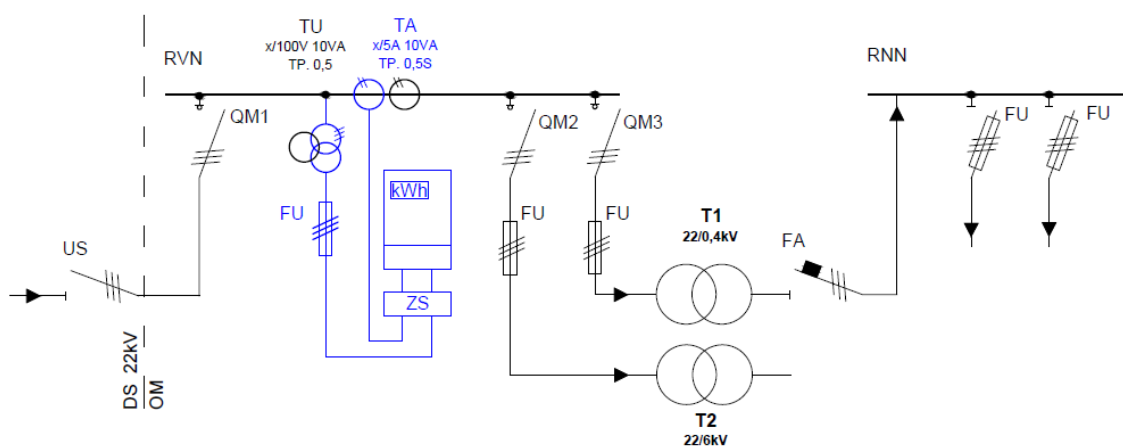
$$Q_{W1} = U_{L12} \cdot I_{L1} \cdot \sin(\varphi_1 + 30^\circ) \tag{2.4.7}$$

$$Q_{W3} = U_{L32} \cdot I_{L3} \cdot \sin(\varphi_3 - 30^\circ) \tag{2.4.8}$$

$$Q = Q_{W1} + Q_{W3} \tag{2.4.9}$$

2.5 Provedení nepřímých měřicích systémů v soustavě vn

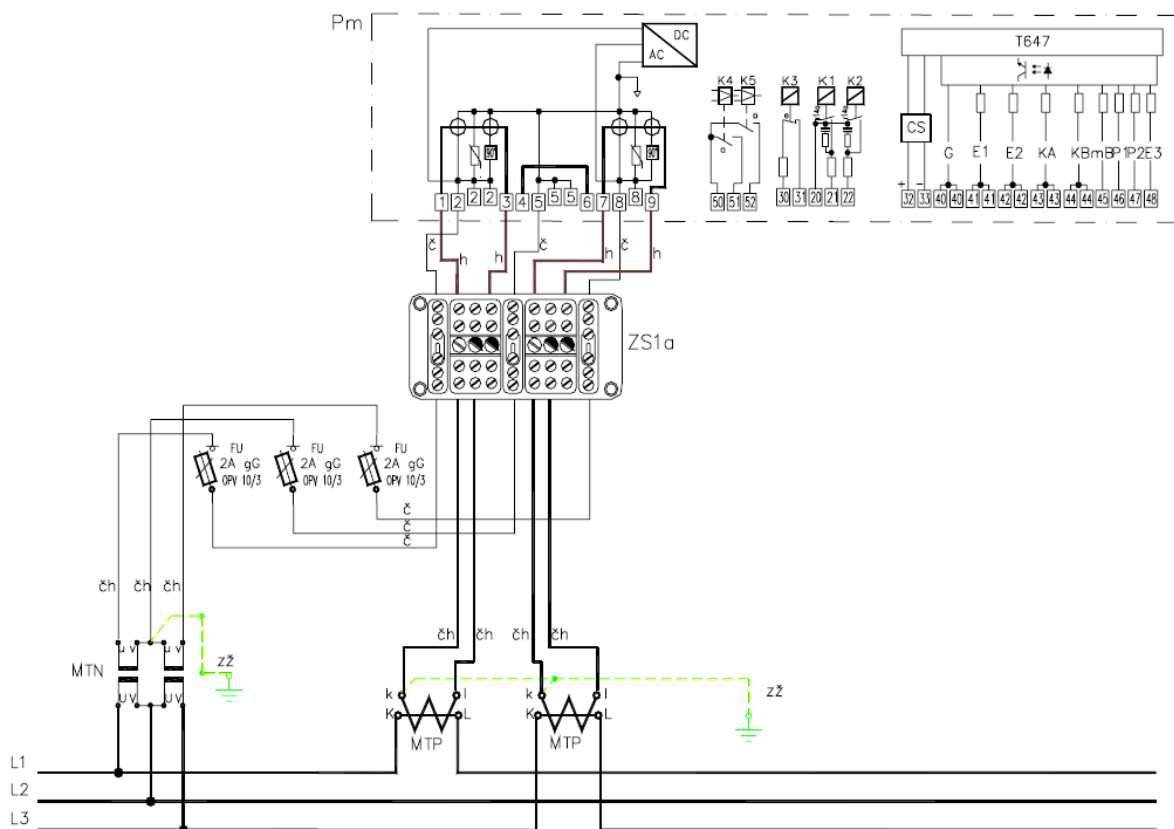
Pro odběrná místa konečné spotřeby s rezervovaným příkonem do 250kW připojená z distribuční soustavy vysokého napětí je měřicí systém realizován přednostně jako primární [3]. Systémy primárního měření jsou umístěné na straně vyššího napětí silového transformátoru a tím umožňují měřit odebranou, případně dodanou elektřinu bezprostředně v místě připojení k distribuční soustavě. Primární měření je realizováno u OPM s více instalovanými silovými transformátory nebo v případě jednoho transformátoru o příkonu obvykle vyšším než 400kVA[3][5]. Jednopolové schéma typického uspořádání primárního měření v soustavě vn je uvedeno na obrázku Obr.9.



Obr. 9 Příklad připojení primárního měřicího systému v OM připojeném k soustavě vn [5].

Připojení těchto odběrných nebo předacích míst je realizováno odbočením z distribuční soustavy vn. Trojfázová soustava této distribuční sítě včetně přípojky je provozována

soustavou s neúčinně uzemněným uzlem bez vyvedeného středního vodiče. V této trojvodičově uspořádané soustavě, která pracuje do primárního vinutí silového transformátoru zapojeného do trojúhelníka, lze pak předpokládat souměrné zatížení jednotlivých fází. Pro měření elektřiny přenášené touto soustavou lze realizovat měřicími systémy na základě metody Aronova zapojení [3], jehož podrobné schéma je zobrazeno na Obr. 10.



Obr. 10 Schéma zapojení nepřímého měřicího systému (primární měření) se statickým elektroměrem v síti vn. Dvou systémové Aronovo zapojení se dvěma dvoupólově izolovanými MTN. Převzato z [4].

Měřicí transformátory jsou osazené v samostatné skříni (kobce) měření vn rozvodného zařízení umístěného v hlavní vstupní rozvodně OM. V případě napájení vn přípojnic více přívody se přednostně volí takový způsob, aby bylo možné použít pouze jednu sadu MT [3]. Není-li tento způsob možný, musí být každý přívod měřen samostatným měřicím systémem s následným součtem naměřených dat [5].

Měřicí transformátory proudu jsou připojeny do systému přípojníc v krajních fázích L1 a L3 za podélným odpojovačem tj. na straně zařízení zákazníka (výrobce) a před vývodem pro jeho silový transformátor [3][5]. Jmenovité hodnoty převodu MTP $x/5A$ jsou voleny s ohledem na příkon silových transformátorů. Použité MTP musí splňovat minimální třídu přesnosti $T_p 0,5S$ pro maximální zatížení 10VA.

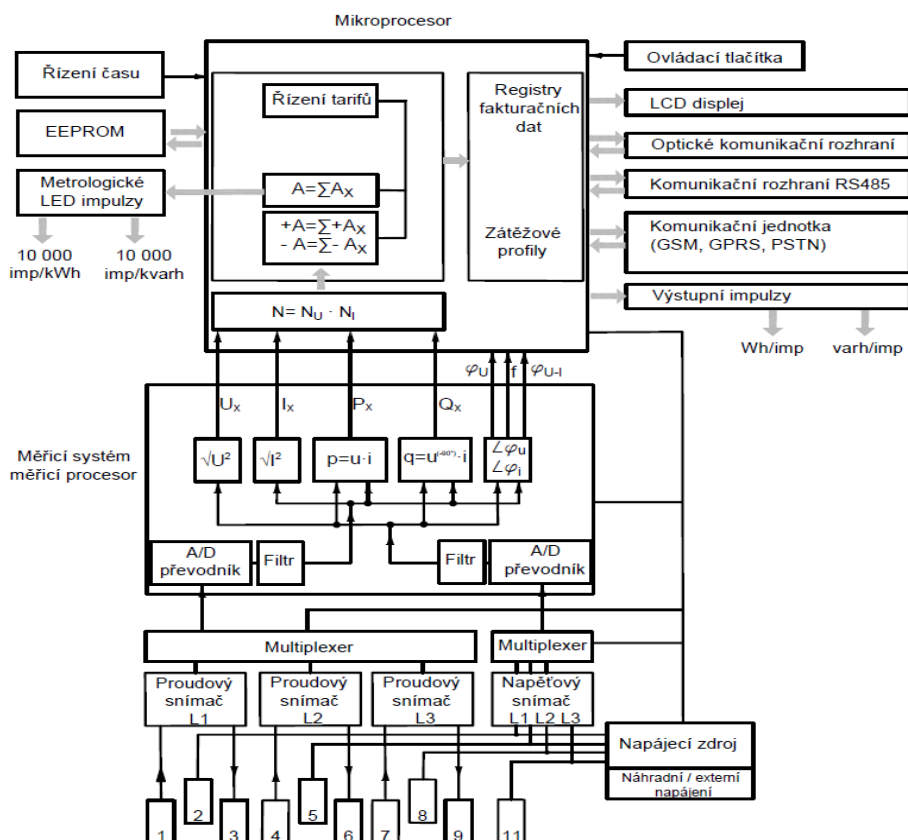
Připojení primárního vinutí MTN k systému přípojníc je provedeno s odpovídajícím jištěním, pokud MTN již nejsou vybaveny vlastním jištěním od výrobce. Pro napěťový obvod měřicího systému mohou být použity dva dvoupólově nebo tři jednopólově izolované měřicí transformátory s minimální $T_p 0,5$ a dovoleným zatížením 10VA [3]. Zapojení sekundárního vinutí MTN s jmenovitým převodem $x/100/\sqrt{3}$ (nebo $x/110/\sqrt{3}$) musí zajistit pro trojvodičové připojení elektroměru sdružená napětí o velikosti 100V nebo 110V. Toho je dosaženo v případě použití dvoupólově izolovaných MTN zapojením do otevřeného trojúhelníka („V“). Nebo v případě jednopólově izolovaných transformátorů zapojením do hvězd („Y“) [3][5].

3 Využití statických elektroměrů pro online diagnostiku

Statické elektroměry určené pro nepřímé měřicí systémy fakturačního měření nabízí podle typu a výrobce vedle základních funkcí měření činného a jalového výkonu a energie také řadu rozšiřujících funkcí pro monitorování a diagnostiku nejen vlastních částí elektroměru, ale také pro sledování parametrů měřicího obvodu a tím i měřené sítě. Tyto funkce lze s výhodou využívat pro on-line získání diagnostických parametrů přímo z místa instalace měřicího systému. Přesnost takto získaných parametrů je dána minimální požadovanou třídou přesnosti pro elektroměry a měřicí transformátory [1].

Diagnostické funkce využitelné pro sledování parametrů měřicího obvodu vycházejí ze samotného principu statického elektroměru, který je ve své podstatě založený na principu digitálního měřicího přístroje s následným zpracováním naměřených dat ve formě číselných výpočtů [11][12][13].

Blokové schéma principu statického elektroměru z pohledu diagnostiky je uvedeno na *Obr.11*.



Obr. 11 Blokové schéma statického elektroměru

Hlavním blokem měřicího systému statického elektroměru je signálový procesor, který zpracovává analogový signál přivedený na vstupní obvody. Výstupem signálového procesoru jsou digitální hodnoty určené pro další zpracování v mikroprocesoru:

- p okamžitá hodnota činného výkonu,
- q okamžitá hodnota jalového výkonu,
- U efektivní hodnota fázového napětí,
- I efektivní hodnota fázového proudu,
- φ_U úhel fázového posuvu napětí,
- φ_I úhel fázového posuvu napětí a proudu.

Vstupními signály měřicího procesoru jsou analogové hodnoty napětí a proudů měřené soustavy snižené o hodnotu transformačního poměru předřazených externích měřicích transformátorů (2.3). Uspořádání vstupního obvodu je závislé podle měřicího systému:

- pro čtyřvodičové uspořádání soustavy s vyvedeným středním vodičem jsou to nezávislá fázová napětí U_{L1} , U_{L2} , U_{L3} a fázové proudy I_{L1} , I_{L2} , I_{L3} ,
- pro třívodičové uspořádání soustavy bez vyvedeného středního vodiče jsou to sdružená napětí U_{L12} , U_{L23} a fázové proudy v krajních fázích I_{L1} a I_{L3} .

Napěťový vstup je konstruován s maximální vstupní impedancí obvykle $1M\Omega$, aby nezatěžoval měřený obvod. Vstupní, nejčastěji odporový, napěťový dělič snižuje analogovou hodnotu vstupního měřeného napětí (dle provedení 58V nebo 230V) na napětí U_U o velikosti několika mV vhodnou pro další zpracování v polovodičových obvodech [5][11][12][13].

Konstrukce proudového snímače musí naopak splňovat podmínku minimální vstupní impedance. Nejčastěji je tak využíván proudový transformátor s odporovou zátěží sekundárního obvodu, na které se snímá úbytek napětí U_I , v řádu několika mV, úměrný velikosti vstupnímu proudu v rozsahu 0-10A [5][11][12][13].

Upravené analogové napěťové signály U_U a U_I jsou následně vzorkovány analogově /digitálním převodníkem (nejčastěji typu Sigma - Delta pro maximální rozlišení) s obvyklou vzorkovací frekvencí 1,6 kHz (u elektroměrů s vyšším nárokem na přesnost až 6,4kHz) [11][12][13]. Digitalizovaný signál je následně filtrován číslicovým filtrem pro odstranění harmonických složek vyššího řádu zabraňujícímú vzniku aliasingu. Digitální okamžité hodnoty signálu u_U a u_I odpovídající okamžitým hodnotám měřeného napětí u_1, u_2, u_3 a proudu i_1, i_2, i_3 jsou přivedeny na vstup signálového procesoru, který generuje hodnoty energie ve dvou samostatných krocích zpracování:

- výpočet okamžitých hodnot výkonu
- výpočet průměrného výkonu – integrací za dobu jedné sekundy [11][12][13].

Výstupní hodnoty ze signálového procesoru jsou přivedeny k dalšímu zpracování na vstup mikroprocesoru. Mikroprocesor vstupní data upraví vynásobením konstantou danou transformačním poměrem, aby velikost hodnot odpovídala hodnotám měřené sítě. Následně jsou data zpracována na základě nastavených algoritmů, které jsou předmětem zákaznické parametrizace elektroměru [5]. Finální naměřená data jsou uložena do paměti elektroměru a

přiřazena na příslušná rozhraní - LCD displeje, optický komunikační port, modem a impulsní výstup.

3.1 Diagnostické veličiny měřené statickým elektroměrem

Okamžitá hodnota činného výkonu p_x je spočtena samostatně pro každou fázi vynásobením okamžitých hodnot napětí u_x a činnou složkou i_p okamžité hodnoty proudu i_x .

$$p_x = u_x \cdot i_{px} \quad (3.1.1)$$

Kde i_{px} hodnota reálné složky proudu dané fáze.

Měřicí procesor pole typu obvykle nabízí volbu dvou algoritmů pro výpočet okamžité hodnoty jalového výkonu, které lze zvolit nastavením uživatelské parametrizace:

- aritmetickým výpočtem

Před výpočtem okamžité hodnoty jalového výkonu q_x je okamžitá hodnota napětí u_x fázově posunuta o 90 ° aby platilo:

$$q_x = u_x \cdot i_{qx} \quad (3.1.2)$$

Kde i_{qx} hodnota imaginární složky vzorku proudu dané fáze.

Fázový posun je proveden zpožďovacími obvody filtrů, nastavených pro základní harmonickou měřeného napětí 50Hz. Při tomto výpočtu tak nejsou zohledněny vyšší harmonické složky výkonů [11]. (Tento způsob výpočtu je pro fakturační měření doporučen a je možný realizovat pouze u třísystémových-čtyřvodičově připojených elektroměrů) [5][11][13].

- Vektorovým výpočtem

Okamžitá hodnota jalového výkonu je vypočtena z okamžitých hodnot činného p a zdánlivého výkonu s :

$$q_x = \sqrt{s^2 - p^2} \quad (3.1.3)$$

Tato metoda je přesnější v oblasti nižších proudů než metoda aritmetická, ale je ovlivněna výkony vyšších harmonických složek [11][13].

Naměřený činný a jalový výkon je na základě vyhodnocení směru toku energie přiřazen do registrů příslušných kvadrantů I-IV. Pro diagnostiku tak lze využít hodnoty z:

- registru aktuálního výkonu,
- registr průměrného výkonu v měřicí periodě,
- registru maximálního výkonu v měřicí periodě (obsahuje datum a čas),
- registr průměrné hodnoty výkonu za měřicí periodu (registr zátěžového profilu).

Integrací výkonu za měřicí interval je získána hodnota energie, která je přivedena na kontakty výstupního impulsního rozhraní nebo optického metrologického rozhraní elektroměru:

- kontakty impulsního rozhraní,

s uživatelsky definovaným algoritmem výpočtu energie podle (2.4, 2.5 a 2.6) a uživatelsky definovanou váhou výstupního impulsu (Wh/imp).

- optické metrologické rozhraní,

s algoritmem zohledňující pouze saldo energie (2.4), s pevně daným počtem obvykle 10 000 imp/kWh .

Výstupní rozhraní jsou vhodná pro připojení externích měřících etalonů pro diagnostiku porovnáním naměřené energie.

Efektivní hodnoty fázových napětí U_x a proudů I_x jsou spočteny jako odmocnina podílu sumy kvadrátů okamžitých hodnot u_x a i_x za daný vyhodnocovaný úsek a periody T [5][12][13]:

$$U_x = \sqrt{\frac{\int_0^T u_x^2 dt}{T}} \quad (3.1.4)$$

$$I_x = \sqrt{\frac{\int_0^T i_x^2 dt}{T}} \quad (3.1.5)$$

Efektivní hodnota proudu nulovým vodičem I_N je vypočtena geometrickým součtem okamžitých hodnot proudu [11][12][13]:

$$i_N = i_{L1}(t) + i_{L2}(t) + i_{L3}(t) \tag{3.1.6}$$

Kmitočet f_n síťového napětí je vypočten na základě měření času $t_{UL1-UL1}$ mezi dvěma průchody nulou daného průběhu napětí (dvě změny kladné půlperiody průběhu u_{L1} na zápornou).

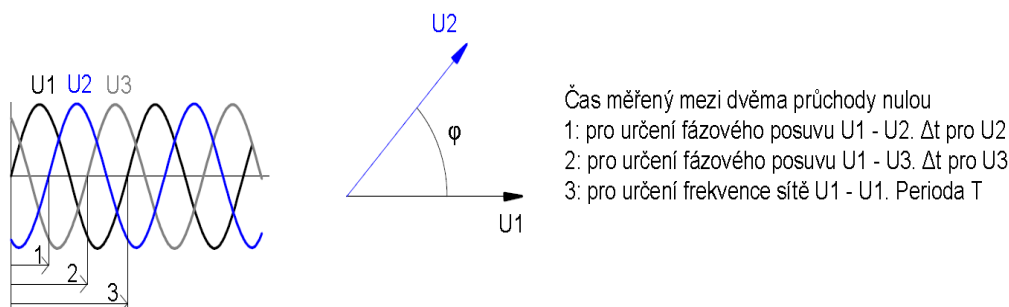
$$f_n = \frac{1}{\Delta t} \tag{3.1.7}$$

Kde Δt diference měřeného času $t_{UL1-UL1}$.

Fázový úhel φ_U mezi napětími $U_{L1} - U_{L2}$ a $U_{L1} - U_{L3}$ je spočítán z času $t_{UL1-UL2}$ a $t_{UL1-UL3}$ podle vztahu:

$$\varphi = 2\pi \cdot f \cdot \Delta t = 2\pi \frac{\Delta t}{T} \tag{3.1.8}$$

Kde Δt diference měřeného času $t_{UL1-UL2}$ a $t_{UL1-UL3}$.



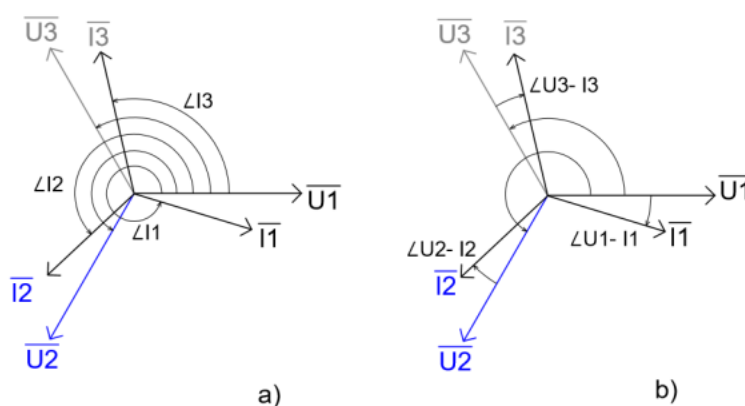
Obr. 12 Grafické zobrazení výpočtu fázového posuvu [5].

Směr točivého pole je určen na základě změřených úhlů všech tří fázových napětí U_{L1} , U_{L2} a U_{L3} . Dodržení sledu fází napětí není u statických elektroměrů podmínkou správného měření jako u dříve používaných indukčních elektroměrů, ale z pohledu diagnostiky je důležité pro vyhodnocení hodnoty úhlu fázového posuvu mezi napětím a proudem. Proto v případě, že sled fází měřené soustavy odpovídá uživatelsky zvolenému směru točivého pole, je na displeji elektroměru trvale indikován symbol L1 L2 L3, v opačném případě symbol bliká.

Fázový úhel mezi napětím U_x a proudem I_x dané fáze je spočítán obdobně z času $t_{UL1-IL1}$, $t_{UL2-IL2}$ a $t_{UL3-IL3}$.

Pro vyhodnocení úhlu fázového posunu je možné uživatelským nastavením v závislosti na typu elektroměru zvolit dvě varianty[11][12][13]:

- Všechny úhly napětí a proudů jsou zobrazeny v jednom směru a jsou vztaženy k fázovému napětí U_{L1} . Hodnoty úhlů jsou vždy kladné v rozsahu od 0 do 360 ° *Obr.13a)*
- Úhly napětí jsou vztaženy k U_{L1} jako v předchozím případě, ale úhly proudů jsou vztaženy k příslušnému napětí. Pak jsou hodnoty úhlů zobrazeny v rozmezí -180 ° a +180 ° *Obr. 13 b)*



Obr. 13 Varianty zobrazení fázových úhlů napětí a proudu [11][12][13].

Uvedený způsob výpočtu fázového úhlu je závislý na typu a připojení elektroměru k měřené soustavě (principu měření). U elektroměrů s nezávislým měřicím systémem samostatným pro každou fázi je možné měření fázových úhlu v celém výše uvedeném rozsahu. Na rozdíl tomu u elektroměrů pouze se dvěma závislými měřicími systémy jsou hodnoty úhlů vztažené k fázoru sdruženého napětí. Fázové úhly mezi sdruženými napětími a fázovými proudy jsou navíc posunuty o + a - 30°. Výpočet úhlů fázového posunu z důvodu složitého výpočtu tak nemusí být u všech těchto typů elektroměrů k dispozici[11][12][13].

Omezením pro výpočet úhlů vzájemného fázového posunu fázorů napětí i proudů je porucha, která způsobí úplnou ztrátu referenčního napětí, kdy $U_{L1} = 0V$, $U_{L12} = 0V$.

Pro diagnostiku je možné využít hodnoty uvedených veličin, které jsou uloženy v samostatných registrech pro každou fázi samostatně [11][12][13]:

- registr efektivní hodnoty napětí,
- registr fázových úhlů vektorů napětí,
- registr periodického měření napětí s definovanou periodou ukládání,
- registr efektivní hodnoty proudu ve fázích a proudu středním vodičem,
- registr fázových úhlů mezi napětím a proudem.

Jako doplňující diagnostickou hodnotu je možné využít i hodnotu účinníku $\cos \varphi$, který je také počítán samostatně pro každou jednotlivou fázi a agregovaně za všechny tři fáze poměrem činného P a zdánlivého výkonu S :

$$\cos \varphi = \frac{P}{S} \quad (3.1.9)$$

Nezvykle nízké nebo mezifázově značně rozdílné hodnoty účinníku mohou poskytnout rychlou informaci stavu měřicího systému, ale je nutné je vždy vyhodnotit s ohledem na charakter odběru elektrické energie.

3.2 Monitorovací a kontrolní funkce statického elektroměru

Monitorovací funkce (záznamník událostí) zaznamenává do protokolu událostí datum a čas výskytu nebo zániku a dobu trvání nepravidelně se vyskytujících událostí. Uložený záznam je pak možné využít k analýze chování měřicího obvodu (měřené sítě) nebo k monitorování správné funkce elektroměru. Volbou uživatelského nastavení je možné ze seznamu těchto funkcí vybrat události, které se budou při vzniku nebo zániku zapisovat do vybraného registru. Hodnota registru pak zpravidla obsahuje číselný kód události a časové razítka vzniku nebo zániku události [11][12][13].

Z pohledu diagnostiky je možné seznam událostí rozdělit na události pro analýzu měřeného obvodu vyhodnocované na základě předem definovaných prahových hodnot výše popsanych diagnostických veličin:

- přepětí a podpětí v jednotlivých fázích,
- úplná ztráta napětí v jednotlivých fázích,
- nadproud v jednotlivých fázích,

- výskyt proudu v nulovém vodiči,
- výskyt proudu v jednotlivých fázích v průběhu ztráty napětí.

A na události zaznamenávající systémový stav elektroměru [11][12][13]. Níže je uveden pouze příklad vybraných sledovaných událostí. Konkrétní seznam dostupných funkcí je vždy dán typem a výrobcem elektroměru [11][12][13]:

- stav záložní baterie,
- ztráta nebo obnovení napájení elektroměru (v případě externího napájení),
- nastavení, změna nebo chyba časové základny,
- chybný kontrolní součet,
- otevření krytu elektroměru,
- detekce nebo zánik působení silného magnetického pole,
- smazání stavů registrů ...

Další skupinou kontrolních funkcí elektroměrů jsou chybová hlášení. Elektroměry na základě vlastního algoritmu provádějí interní auto-test, při kterém kontrolují správnou funkci všech důležitých částí [11][12][13]. Detekované chyby jsou následně klasifikovány podle závažnosti a zapsány do chybového registru v podobě osmimístného číselného kódu:

- registr kritické fatální chyby (F.F 1)

Do registru se zapíše kód vnitřní chyby, která brání elektroměru ve správné funkci měření. Elektroměr tak musí být vždy vyměněn a předán do opravy s následným úředním ověřením v AMS

- registr nezávažné chyby (F.F 2)

V registru jsou zaznamenány méně závažné chyby, které neovlivní provozuschopný stav elektroměru. Pokud se chyby nevyskytnou opakovaně není důvod k výměně a následnému ověření elektroměru [11][12][13].

3.3 Komunikační rozhraní pro zobrazení a odečet diagnostických dat

Diagnostické hodnoty uložené v popsaných registrech je možné zobrazit na displeji elektroměru, tím jsou v zobrazované formě k dispozici pro servisní činnost přímo v místě instalace. Výhodou statických elektroměrů je možnost předání těchto dat i na komunikační rozhraní pro dálkový odečet s technologiemi GSM, GPRS, PSTN případně optické rozhraní pro odečet ručním terminálem [11][12][13].

Základním procesem pro získání diagnostických dat z elektroměru je jejich odečet prostřednictvím datové centrály při provádění periodického odečtu fakturačních dat.

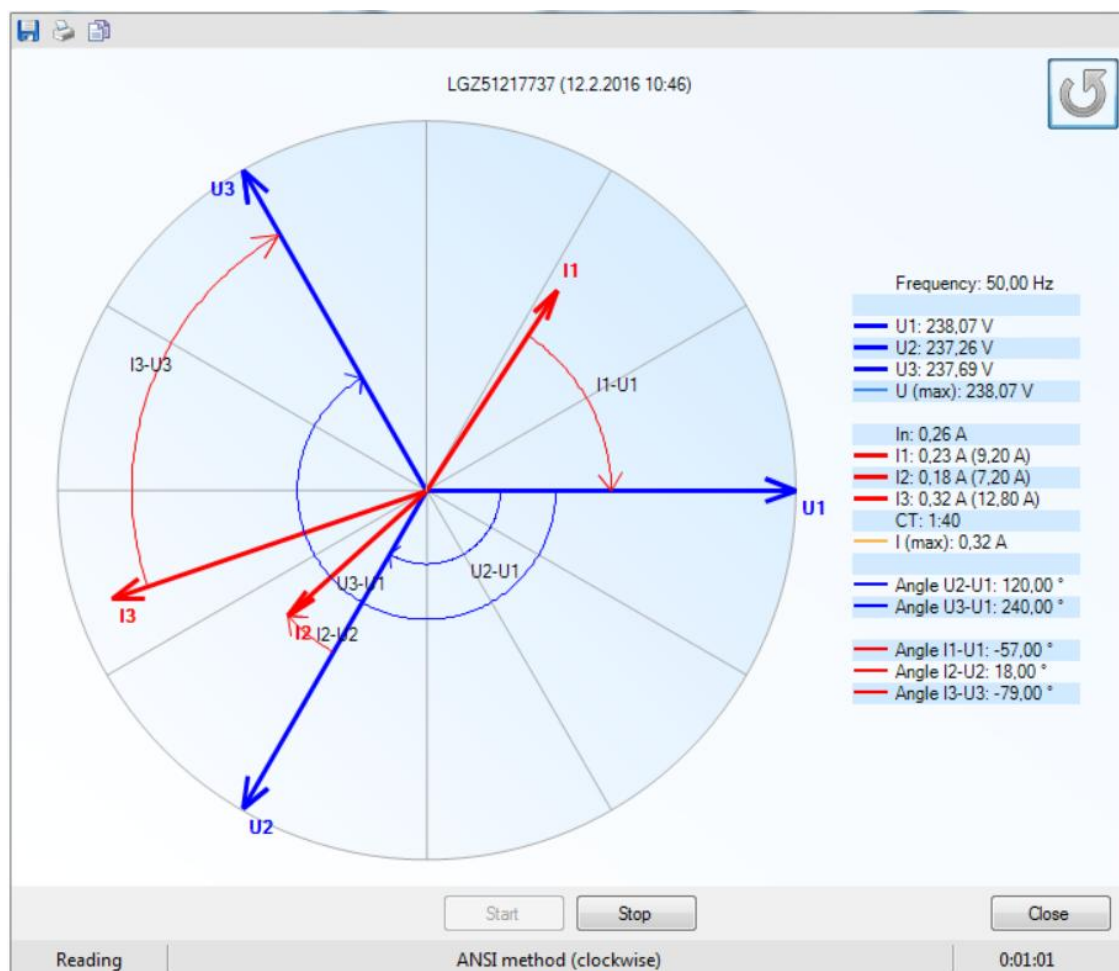
Hlavní výhodou tohoto procesu je možnost současného uložení periodicky získaných diagnostických a fakturačních dat z měřicích systémů s následným vyhodnocením prostřednictvím automatického reportu na základě analýzy předem definovaných parametrů.

Nevýhodou je pak omezení v termínu provedení odečtu, který musí splňovat požadavky na stanovené mezní termíny předávání fakturačních dat v systému fakturačního měření a to i s ohledem na množství odečítaných elektroměrů. Pro nepřímé měřicí systémy s typem měření A (obvykle i pro B) jsou automatické odečty spouštěné denně od 00:00 hodin, tedy v čase, kdy většina OPM odebírá elektrickou energii s jiným charakterem zatížení, než je obvyklé ve zbylé části dne. Rozdíl je ve velikosti činného a jalového výkonu, ale také ve velikosti účinníku zatížení. Rozdílné hodnoty pak mohou ovlivnit výsledek diagnostického vyhodnocení.

Další možností dálkového odečtu diagnostických dat z konkrétního elektroměru je využití výrobcem daného servisního software pro vybraný typ elektroměru. Prostřednictvím servisní aplikace vybavené vhodným komunikačním zařízením je možné provádět on-line odečet nejen diagnostických dat, ale je také možné ověřit hodnoty nastavených parametrů elektroměru například: nastavení konstanty (transformačního poměru), nastavení vnitřního času přístroje a tarifní struktury, váhu výstupních impulsů, nastavení komunikačních parametrů atp. [11][12][13].

Získání diagnostických dat je možné obdobně jako v případě datové centrály pomocí odečtu jednotlivých registrů nebo pomocí diagnostického modulu, který například zobrazí v jednom

dialogovém okně potřebná diagnostická data doplněná o hodnoty chybových a monitorovacích registrů. Příklad zobrazení diagnostických dat servisní aplikaci je uveden na Obr.14.



Obr. 14 Příklady možnosti zobrazení diagnostických dat servisním softwarem.

Výhodou použití servisního softwaru je možnost opakovaného odečtu aktuálních diagnostických dat, které lze využít jako servisní podporu při instalaci měřicího systému nebo k servisní podpoře při řešení závady měřicího systému. Výhodou může být i přenosná mobilní aplikace s možností využití v součinnosti s diagnostikou přímo v místě instalace měřicího systému.

4 Optimalizace diagnostiky nepřímého měřicího systému fakturačního měření

Předpokladem správné funkce měřicího systému po celou dobu jeho životnosti je optimálním způsobem prováděná diagnostika. Úkolem diagnostiky je včasné nalezení poruchy jednotlivých součástí a neoprávněného zásahu do zapojení měřicího systému s minimálním omezením dodávky elektrické energie do daného OPM.

Význam komplexního řešení diagnostiky je především v distribučních sítích PDS s velkým počtem provozovaných měřicích systémů na všech napěťových úrovních. U těchto nepřímých měřicích systémů s typem měření A nebo B je pro dodržení stanovených termínů předávání naměřených fakturačních dat nutné provádět dálkový odečet. V důsledku toho jsou omezeny periodicky prováděné kontroly měřicího systému přímo v místě instalace při přímém odečtu pracovníkem PDS. O to jsou kladeny vyšší nároky na diagnostický systém primárně založený na plošném získávání diagnostických dat pomocí dálkového odečtu.

Optimálně řešený diagnostický systém na základě získaných diagnostických dat musí být schopný rozlišit tři možné stavy:

- plně provozuschopný stav měřicího systému s požadovanou přesností měření (systém zaznamenává správně naměřená data elektrické energie a výkonu),
- pouze částečně funkční stav, kdy je systém zatížen chybou měření (systém zaznamenává chybně naměřená data),
- a nefunkční stav (systém není funkční nezaznamenává žádná naměřená data).

Z popisu měřicích systémů a principu měřicích metod uvedených v úvodní části diplomové práce je zřejmé, že systémy nepřímého měření obsahují mimo samotného elektroměru, také měřicí transformátory, zkušební svorkovnici a propojovací vedení včetně předepsaného jištění. Přesnost měření těchto nepřímých měřicích systémů tak ovlivňuje řada faktorů způsobených různými příčinami [5]. Pro vzniklé příčiny pak mohou být charakteristické určité změny hodnoty sledovaných veličin napětí, proudu a fázového posuvu, které je však nutné pro diagnostické vyhodnocení rozlišit od možného, ve většině případů netypického,

provozního stavu měřené sítě. V Tabulce 1 je uveden přehled nejčastěji vyskytujících se příčin a jejich možné záměny s provozním stavem měřené sítě.

Tabulka 1 Přehled faktorů ovlivňující přesnost měření a jejich možné záměny s běžným provozním stavem

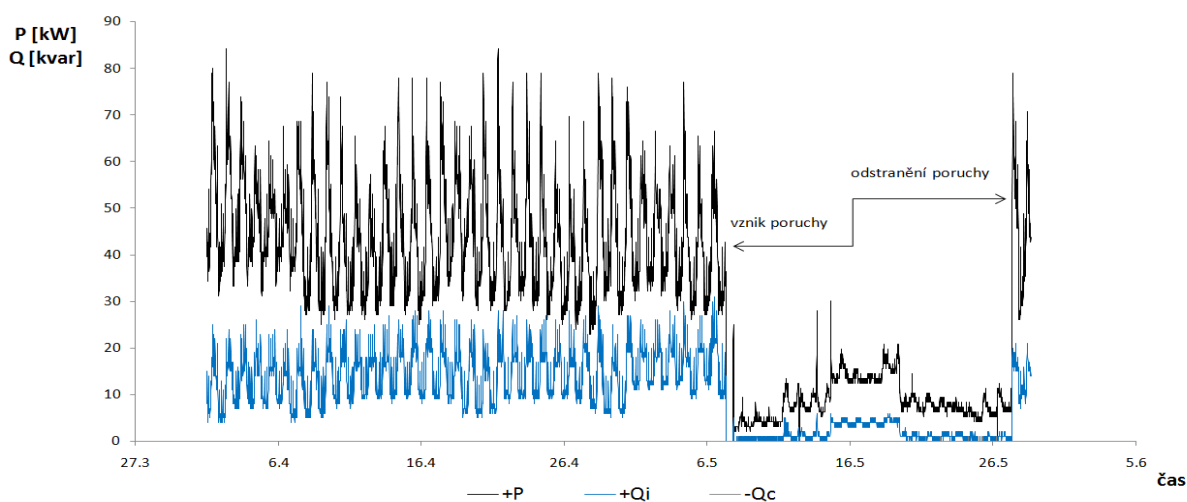
Faktor ovlivňující přesnost měření	Příčina	Běžný provozní stav
Chyba v zapojení měřicího obvodu	Nedodržený směr proudu (chybně zapojené svorky MTP P1-P2 a s2-s1)	Změna toku energie např. výrobní OPM
	Nedodržený sled fází proudového a napěťového měřicího obvodu	Odběr s nedodrženým účíníkem
Ztráta nebo změna parametrů napětí (velikost a úhel) v měřicím obvodu	Vadná pojistka jištění napěťového měřicího obvodu	Výpadek nebo změna parametrů napětí měřené soustavy
	Chybná manipulace ve zkušební svorkovnici (rozpojené napěťové svorky)	
	Přerušený vodič napěťového měřicího obvodu	
	Nefunkční MTN	
Zánik proudu v proudovém měřicím obvodu	Nefunkční MTP	Změna velikosti nebo souměrnosti zatížení měřené soustavy
	Chybná manipulace ve zkušební svorkovnici (proudový obvod zkratován)	
	Přerušení nebo zkratování vodičů proudového obvodu	

Na základě analýzy poruchových stavů, je zřejmé, že vliv těchto faktorů (poruch nebo chybného zapojení prvků měřicího systému) se vždy projeví změnou v množství naměřené činné a jalové energie [5]. Hodnoty činného výkonu v důsledku působení poruchy vždy poklesnou. Na rozdíl tomu hodnoty jalového výkonu mohou dosahovat v závislosti na příčině i několikanásobně vyšších hodnot [5], jak dokazují výsledky analýzy poruchových stavů, kterou jsem provedl v rámci své bakalářské práce .

Velké rozdíly v množství naměřené činné energie nebo náhlý pokles hodnot průměrného čtvrt hodinového výkonu uloženého ve formě zátěžového profilu (LP) je možné vyhodnotit jako podezření na možnou závadu v měřicím systému. To je možné uplatnit pouze u měřicích systémů instalovaných na OPM s předem známým a vyrovnaným diagramem zatížení. Proto

není možné tuto metodu použít pro plošné vyhodnocení poruch měřicích systémů v dané distribuční soustavě.

Metoda má však stále svůj význam pro individuální vyhodnocení a podporu diagnostiky u měřicích systémů s typem měření A a B. Především pro přesné určení vzniku a rozsahu již diagnostikované poruchy. Příklad vyhodnocení a určení doby trvání poruchy z naměřených hodnot zátěžového profilu je uvedeno na *Obr.15*.



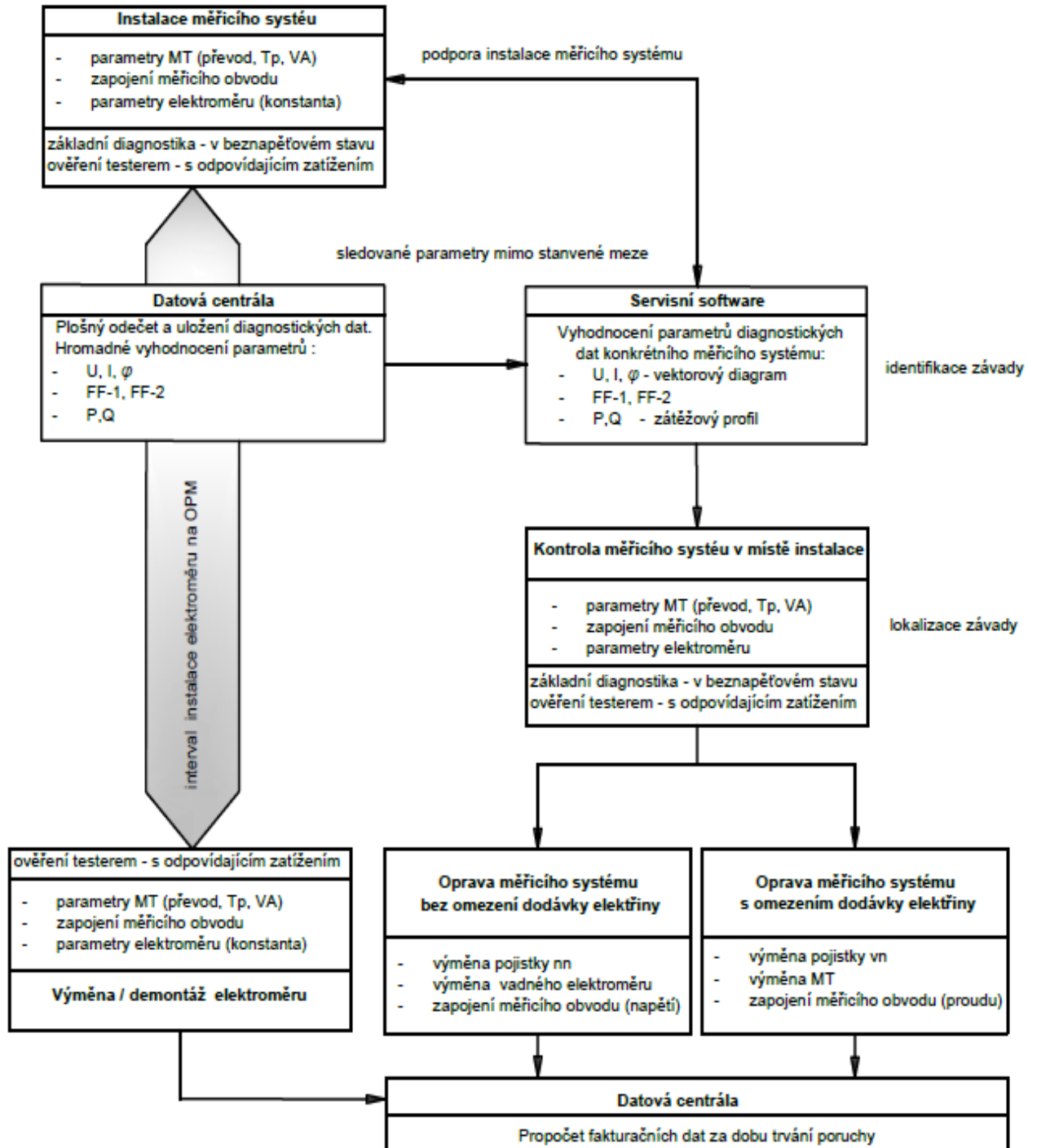
Obr. 15 Vyhodnocení doby trvání poruchy měřicího systému z hodnot LP.

Při respektování všech výše uvedených aspektů je zřejmé, že pro nalezení závady musíme analyzovat každý konkrétní měřicí systém samostatně s využitím znalostí jeho principu a provedení. Proto pro detekci a přesnou lokalizaci vzniklé závady je potřeba stanovit diagnostický proces a v něm kombinovat více jednotlivých diagnostických metod, které na sebe navazují a vzájemně se doplňují. Takový proces musí zajistit výchozí bezchybné uvedení měřicího systému do provozu, vyhledat změny sledovaných parametrů během provozu a na základě referenčních hodnot identifikovat vzniklou závadu. Závadu lokalizovat a tím umožnit volbu vhodného pracovního postupu vedoucího až ke konečnému odstranění závady.

4.1 Diagnostický proces

Blokové schéma navrženého diagnostického procesu uvedené na *Obr.16* může být ve svém principu univerzální pro všechny druhy nepřímých měřicích systémů. Jednotlivé bloky

procesu se liší pouze v možnosti uplatnění konkrétní diagnostické metody, která je závislá na daném typu, provedení a napěťové hladině instalovaného nepřímého měřicího systému.



Obr. 16 Blokové schéma modelu diagnostického procesu.

Základní diagnostický interval je vymezen na začátku instalací nového měřicího systému a na konci výměnou elektroměru nebo jeho demontáží. Případně výměnou nebo demontáží celého měřicího systému. V obou těchto mezních bodech je provedena diagnostika přímo v místě instalace měřicího systému:

- základní diagnostikou při zajištěném beznapěťovém stavu měřené soustavy,
- diagnostikou pomocí měřicího etalonu při odpovídajícím zatížení.

Měřicí systém je uveden do provozu pouze v případě, že není zjištěna žádná závada. Pokud měřicí systém vyhoví diagnostice i při výměně (demontáži) elektroměru lze předpokládat, že byl funkční během celého intervalu svého provozu a naměřená fakturační data byla korektní.

Maximální doba intervalu je však dána dobou platnosti úředního ověření elektroměru. Tato doba je z pohledu předávání fakturačních dat na OTE a k periodickému vyúčtování neúměrně dlouhá i v případě, že PDS provádí plánované kontroly během tohoto intervalu. Pokud dojde ke zjištění závady měřicího systému až na konci intervalu, neumožňuje tento model procesu zpětné doúčtování chybně naměřené elektřiny a to především, pokud doba trvání závady přesáhla zákonem danou maximální lhůtu zpětného doúčtování [2].

Pro minimalizaci uvedeného nedostatku je vhodné model diagnostického procesu rozšířit o periodické odečítání a vyhodnocení diagnostických dat z elektroměru. Současné odečtení fakturačních a diagnostických dat prostřednictvím datové centrály tak proces rozšíří o prvek on-line diagnostiky. Tím lze zajistit včasnou detekci vzniklé závady v intervalu srovnatelném s intervalem předávání naměřených fakturačních dat.

Periodicky nebo individuálně spouštěné algoritmy vyhodnotí parametry uložených diagnostických dat s ohledem na typ měřicího systému:

- velikost napětí U_{L1} , U_{L2} , U_{L3} nebo U_{L12} , U_{L32} pro Aronovo zapojení,
- velikost proudu I_{L1} , I_{L2} a I_{L3} nebo I_{L1} , I_{L3} pro Aronovo zapojení,
- fázové úhly napětí φ_{UL1} , φ_{UL2} , φ_{UL3} nebo jsou-li dostupné podle typu elektroměru φ_{UL12} , φ_{UL32} v případě Aronova zapojení,
- fázové úhly proudu φ_{IL1} , φ_{IL2} , φ_{IL3} nebo jsou-li dostupné podle typu elektroměru φ_{IL1} , φ_{IL3} v případě Aronova zapojení,

- hodnotu chybového registru F.F 1 a F.F 2
- hodnotu registru záznamníku událostí uživatelsky vybraných parametrů.

Vybrané měřicí systémy, které nesplňují limitní parametry jsou zařazeny k individuální analýze prostřednictvím servisního softwareu. Tato fáze diagnostiky eliminuje případné nekorektní hodnoty získané v době mimo charakteristické zatížení měřené soustavy daného OPM. A to tím, že umožňuje provedení individuálního odečtu ve vybraném intervalu s odpovídajícím zatížením měřené soustavy.

U takto získaných diagnostických hodnot se ověří časový úsek, ve kterém se tyto hodnoty vyskytovaly a porovná se s intervalem naměřeného zátěžového profilu činného a jalového výkonu. Naměřené výkony se porovnají s napětím a proudem z pohledu maximálně dosažitelné hodnoty činného a jalového výkonu. Při analýze je respektován charakter zatížení a směr toku elektrické energie podle typu OPM. (Tento postup je upřesněn v kapitole 4.4).

Na základě výsledku analýzy je pak možné, již v této fázi diagnostiky, odhadnout pravděpodobnou příčinu vzniku chybných hodnot a předem rozhodnout:

- je-li možné závadu přesně lokalizovat případně opravit bez omezení dodávky elektrické energie do OPM například s využitím diagnostiky pomocí měřicího etalonu.
- nebo naopak odhadnout časovou náročnost lokalizace a opravy poruchy a tak lépe plánovat termín zajištění beznapětového stavu a tím i dobu omezení dodávky elektřiny do OPM pro provedení kontroly v rozsahu základní diagnostiky.

Servisním softwarem podporujícím daný typ elektroměru provedeme i přesné vyhodnocení případné vnitřní chyby elektroměru nebo registru záznamníku událostí, které přímo určí další plánovaný postup opravy:

- výměna vadného elektroměru v případě detekce kritické fatální chyby v registru F.F 1
- oprava v případě detekce nezávažné chyby v registru F.F 2 nebo trvání nežádoucí události (výměna baterie, seřízení času...).

Konečné upřesnění a lokalizace závady u vybraného měřicího systému se provede následně v místě instalace tohoto systému prostřednictvím diagnostiky:

- metodou porovnání naměřené energie pro potvrzení / vyloučení poruchy měřicího systému na hladině nn a u vybraných systémů na hladině vn (Kapitola 4.5).
- metodou analýzy vektorového diagramu v propojovacím vedení měřicího obvodu pro potvrzení / vyloučení chybného zapojení u systémů na hladině nn a v sekundární části obvodu měřicích systémů vn a vvn (Kapitola 4.6).
- základní kontrolu v zajištěném beznapěťovém stavu (Kapitola 4.7).

Výhodou včasné identifikace možné příčiny poruchy je možnost současného plánování diagnostiky s její opravou a to zejména, pokud je nutné zajištění beznapěťového stavu a tím omezení dodávky elektřiny do OPM.

Po obnovení bezchybného provozu měřicího systému poskytuje provedená analýza diagnostických dat podklad pro opravu fakturačních dat za dobu trvání poruchy [5].

4.2 Referenční parametry pro diagnostiku napěťového obvodu měřicího systému

Referenční parametry napětí a úhlu fázového posuvu můžeme provést na základě matematické analýzy chování trojfázového obvodu při poruše s uplatněním určité tolerance stanovené reálným provozem distribučních sítí.

Napěťové měřicí obvody polopřímých a nepřímých měřicích systémů na hladině nn a vvn jsou ve své podstatě symetricky napájené a symetricky zatížené třífázové obvody zapojené do hvězdy s přímo propojenými středovými uzly a se vzájemným fázovým posuvem fázorů napětí o 120° [5]. Zdroj pro napájení napěťového měřicího obvodu je v případě polopřímého měření přímo připojená měřená soustava nn. V případě vvn je zdrojem sekundární vinutí MTN. Způsob zapojení je podrobně uveden ve druhé kapitole na *Obr.5 a Obr. 7*.

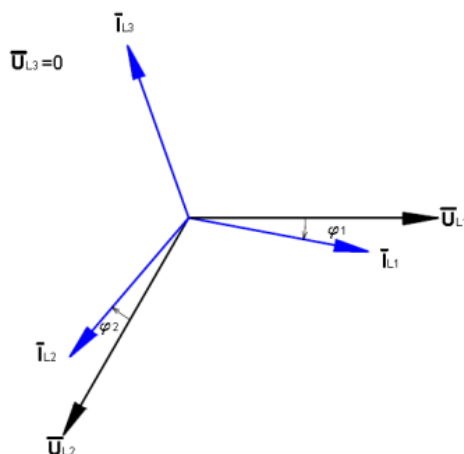
Napětí uzlu U_N je díky přímému spojení s uzlem zdroje vždy rovno nule a to i v případě poruchy (ztráty) napětí jedné nebo více fází. To znamená, že pro všechny fázory fázových

napětí U_{L1} , U_{L2} a U_{L3} na napěťových svorkách zkratovací svorkovnice a elektroměru platí [8][5]:

$$U_{LX} = U_{0LX} - U_N = U_{0LX} - 0 = U_{0LX} \quad (4.2.1)$$

Kde x 1,2,3 označení fáze,
 U_{0L} fázor napětí „zdroje“ napěťového měřicího obvodu.

Z uvedeného vztahu je zřejmé, že se při této poruše v nepostižených fázích velikost ani fázový posun napětí nezmění [5]. To dokládá Obr.17, kde je uveden příklad zobrazení fázorů při poruše napětí v L3 .



Obr. 17 Příklad uspořádání fázorů pro souměrně zatíženou soustavu při poruše napětí v L3 [5].

Nejčastější příčinou této poruchy je vybavení pojistky chránící napěťový obvod proti přetížení, rozpojená svorka v ZS nebo v ojedinělých případech přerušení vodiče propojovacího vedení. Charakteristickým znakem těchto závad je velikost napětí postižené fáze $U_{LX} \sim 0V$ při zachování velikosti jmenovité fázové hodnoty napětí a odpovídajícího úhlu fázového posuvu v nepostižených fázích (s respektováním povolené tolerance těchto hodnot). U nepřímých měřicích systémů může být příčinou nesprávné hodnoty velikosti napětí porucha primárního nebo sekundárního vinutí MTN, která se projeví:

- úplnou ztrátou funkce MTN ($U_{LX} \sim 0V$),
- nebo změnu transformačního poměru MTN ($0V < U_{LX} < 100 (110)V$).

Z charakteristických hodnot napětí pak můžeme sestavit algoritmus pro plošné vyhodnocení uvedených poruch. Pro stanovení referenčních hodnot sledovaného fázového napětí U_{Lx} musíme uvažovat i povolenou toleranci $\pm 10\%$ od jmenovitého fázového napětí U_n a tím z výběru odstranit změny ve velikosti napětí způsobené provozním stavem měřené soustavy:

$$(U_{L1} < 0,9 \cdot U_n) \vee (U_{L2} < 0,9 \cdot U_n) \vee (U_{L3} < 0,9 \cdot U_n) \quad (4.2.2)$$

- pro polopřímé měřicí systémy připojené k měřené soustavě nn:

$$(U_{L1} < 207V) \vee (U_{L2} < 207V) \vee (U_{L3} < 207V) \quad (4.2.3)$$

- pro nepřímé měřicí systémy připojené k měřené soustavě vvn přes MTN s převodem $x/100$:

$$(U_{L1} < 51 V) \vee (U_{L2} < 51 V) \vee (U_{L3} < 51 V) \quad (4.2.4)$$

Algoritmus pro vyhodnocení úhlu fázového posunu φ_{ULX} zohledňuje souměrné rozložení vektorů napětí pro nastavení rotace třífázového pole protisměru hodinových ručiček (levotočivé) :

$$(\varphi_{UL1} <> 0^\circ) \vee (\varphi_{UL2} <> 240^\circ) \vee (\varphi_{UL3} <> 120^\circ) \quad (4.2.5)$$

V algoritmu je možné připustit i určitou toleranci odchylky od jmenovité hodnoty fázového úhlu a tím z výběru vyloučit chybu v přesnosti měření a drobné odchylky způsobené provozním stavem měřené sítě. Toleranci je vhodné nastavit podle možností použitého elektroměru a konkrétní měřené sítě. Ze zkušeností z reálném provozu vyhovuje tolerance v rozmezí $\pm 5^\circ$.

U napěťových měřicích obvodů nepřímých měřicích systémů určených pro třívodičové připojení elektroměru podle Aronova zapojení *Obr.10* je poruchou v dané fázi změněna velikost i fázový posun napětí v nepostižených fázích[5]. Napěťový obvod lze charakterizovat jako symetricky napájenou trojfázovou soustavu se zátěží zapojenou do trojúhelníka (bez vyvedeného středního vodiče) o velikosti sdruženého napětí 100V. Připojením elektroměru k napěťovému obvodu se změní zapojení zátěže do otevřeného trojúhelníka („V“) se středem

v L2 a vzájemným fázovým posuvem fázorů sdruženého napětí 60°. Spojením fáze L2 je napětí uzlu U_N rovno napětí U_{L2} ($U_{L2} \angle 120^\circ$). Pro fázory sdružených napětí U_{L12} a U_{L32} na svorkách připojeného elektroměru v bezporuchovém stavu platí [5][8]:

$$U_{L12} = U_{0L1} - U_{L2} = U_{L12} \angle 30^\circ \tag{4.2.6}$$

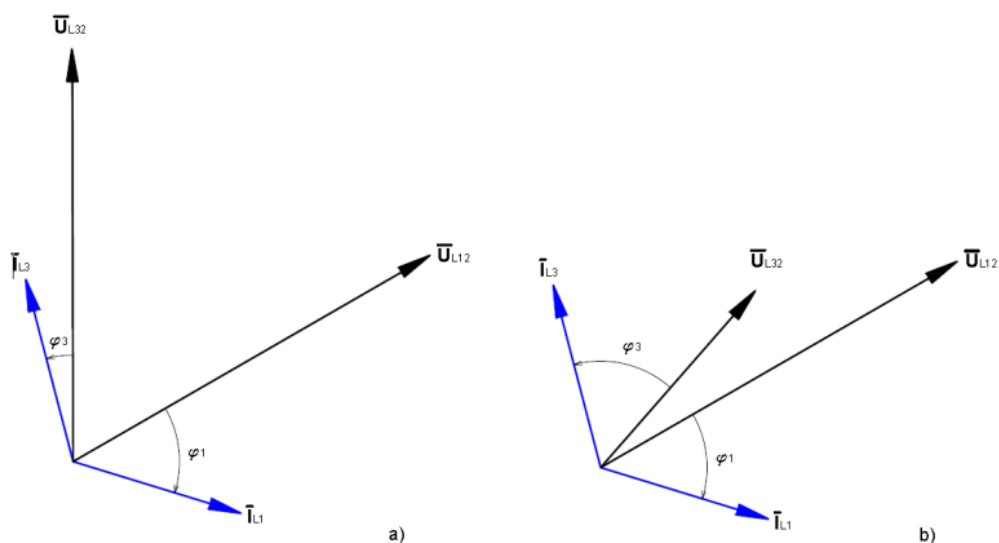
$$U_{L32} = U_{0L3} - U_{L2} = U_{L32} \angle 90^\circ \tag{4.2.7}$$

Při poruše jedné z krajních fází, například v L3 ($U_{0L3} = 0$), se na svorkách elektroměru změní velikost a fázový posun napětí U_{L32} . Tato změna je popsána rovnicí [5][8]:

$$U_{L12} = U_{0L1} - U_{L2} = \frac{100}{\sqrt{3}} \angle 0^\circ - \frac{100}{\sqrt{3}} \angle -120^\circ = 100 \angle 30^\circ V \tag{4.2.8}$$

$$U_{L32} = 0 - U_{L2} = 0 - \frac{100}{\sqrt{3}} \angle -120^\circ = \frac{100}{\sqrt{3}} \angle 60^\circ V \tag{4.2.9}$$

Změnu velikosti a fázového úhlu vektorů napětí před a při poruše je možné porovnat z fázorového diagramu na Obr. 18.



Obr. 18 Fázorový diagram před poruchou a) a při poruše napětí v L3 b). Převzato z[5].

V případě poruchy napětí ve fázi L2, kdy dochází k přerušení přímého spojení napětí U_{L2} se středním uzlem zátěže je za předpokladu $Y_{L2}=0$ a $Y_N=0$ $Y_{L1}= Y_{L3}= Y$ fázor napětí U_N roven [5][8]:

$$U_N = \frac{U_{0L1} \cdot Y + U_{0L3} \cdot Y}{2 \cdot Y} = \frac{\frac{100}{\sqrt{3}} \angle 0^\circ + \frac{100}{\sqrt{3}} \angle 120^\circ}{2} = \frac{100}{2\sqrt{3}} \angle 60^\circ = 28,85 \angle 60^\circ V \quad (4.2.10)$$

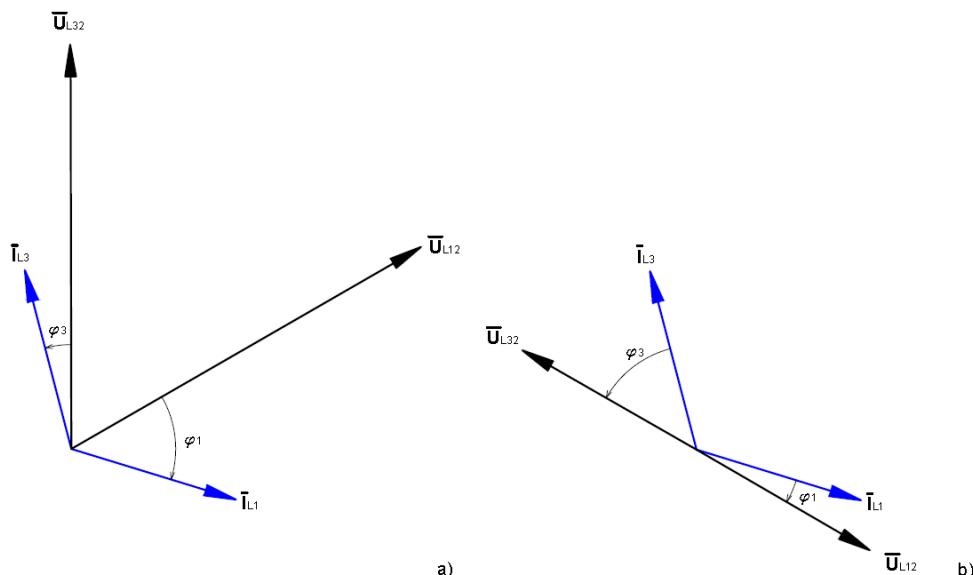
Kde Y je admitance jednotlivých fází.

Fázory sdružených napětí na svorkách elektroměru U_{L12} a U_{L32} po dosazení U_N do rovnice (4.2.6) a (4.2.7) změni svoji velikost i fázový posun[5][8]:

$$U_{L12} = \frac{100}{\sqrt{3}} \angle 0^\circ - \frac{100}{2\sqrt{3}} \angle 60^\circ = 50 \angle -30^\circ V \quad (4.2.11)$$

$$U_{L32} = \frac{100}{\sqrt{3}} \angle 120^\circ - \frac{100}{2\sqrt{3}} \angle 60^\circ = 50 \angle 150^\circ V \quad (4.2.12)$$

Na Obr. 19 je možné porovnat vypočtenou změnu rozložení vektorů napětí před a při poruše napěťového obvodu v L2.

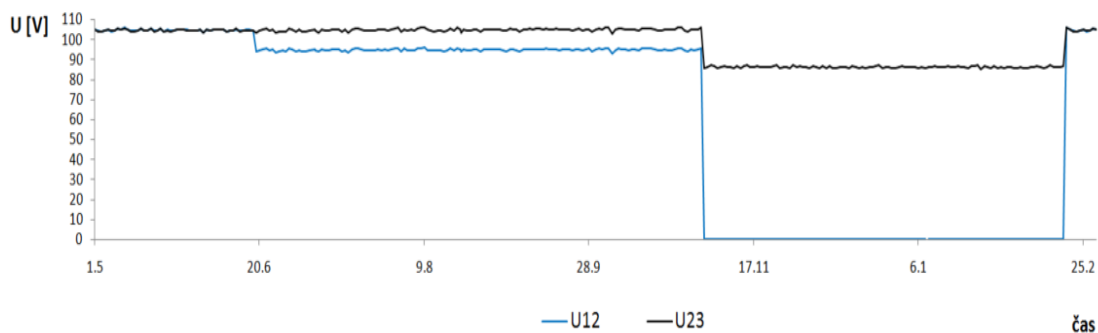


Obr. 19 Fázorový diagram před poruchou a) a při poruše napětí v L2 b) [5].

Uvedená analýza přímo definuje velikost a fázový úhel referenční hodnoty pro U_{L12} a U_{L23} , která odpovídají postižené části napěťového obvodu. Toho je možné využít při plánování následné opravy, především u rozvodných zařízeních, kde je pro odstranění závady nutná demontáž části vn rozvaděče.

Pro stanovení referenční hodnoty algoritmu plošného vyhodnocení poruchy musíme vzít v úvahu velikost napětí při poruše primární vn pojistky MTN, kterými jsou vybaveny některé

typy měřící transformátorů, nebo jsou těmto MTN předřazeny [5]. Při vybavení pojistky v některých případech, jak ukázala praxe, nedojde k okamžitému přerušení napěťového obvodu. Vlivem konstrukce dojde k hoření oblouku, který způsobí úbytek napětí na pojistce. Charakteristický průběh napětí při této poruše je uveden na Obr.12. Naměřené hodnoty velikosti napětí jsou pak obvykle vyšší než spodní toleranční mez jmenovitého napětí.



Obr. 20 Charakteristický průběh napětí měřícího obvodu při poruše vn pojistky MTN.

Z uvedeného důvodu je potřeba nastavit hodnotu referenčního napětí vyhodnocovacího algoritmu vyšší než je spodní mez povolené tolerance $\pm 10\%$:

$$(U_{L12} < 0,95 \cdot U_n) \vee (U_{L23} < 0,95 \cdot U_n) \tag{4.2.13}$$

Toleranční hodnota 5% je stanovena empiricky z hodnot napětí naměřených při vzniku této poruchy.

Vyšší citlivostí algoritmu naroste počet vybraných nevyhovujících měřících systémů, ale zároveň se zvýší pravděpodobnost včasného odhalení vzniklé závady. Zachováním dovolené tolerance na hodnotě $\pm 10\%$ nemusí být tato závada identifikována i několik měsíců jak dokládá časová osa na Obr.20.

Pokud jsou měřící systémy osazeny elektroměry umožňující měření fázového úhlu sdružených napětí [11][13], je možné i u těchto systémů vytvořit algoritmus pro plošné vyhodnocení úhlu fázového posuvu:

$$(\varphi_{UL12} <> 0^\circ) \vee (\varphi_{UL32} <> 60^\circ) \tag{4.2.14}$$

Tato podmínka platí pro úhly vztažené k referenčnímu sdruženému napětí U_{L12} tzn. všechny fázory $U_{L12, L32}$ a $I_{L1, L3}$ posunutě o -30° proti základnímu fázorovému diagramu uvedeném na *Obr.8*.

4.3 Referenční parametry pro diagnostiku proudového obvodu měřicího systému

Poruchy, které mohou vzniknout v proudovém obvodu měřicího systému se projeví změnou dvou základních parametrů:

- změnou velikosti nebo nulovou hodnotou měřeného proudu,
- změnou úhlu fázového posuvu mezi napětím a proudem.

Chybná velikost proudu v proudovém obvodu měřicího systému může být způsobena poruchou primárního nebo sekundárního vinutí MTP, zkratováním nebo přerušením proudového obvodu.

Pro diagnostiku poruchy MTP, která způsobí pouze změnu velikosti proudu, je nutné porovnat skutečnou velikost proudu v měřené soustavě s velikostí proudu tekoucím v měřicím obvodu. To je možné provést běžnými měřicími prostředky (klešťovými ampérmetry) pouze u polopřímých měřicích systémů na hladině nn. V soustavách vn a vvn to z důvodu bezpečnosti není možné, proto se ve většině těchto případů závada diagnostikuje ověřením MTP v autorizovaném metrologickém středisku.

Možnost vyhodnocení poruchy v proudovém obvodu je tak omezena pouze na závady, které způsobí nulovou hodnotu velikosti proudu (přerušení vinutí MTP, přerušení nebo zkratování proudového obvodu). Navržený algoritmus pro plošné vyhodnocení těchto závad vychází z předpokladu malé nesouměrnosti zatížení měřené soustavy, kterou lze u OPM s nepřímým měřením předpokládat a také z pravděpodobnosti výskytu poruchy pouze v jedné fázi:

$$\begin{aligned} & ((I_{L1} = 0A) \wedge (I_{L2} > 3A) \wedge (I_{L3} > 3A)) \\ & \vee ((I_{L1} > 3A) \wedge (I_{L2} = 0A) \wedge (I_{L3} > 3A)) \\ & \vee ((I_{L1} > 3A) \wedge (I_{L2} > 3A) \wedge (I_{L3} = 0A)) \end{aligned} \tag{4.3.1}$$

Navržený algoritmus by měl vybrat měřicí systémy, u nichž byla naměřena nulová hodnota proudu pouze v jedné fázi při současném velkém zatížení zbylých dvou fázích. Nastavení citlivosti algoritmu je možné provést pro vybranou skupinu měřicích systémů změnou referenční hodnoty parametru proudu. Navržený algoritmus s referenční hodnotou 3A platí pro třísystémové - čtyřvodičově připojené systémy s převodem MTP $x/5$. Pro měřicí systémy s převodem MTP $x/1$ by se volila hodnota úměrná tomuto převodu. Pro vyhodnocení dvousystémových - třívodičově připojených systémů by se algoritmus upravil pouze pro vyhodnocení velikosti proudu v krajních fázích L1 a L3.

Nejčastější příčinou změny velikosti úhlu fázového posuvu mezi napětím a proudem je chyba v zapojení proudového měřicího obvodu. Chyba může vzniknout nedodržením stejného sledu fází proudového a napěťového obvodu nebo nedodržením správné polaritě připojení MTP. Případně současnou kombinací obou případů [5].

V reálném provozu měřicích systémů je velikost naměřeného úhlu fázového posuvu mezi napětím a proudem závislá na velikosti účinníku, s jakým je v daném OPM odebírána elektrická energie. A na směru toku energie u OPM typu výroba a spotřeba. Velikost úhlů se při plošném sledování může pohybovat v celém rozsahu od 0° do 360° . Z tohoto důvodu není možné jednoznačně stanovit algoritmus pro plošné vyhodnocení chyby v zapojení proudového měřicího obvodu a diagnostiku je tak nutné řešit individuálně pro každý měřicí systém samostatně.

4.4 Matematický model pro analýzu chybného zapojení měřicích obvodů

Pro optimální provedení diagnostiky chybného zapojení proudového měřicího obvodu jsem vytvořil jednoduchý výpočtový matematický model v aplikaci Microsoft EXCEL pro obě varianty měřicích systémů:

- třísystémové - čtyřvodičově připojené měřicí systémy,
- dvousystémové - třívodičově připojené měřicí systémy (Aronovo zapojení).

Při respektování transformačního poměru (2.3) instalovaných MT je možné matematický model použít pro analýzu na primární i sekundární straně MT.

Vstupní parametry matematického modelu jsou následující:

- U_{LX} velikost napětí v jednotlivých fázích,
- φ_{UX} úhel fázového posuvu napětí v dané fázi,
- I_X velikost proudu v jednotlivých fázích,
- φ odhadovaná velikost úhlu fázového posuvu proudu odpovídající účinníku ($-\varphi$ pro induktivní účinník, $+\varphi$ pro kapacitní účinník).

Vstupní parametry můžeme odečíst z instalovaného elektroměru. Nebo je odečteme například pomocí měřicího etalonu připojeného v konkrétní části analyzovaného proudového obvodu měřicího systému. Při řešení chybného zapojení proudového obvodu musíme hodnotu úhlu φ v prvním kroku odhadnout tak, aby se co nejvíce blížila reálné hodnotě účinníku. To je možné například ze zobrazeného vektorového diagramu. Nebo je-li to možné odečíst z regulátoru kompenzace instalované v OPM.

Prvním krokem společným pro oba matematické modely je výpočet hodnoty úhlu fázového posuvu proudu φ_{IX} pro každou variantu chybného zapojení proudového obvodu (kombinace U_x a I_x (- I_x). Výpočet vychází z předem definované velikosti úhlu fázového posuvu φ_{I-CHX} pro obě polarity (oba směry) proudu vzniklé záměnou vstupních a výstupních svorek připojených MTP, elektroměru nebo ZS a odhadovaného úhlu φ odpovídajícího účinníku odebíraného proudu:

$$\varphi_{IX} = \varphi_{I-CHX} + \varphi \quad (4.4.1)$$

Při správné polaritě proudu je φ_{I-CHX} definován pro: $I_1 = 0^\circ, I_2 = 240^\circ, I_3 = 120^\circ$.

Při obrácené polaritě proudu je φ_{I-CHX} definován pro: $-I_1 = 180^\circ, -I_2 = 60^\circ, -I_3 = 300^\circ$.

V modelu pro Aronovo zapojení jsou varianty chybného zapojení definovány pouze pro proudové obvody v krajních fázích L1 a L3.

Matematický model třísystémového - čtyřvodičově připojeného měřicího systému pak provede pro každou fázi následující výpočty:

Pro úhel fázového posuvu φ_{UX-IX} mezi napětím a proudem platí:

$$\varphi_{UX-IX} = \varphi_{UX} - \varphi_{IX} \quad (4.4.2)$$

Pro činný výkon dané fáze P_{LX} platí:

$$P_{LX} = U_{LX} \cdot I_{LX} \cdot \cos \varphi_{UX-IX} \quad (4.4.3)$$

Pro jalový výkon Q_X platí:

$$Q_X = U_X \cdot I_X \cdot \sin \varphi_{UX-IX} \quad (4.4.4)$$

Z výkonů v jednotlivých fázích pak model vypočte celkový výkon měřené soustavy ve dvou variantách:

- Pro variantu prostého součtu - saldo:

$$P = P_{L1} + P_{L2} + P_{L3} \quad (4.4.5)$$

$$Q = Q_{L1} + Q_{L2} + Q_{L3} \quad (4.4.6)$$

- Pro variantu s vyhodnocením toku činného výkonu v jednotlivých fázích pro oba směry - oddělenými součty:

$$+P = |+P_{L1}| + |+P_{L2}| + |+P_{L3}| \quad (4.4.7)$$

$$-P = |-P_{L1}| + |-P_{L2}| + |-P_{L3}| \quad (4.4.8)$$

Matematický model dvousystémového - třívodičově připojeného měřicího systému provede výpočty výstupních hodnot samostatně pro sdružená napětí U_{L12} a U_{L32} a fázové proudy I_1 a I_3 .

V prvním kroku je spočítán úhel fázového posuvu $\varphi_{UL12-I1}$ a $\varphi_{UL32-I3}$ mezi sdruženým napětím a fázovým proudem:

$$\varphi_{UL12-I1} = \varphi_{UL12} - \varphi_{I1} \quad (4.4.9)$$

$$\varphi_{UL32-I3} = \varphi_{UL32} - \varphi_{I3} \quad (4.4.10)$$

Dále je postupně spočítán činný výkon P_1 , P_3 a celkový výkon P :

$$P_1 = U_{L12} \cdot I_{L1} \cdot \cos(\varphi_{UL12-I1}) \quad (4.4.11)$$

$$P_3 = U_{L32} \cdot I_{L3} \cdot \cos(\varphi_{UL32-I3}) \quad (4.4.12)$$

$$P = P_1 + P_3 \quad (4.4.13)$$

Následně je dopočítán jalový výkon Q_1 , Q_3 a celkový výkon Q :

$$Q_1 = U_{L12} \cdot I_{L1} \cdot \sin(\varphi_{UL12-I1}) \quad (4.4.14)$$

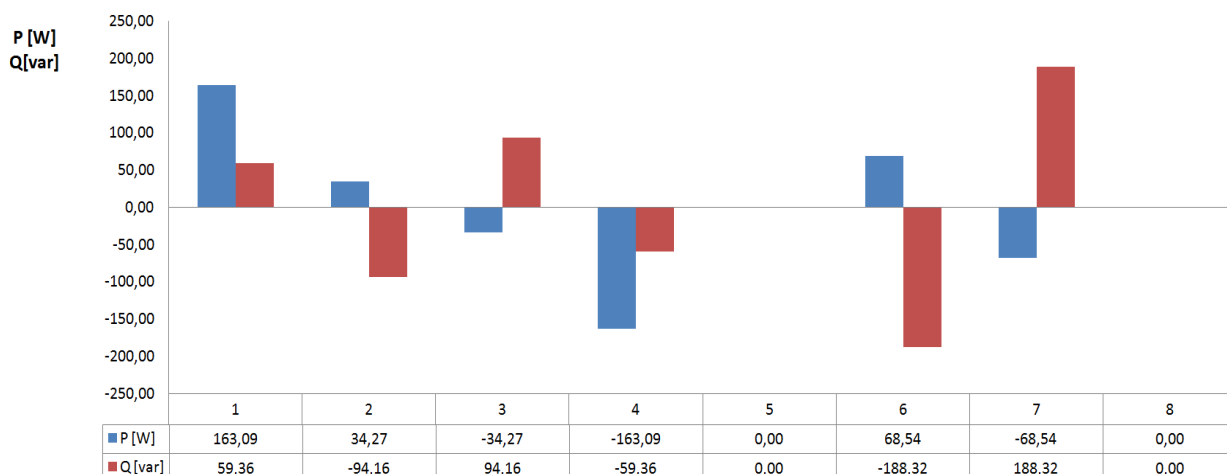
$$Q_3 = U_{L32} \cdot I_{L3} \cdot \sin(\varphi_{UL32-I3}) \quad (4.4.15)$$

$$Q = Q_1 + Q_3 \quad (4.4.16)$$

Výstupem matematického modelu je soubor níže uvedených hodnot spočítaných pro každou variantu chybného zapojení:

- P_x, Q_x činný a jalový výkon dané fáze,
- P, Q celkový činný a jalový výkon respektující algoritmus součtu energie - v sumě a po jednotlivých fázích,
- φ_{IX} výsledný úhel fázového posuvu daného proudu v jednotlivých fázích,
- φ_{UX-IX} výsledný úhel fázového posuvu mezi napětím a proudem dané fáze.

Z graficky zobrazených hodnot činného a jalového výkonu uvedeného na *Obr.21* lze vysledovat pro každou z variant chybného zapojení charakteristický poměr velikostí činného a jalového výkonu.



Obr. 21 Grafické zobrazení charakteristických výkonů pro varianty chybného zapojení.

Toho jsem se pokusil využít k identifikaci chybného zapojení měřící soupravy a sestavil jsem pro tento účel následující postup:

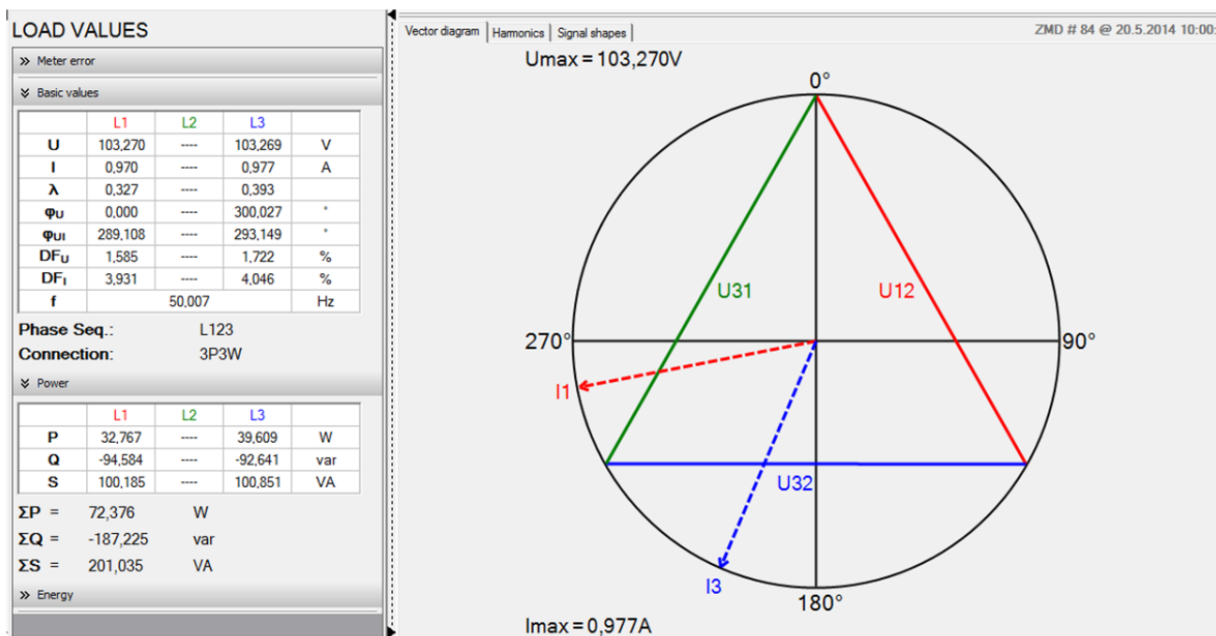
Po zadání vstupních parametrů z konkrétního diagnostikovaného obvodu matematický model vypočítá výsledné výstupní hodnoty a zobrazí je ve formě tabulky. Porovnáním charakteristických hodnot činného a jalového výkonu s naměřenými hodnotami nalezneme variantu s nejvyšší shodou - tato varianta pak odpovídá chybné kombinaci zapojení vodičů proudového obvodu proti napěťovým vstupům. Příklad diagnostického postupu pro Aronovo zapojení jsem uvedl v Tabulce 2.

Tabulka 2 Výstupní hodnoty matematického modelu pro Aronovo zapojení.

Vstupní parametr	U_{L12} [V]	$\varphi_{U_{L12}}$ [°]	U_{L32} [V]	$\varphi_{U_{L32}}$ [°]	I_1 [A]	I_3 [A]	φ [°]
	103,3	30	103,3	90	0,97	0,97	-20

Varianta zapojení	Systém U1	Systém U3	φ_{i1} [°]	φ_{i3} [°]	$\varphi_{U_{12-11}}$ [°]	$\varphi_{U_{32-13}}$ [°]	P_{L1} [W]	P_{L3} [W]	P [W]	Q_{L1} [var]	Q_{L3} [var]	Q [var]
1	I1	I3	-20	100	50	-10	64,41	98,68	163,09	76,76	-17,40	59,36
nalezená varianta chybného zapojení	I1	I3	160	100	-130	-10	-64,41	98,68	34,27	-76,76	-17,40	-94,16
	I1	-I3	-20	280	50	-190	64,41	-98,68	-34,27	76,76	17,40	94,16
5	I1	-I3	160	280	-130	-190	-64,41	-98,68	-163,09	-76,76	17,40	-59,36
	I1	I1	100	-20	-70	110	34,27	-34,27	0,00	-94,16	94,16	0,00
6	I3	-I1	100	160	-70	-70	34,27	34,27	68,54	-94,16	-94,16	-188,32
7	-I3	I1	280	-20	-250	110	-34,27	-34,27	-68,54	94,16	94,16	188,32
8	-I3	-I1	280	160	-250	-70	-34,27	34,27	0,00	94,16	-94,16	0,00

Výsledek jsem porovnal s naměřenými hodnotami v chybně zapojeném měřicím obvodu. Modelem nalezená varianta a skutečné chybné zapojení obvodu se shodovalo.



Obr. 22 Protokol diagnostiky potvrzující chybné zapojení měřicího obvodu v Aronově provedení.

Další příklady pro oba navržené typy matematického modelu jsem uvedl v Příloze.

Navržená metoda není univerzální, není například vhodná pro diagnostiku měřicích obvodů s velmi odlišným účínkem jednotlivých fází.

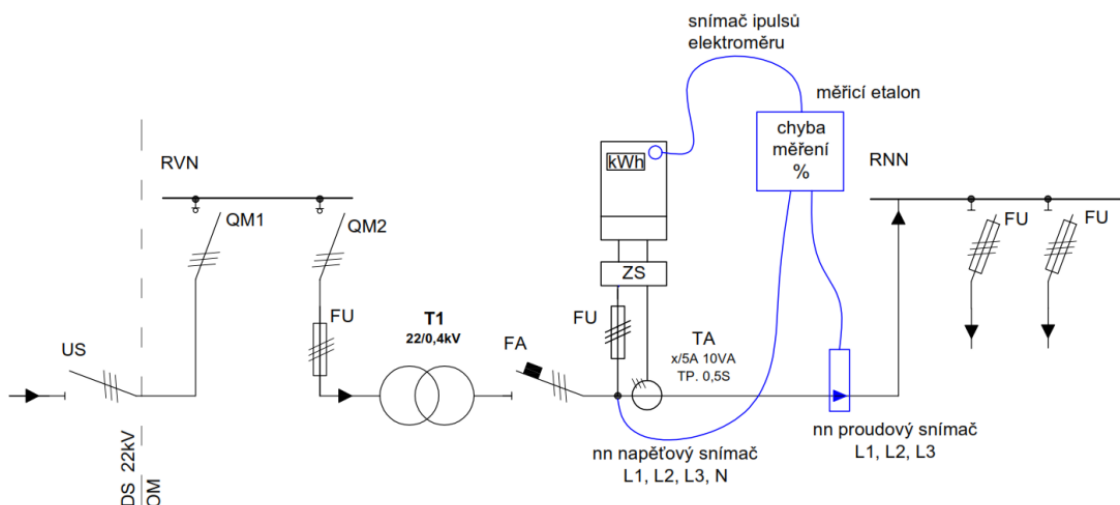
Pokud pro nalezení schody není dostatečné zobrazení celkových výkonů je možné varianty vyhodnocovat i porovnáním výkonů v jednotlivých fázích.

4.5 Diagnostika metodou porovnáním naměřené energie

Princip používané diagnostické metody je založený na vyhodnocení rozdílu v naměřené elektrické energii nepřímým měřicím systémem a kontrolním měřicím etalonem [14] (například WS2320 Applied Precision nebo ZERA GmbH MT310). Touto metodou lze u polopřímých měřicích systémů nn identifikovat závadu vzniklou v celém rozsahu měřicího

systému. To znamená, že se současně ověří funkce MTP, propojovacího vedení (včetně ZS) a elektroměru.

Měřicí etalon je připojen k měřené soustavě nn v každé fázi prostřednictvím proudového (klešťové měřicí transformátory, Rogowského cívky) a napěťového snímače. Energie naměřená elektroměrem je snímána prostřednictvím výstupních impulsů nebo impulsů metrologického optického rozhraní. Schéma principu je uvedeno na Obr.23.



Obr. 23 Princip diagnostiky polopřímých měřicích systémů metodou porovnání naměřené energie.

Vyhodnocení diagnostiky je provedeno na základě chyby v množství naměřené energie:

$$\pm\delta = \left(\frac{A_{ELM}}{A_{ETALON}} - 1 \right) \cdot 100 [\%] \quad (4.5.1)$$

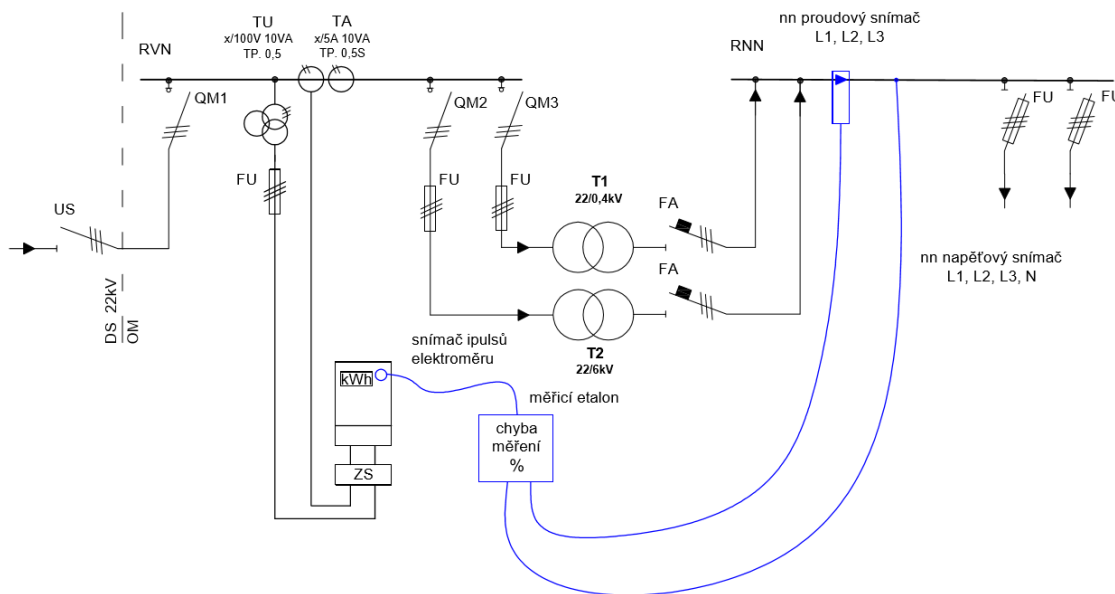
Kde $\pm\delta$ průměrná chyba naměřené energie v daném časovém intervalu,

A_{ELM} energie naměřená elektroměrem,

A_{ETALON} energie naměřená referenčním etalonem.

Vyhodnocená chyba by neměla u funkčního měřicího systému, při odpovídajícím zatížení měřené soustavy, překročit požadovanou přesnost kladenou na měřicí systém tj. $\pm 1\%$ činné energie [1].

Aplikaci popsané metody lze za určitých podmínek rozšířit i na měřicí systémy primárního měření na hladině vn. Podmínkou je zapojení pouze jednoho silového transformátoru, nebo i více silových transformátorů připojených paralelně do jednoho místa přípojnice nn rozvaděče. Tak aby proudové snímače připojeného měřicího etalonu mohli měřit celkový výkon dodávaný silovými transformátory. Princip takového zapojení je naznačen Obr.24.



Obr. 24 Princip diagnostiky metodou porovnání naměřené energie aplikovaný na primární měřicí systémy vn.

Etalonem naměřená chyba energie se v tomto případě zvětší o ztráty energie na silovém transformátoru W_z , která je dána:

$$W_z = \left(\Delta P_o + \Delta P_k \cdot \left(\frac{S}{S_n} \right)^2 \right) \cdot T_m \quad (4.5.2)$$

- Kde S_n jmenovitý výkon transformátoru,
 S zatížení transformátoru $S = \sqrt{P^2 + Q^2}$,
 ΔP_o jmenovité ztráty transformátoru naprázdno,
 ΔP_k jmenovité ztráty transformátoru nakrátko,
 T_m doba měření.

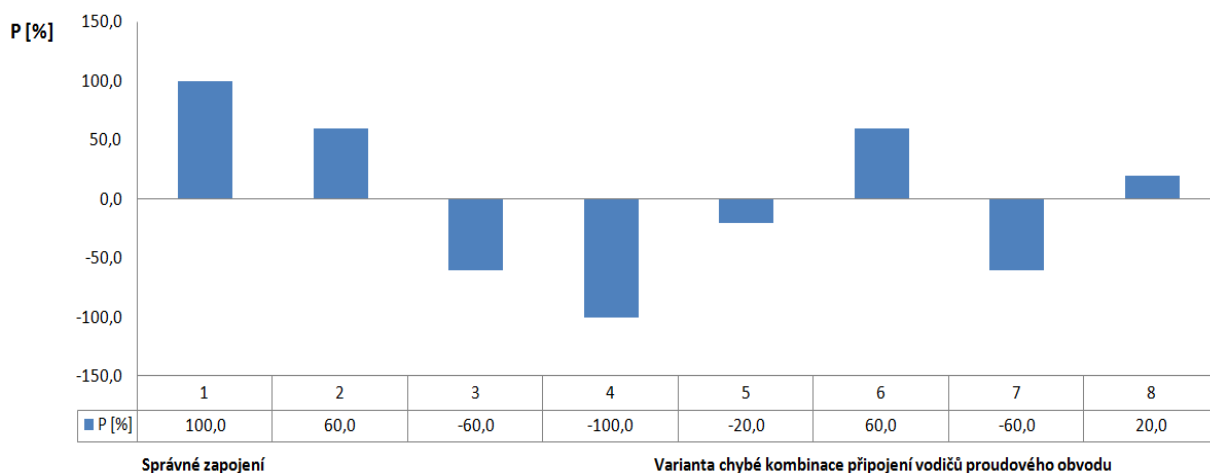
Procentní vyjádření w_z [%] ztrátové energie odpovídá procentu minimální chyby, se kterou je nutné při vyhodnocení diagnostiky počítat:

$$w_z = \frac{W_z}{A} \cdot 100 \text{ [%]} \tag{4.5.3}$$

Kde A činná energie naměřená elektroměrem.

Z uvedeného výpočtu je zřejmé, že hodnota ztrát je závislá na štítkových parametrech a aktuálním zatížení transformátoru. Tyto parametry však nemusí být vždy při provádění diagnostice k dispozici.

Z výsledku analýzy činného výkonu zobrazeného v grafu na Obr.25, kterou jsem provedl s pomocí matematického modelu pro všechny možné varianty chybného zapojení měřicího systému lze s určitou rezervou stanovit minimální chybu $\pm 10\%$, kterou je možné při aplikaci diagnostiky chybného zapojení tolerovat i bez výpočtu skutečných ztrát na silovém transformátoru. To znamená, pokud nebude naměřená chyba větší než stanovená mez, lze chybné zapojení měřicího systému vyloučit.



Obr. 25 Poměr spočítaných činných výkonů pro varianty chybného zapojení dvousystémového - trojvodičově připojeného měřicího systému pro zadaný parametr účinníku $\cos \varphi = 0,8$ a zvolenou nesouměrností fázových proudů 50%.

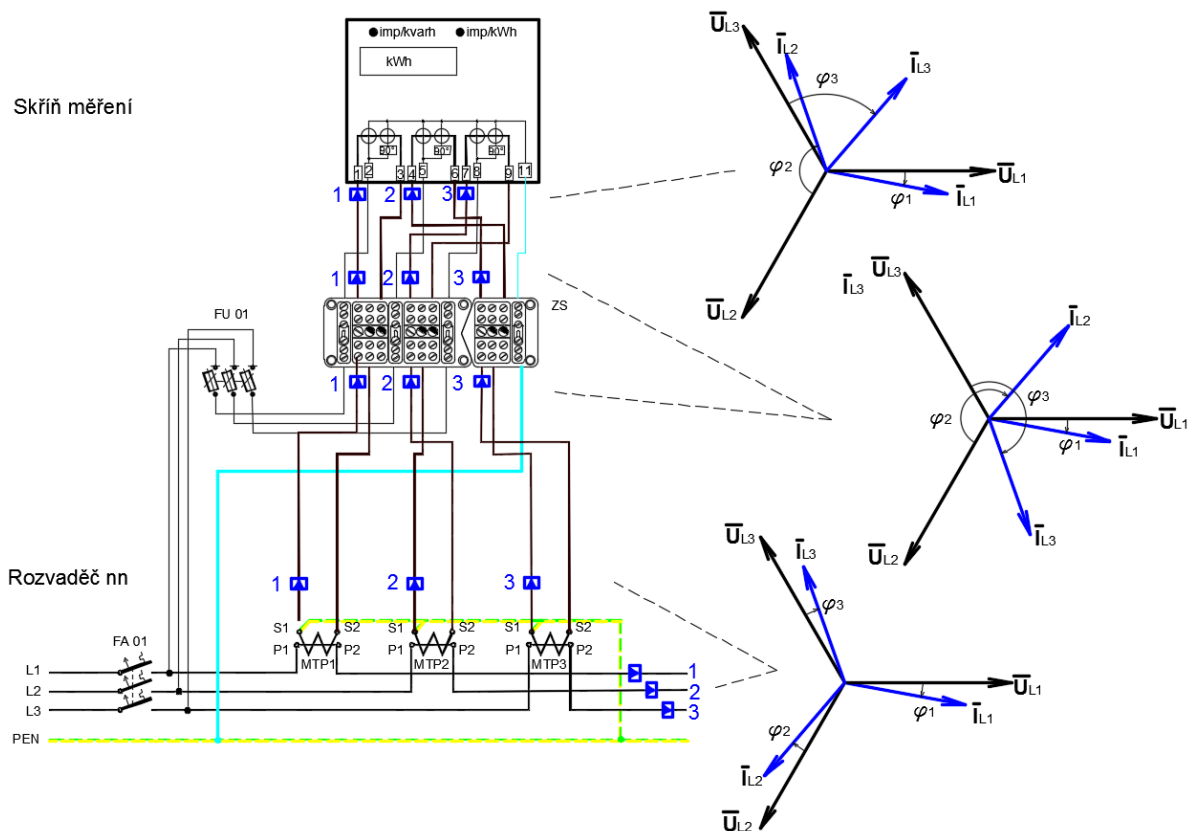
S využitím matematického modelu lze, pro konkrétní vstupní hodnoty, přesně spočítat změny výkonu pro jednotlivé varianty chybného zapojení a tím tolerovanou mez upřesnit.

4.6 Diagnostika zapojení měřicího obvodu metodou analýzy vektorového diagramu

Další možností, jak diagnostikovat chybu v zapojení měřicího obvodu bez omezení dodávky elektrické energie do OPM, je zobrazení a vzájemné porovnání vektorových diagramů naměřených v jednotlivých částech propojovacího vedení.

Pro diagnostiku zapojení měřicího obvodu polopřímých měřicích systémů je výhodou možnost zobrazení referenčního vektorového diagramu přímo v silové části měřené soustavy a tím ověřit i správnou polaritu připojení MTP. Díky možnosti porovnat vektorové diagramy s diagramem skutečného zatížení je provedení diagnostiky nezávislé na směru toku proudu, na jeho souměrnosti a velikosti účinníku odebírané elektrické energie. Při použití více přístrojů pro současné zobrazení vektorů není metoda závislá ani na dynamicky se měnícím zatížení.

Princip metody je patrný ze schéma uvedeném na *Obr.26*. V prvním kroku je potřeba nejprve ověřit sled fází napěťového měřicího obvodu (např. zkoušečkou napětí) a tím stanovit referenční označení jednotlivých fází L1, L2 a L3, které musí být zachováno pro měření ve všech místech proudového obvodu. Druhou podmínkou je pak respektování stejného směru proudu připojovaných proudových snímačů měřicího etalonu.



Obr. 26 Princip diagnostiky provedené srovnáním vektorových diagramů

Na příkladu je zobrazeno chybné zapojení ve více částech měřicího obvodu. Pro identifikaci takového chybného zapojení v celém jeho rozsahu je nutné provést postupné vzájemné srovnání vektorových diagramů ve všech vyznačených místech proudového obvodu. Nejlépe vždy u vstupní svorky připojeného přístroje (MTP, ZS, ELM). Jak je vidět na příkladu, ne všechny kombinace srovnání vektorového diagramu vedou k odhalení závady.

Vyhovujícím výsledkem diagnostiky je shoda zobrazených vektorových diagramů ve všech vyznačených částech diagnostikovaného proudového měřicího obvodu.

S použitím matematického modelu lze diagnostiku zapojení měřicího obvodu aplikovat i na nepřímé měřicí systémy vn a vvn. Výpočet matematického modelu provedený pro nepřístupnou silovou část soustavy slouží jako referenční hodnoty pro porovnání naměřených vektorových diagramů v sekundární části MTP.

4.7 Základní kontrola obvodu měřicího systému

Základní kontrola měřicího systému se uplatní v případech, kdy není možné provedení nebo vznikne velká nejistota při vyhodnocení výsledků výše popsaných diagnostických prostředků. Zároveň je tato kontrola výchozí diagnostikou podmiňující uvedení nově instalovaných nebo rekonstruovaných měřicích systémů do provozu [3][4].

Základní kontrola se provádí pouze v zajištěném beznapěťovém stavu měřené soustavy, kdy jsou bezpečně zpřístupněny všechny části měřicího systému. Z tohoto důvodu je možné kontrolu aplikovat univerzálně pro všechny měřicí systémy instalované ve všech napěťových úrovních. Za těchto podmínek pak lze kontrolou ověřit:

- správnou polaritu primárního a sekundárního vinutí MT - vizuální kontrolu připojených svorek (P1 –P2/s1-s2),
- parametry MT - vizuální kontrolou technického stavu a štítkových údajů (jmenovitý převod, jmenovitá zátěž, třída přesnosti),
- správné zapojení a technický stav propojovacího vedení a zkušební svorkovnice měřicího systému - provedením zkoušky vodivosti při odpojených vodičích ze svorek MT a elektroměru.

V případě vyhovujících výsledků ve všech uvedených bodech kontroly je tak přetrvávající závada omezena na skrytou vadu MT, kterou je možné ověřit pouze v AMS.

5 Závěr

V úvodní části předkládané diplomové práce jsem, pro pochopení problematiky, popsal měřicí systémy nepřímého fakturačního měření používané pro měření spotřebované nebo dodané elektrické energie v distribučních sítích nízkého, vysokého a velmi vysokého napětí. Pro jednotlivé systémy jsem uvedl princip měření činného a jalového výkonu v trojfázových soustavách. Popsal jsem jejich provedení a parametry. Pro statické elektroměry instalované v těchto systémech jsem uvedl možnosti využití naměřených dat pro diagnostiku.

Hlavním úkolem diplomové práce bylo v rámci optimalizace diagnostiky poruchových stavů nepřímých měřicích systémů stanovit diagnostický proces umožňující plošné vyhodnocení náhodně vzniklých poruch měřicích systémů v běžném provozu. Dále pak pro tento proces stanovit referenční hodnoty pro vyhodnocení závad vznikajících v napěťovém a proudovém obvodu nepřímých měřicích systémů a na základě toho stanovit algoritmy pro plošnou lokalizaci závad prováděnou v datové centrále.

Pro stanovení referenčních hodnot v napěťovém obvodu jsem využil analýzu trojfázové soustavy při poruše. Výsledkem bylo stanovení typické velikosti napětí charakterizující danou poruchu napěťového obvodu.

Pro analýzu a stanovení parametrů proudového obvodu jsem vytvořil v aplikaci Microsoft EXCEL matematický model simulující změnu velikosti úhlu fázového posuvu mezi napětím a proudem pro vyhodnocení naměřeného činného a jalového výkonu. Tento postup jsem aplikoval pro různé varianty chybného zapojení vodičů proudového obvodu v třísystémovém - čtyřvodičově připojeném i dvousystémovém - třívodičově připojeném provedení.

Sestrojené matematické modely pro zadané vstupní parametry potvrdily charakteristické hodnoty činného a jalového výkonu pro jednotlivé varianty chybného zapojení, s nimiž je možné za specifikovaných podmínek vyhodnotit chybné zapojení proudového obvodu.

Výsledky obou matematických modelů jsem porovnal s naměřenými hodnotami při konkrétní poruše. Relativní shoda naměřených a vypočtených hodnot potvrdily možnost aplikace matematického modelu pro diagnostiku metodou zobrazení vektorového diagramu. Výhodou matematického modelu je především aplikace pro měřicí systémy na hladině vn a

vvn, kde není možnost srovnat diagnostikované hodnoty na primární a sekundární straně MTP.

Po ověření metody v běžném provozu a potvrzení její účinnosti by mohlo být účelné matematický model převést do sofistikovanějšího softwaru a porovnat tak přímé zobrazení vypočteného vektorového diagramu s automatickým vyhodnocením chybného zapojení.

6 Použitá literatura

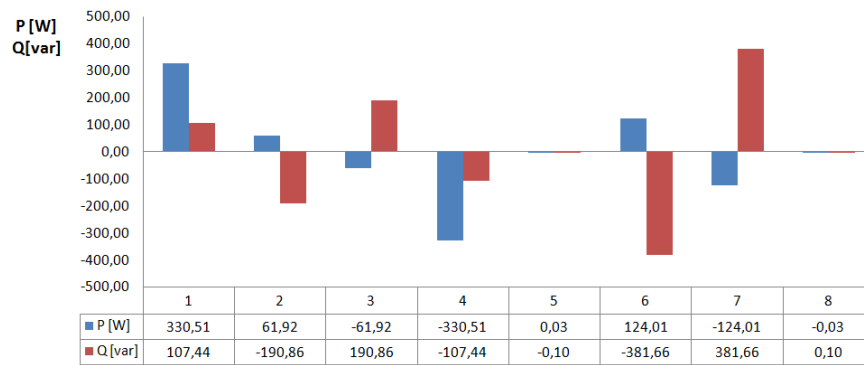
- [1] Vyhláška MPO 82/2011 o měření elektřiny a o způsobu stanovení náhrady škody při neoprávněném odběru, neoprávněné dodávce, neoprávněném přenosu nebo neoprávněné distribuci elektřiny. In: *Sb.* 2011.
- [2] Zákon č. 458/2000 Sb. o podmínkách a výkonu státní správy v energetických odvětvích a o změně některých zákonů (Energetický zákon). In: *Sb.* 2000.
- [3] *PŘIPOJOVACÍ PODMÍNKY PRO UMÍSTĚNÍ MĚŘICÍCH ZAŘÍZENÍ V ODBĚRNÝCH A PŘEDACÍCH MÍSTECH NAPOJENÝCH ZE SÍTÍ VN, VVN* [online]. Změna č. 2 k 4. 2. 2009. ČEZ Distribuce a.s. 2005 [cit. 2014-05-29]. Dostupné z: <http://www.cezdistribuce.cz/cs/technicke-informace/pripojovaci-podminky.html>.
- [4] *PŘIPOJOVACÍ PODMÍNKY NN: pro osazení měřicích zařízení v odběrných místech* [online]. změna č. 5 k 1. 4. 2011. ČEZ Distribuce a.s., 2005 [cit. 2014-05-29]. Dostupné z: <http://www.cezdistribuce.cz/cs/technicke-informace/pripojovaci-podminky.html>.
- [5] POLÍVKA, Pavel. *Nepřímé měřicí systémy fakturačního měření*. Plzeň, 2014. Bakalářská práce. ZČU Plzeň. Vedoucí práce Ing. Jana Jiříčková Ph.D.
- [6] Zákon č. 505/1990 Sb. Zákon o metrologii
- [7] TŮMOVÁ, Olga, Václav ČTVRTNÍK, Josef GIRG a Jiří ŠVARNÝ. *Elektrická měření- měřicí metody*. 2. vydání. Plzeň: Západočeská univerzita v Plzni, 2005. ISBN 80-7043-412-0.
- [8] BENEŠOVÁ, Zdeňka a Marcela LEDVINOVÁ. *Základy elektrických obvodů v příkladech*. 1. vydání-dotisk. Plzeň: Západočeská univerzita v Plzni, 2009. ISBN 978-80-7043-640-0.
- [9] MACHÁČEK, Cyril. *Elektroměry: Technika a praxe*. Brno: Elektrotechnický svaz československý, 1946.
- [10] Cenové rozhodnutí ERÚ č.8/2015, kterým se stanovují regulované ceny souvisejících s dodávkou elektřiny.
- [11] LANDIS+GYR AG. *E650 ZxDSeries 3 FunctionalDescription*. 2010.
- [12] LANDIS+GYR. *HIGH PRECISION METERING: USER MANUAL*. 2006.
- [13] ACTARIS SAS. *ELEKTROMĚR ACE SL7000: Návod k obsluze*. 2008.
- [14] Applied Precision. *WORKING STANDARD: Uživatelská příručka*. 2009.

7 Přílohy

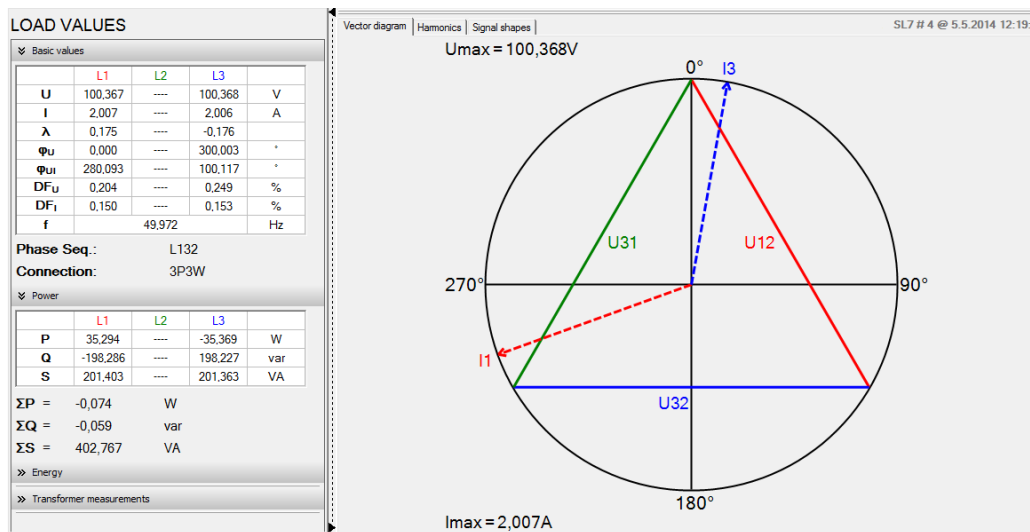
Tabulka P1 Matematický model pro dvousystémové - třívodičově připojené měřicí systémy zobrazující výsledky pro variantu chybného zapojení U1-I3, U3-I1

Vstupní parametry	U_{L12} [V]	$\varphi_{U_{L12}}$ [°]	U_{L32} [V]	$\varphi_{U_{L32}}$ [°]	I_1 [A]	I_3 [A]	φ [°]
	100	30	100	90	2,007	2,006	-18

Varianta zapojení	Systém U1	Systém U3	φ_{I1} [°]	φ_{I3} [°]	$\varphi_{U_{12-I1}}$ [°]	$\varphi_{U_{32-I3}}$ [°]	P_{L1} [W]	P_{L3} [W]	P [W]	Q_{L1} [var]	Q_{L3} [var]	Q [var]
1 - správné	I1	I3	-18	102	48	-12	134,29	196,22	330,51	149,15	-41,71	107,44
2	-I1	I3	162	102	-132	-12	-134,29	196,22	61,92	-149,15	-41,71	-190,86
3	I1	-I3	-18	282	48	-192	134,29	-196,22	-61,92	149,15	41,71	190,86
4	-I1	-I3	162	282	-132	-192	-134,29	-196,22	-330,51	-149,15	41,71	-107,44
5	I3	I1	102	-18	-72	108	62,02	-61,99	0,03	-190,88	190,78	-0,10
6	I3	-I1	102	162	-72	-72	62,02	61,99	124,01	-190,88	-190,78	-381,66
7	-I3	I1	282	-18	-252	108	-62,02	-61,99	-124,01	190,88	190,78	381,66
8	-I3	-I1	282	162	-252	-72	-62,02	61,99	-0,03	190,88	-190,78	0,10



Obr. P 1 Grafické zobrazení výkonů pro variantu chybného zapojení U1-I3, U3-I1

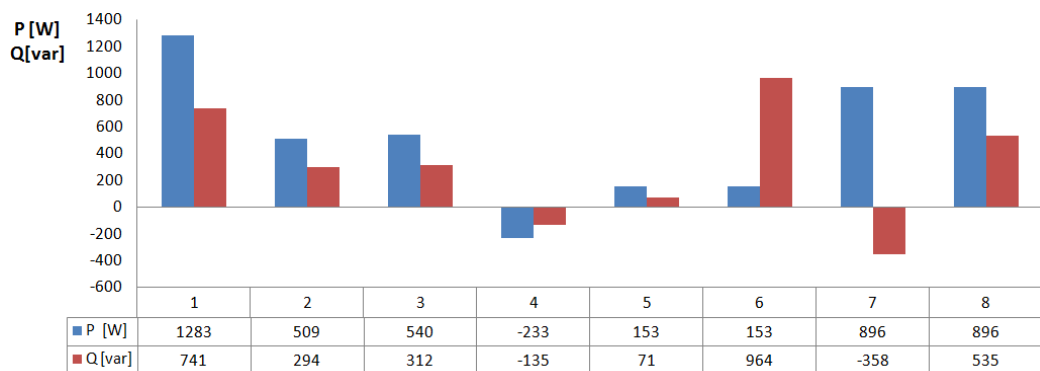


Obr. P 2 Protokol diagnostiky pro variantu chybného zapojení U1-I3, U3-I1

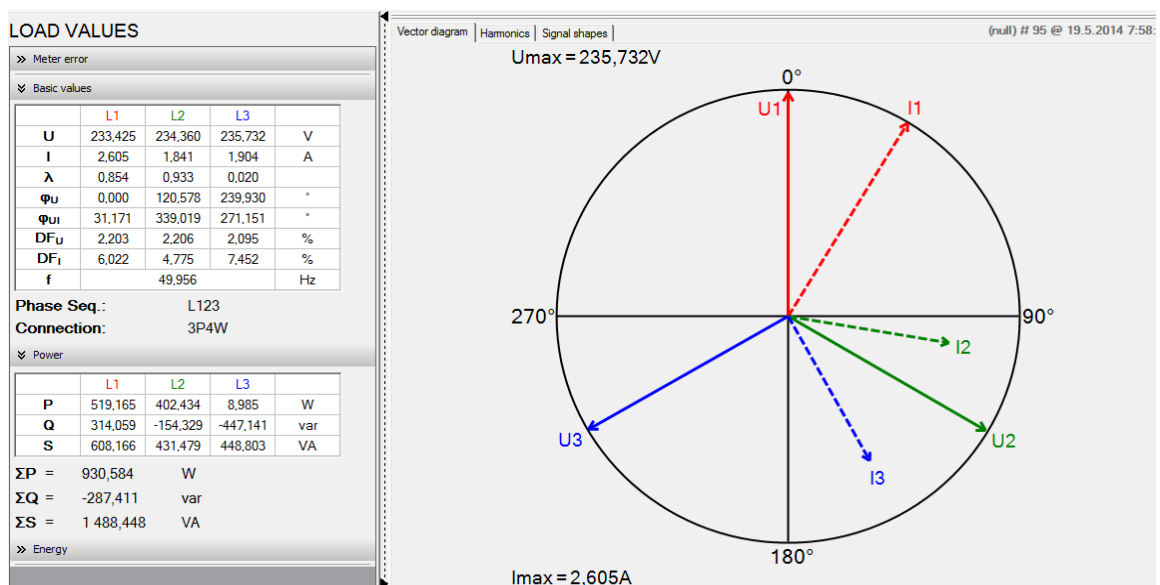
Tabulka P2 Matematický model pro třísystémové - čtyřvodičově připojené měřicí systémy zobrazující výsledky pro variantu chybného zapojení U1-I1, U2-(-I3),U3-I2

Vstupní parametry	U _{L1} [V]	φ _{U1} [°]	U _{L2} [V]	φ _{U2} [°]	U _{L3} [V]	φ _{U3} [°]	I ₁ [A]	I ₂ [A]	I ₃ [A]	φ [°]
	233	0	233	240	235	120	2,6	1,84	1,9	-30

Varianta zapojení	Systém			Systém							Systém						
	U1	U2	U3	φ _{I1} [°]	φ _{I2} [°]	φ _{I3} [°]	φ _{U1-I1} [°]	φ _{U2-I2} [°]	φ _{U3-I3} [°]	P _{L1} [W]	P _{L2} [W]	P _{L3} [W]	Q _{L1} [var]	Q _{L2} [var]	Q _{L3} [var]	P [W]	Q [var]
1 - správné	I1	I2	I3	-30	210	90	30	30	30	525	371	387	303	214	223	1283	741
2	I1	I2	-I3	-30	210	270	30	30	-150	525	371	-387	303	214	-223	509	294
3	I1	-I2	I3	-30	30	90	30	210	30	525	-371	387	303	-214	223	540	312
4	I1	-I2	-I3	-30	30	270	30	210	-150	525	-371	-387	303	-214	-223	-233	-135
5	I1	I3	I2	-30	90	210	30	150	-90	525	-371	0	303	214	-447	153	71
6	I1	I3	-I2	-30	90	30	30	150	90	525	-371	0	303	214	447	153	964
7	I1	-I3	I2	-30	270	210	30	-30	-90	525	371	0	303	-214	-447	896	-358
8	I1	-I3	-I2	-30	270	30	30	-30	90	525	371	0	303	-214	447	896	535



Obr. P 3 Grafické zobrazení výkonů pro variantu chybného zapojení U1-I1, U2-(-I3),U3-I2

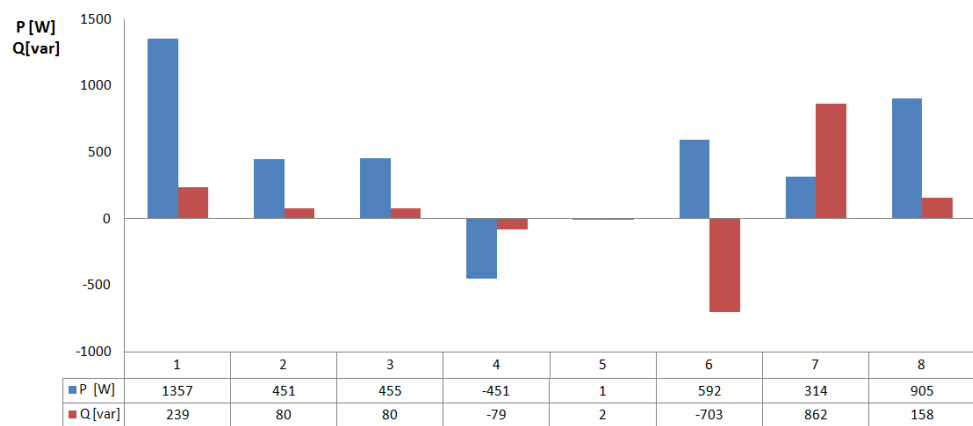


Obr. P 4 Protokol diagnostiky pro variantu chybného zapojení U1-I1, U2-(-I3),U3-I2

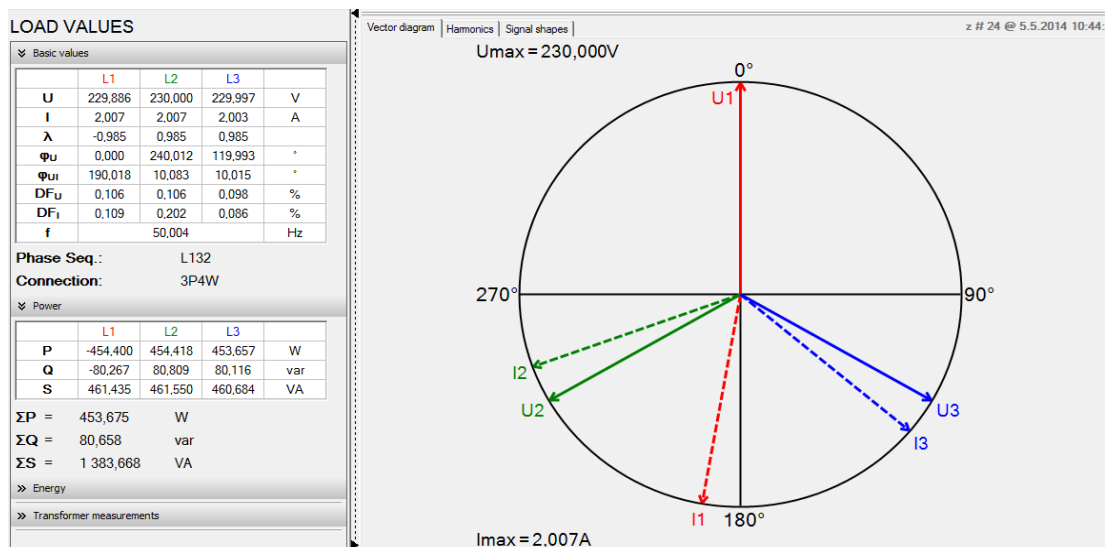
Tabulka P3 Matematický model pro třísystémové - čtyřvodičově připojené měřicí systémy zobrazující výsledky pro variantu chybného zapojení U1-(-I1), U2-I2,U3-I3

Vstupní parametry	U_{L1} [V]	φ_{U1} [°]	U_{L2} [V]	φ_{U2} [°]	U_{L3} [V]	φ_{U3} [°]	I_1 [A]	I_2 [A]	I_3 [A]	φ [°]
	229	0	230	240	229,9	120	2	2	2	-10

Varianta zapojení	Systém U1	Systém U2	Systém U3	φ_{I1} [°]	φ_{I2} [°]	φ_{I3} [°]	φ_{U1-I1} [°]	φ_{U2-I2} [°]	φ_{U3-I3} [°]	P_{L1} [W]	P_{L2} [W]	P_{L3} [W]	Q_{L1} [var]	Q_{L2} [var]	Q_{L3} [var]	P [W]	Q [var]
1 - správné	I1	I2	I3	-10	230	110	10	10	10	451	453	453	80	80	80	1357	239
2	I1	I2	-I3	-10	230	290	10	10	-170	451	453	-453	80	80	-80	451	80
3	-I1	I2	I3	170	230	110	-170	10	10	-451	453	453	-80	80	80	455	80
4	-I1	I2	-I3	170	230	290	-170	10	-170	-451	453	-453	-80	80	-80	-451	-79
5	I3	I2	I1	110	230	-10	-110	10	130	-157	453	-296	-430	80	352	1	2
6	I3	I2	-I1	110	230	170	-110	10	-50	-157	453	296	-430	80	-352	592	-703
7	-I3	I2	I1	290	230	-10	-290	10	130	157	453	-296	430	80	352	314	862
8	-I3	I2	-I1	290	230	170	-290	10	-50	157	453	296	430	80	-352	905	158



Obr. P 5 Grafické zobrazení výkonu pro variantu chybného zapojení U1-(-I1), U2-I2,U3-I3

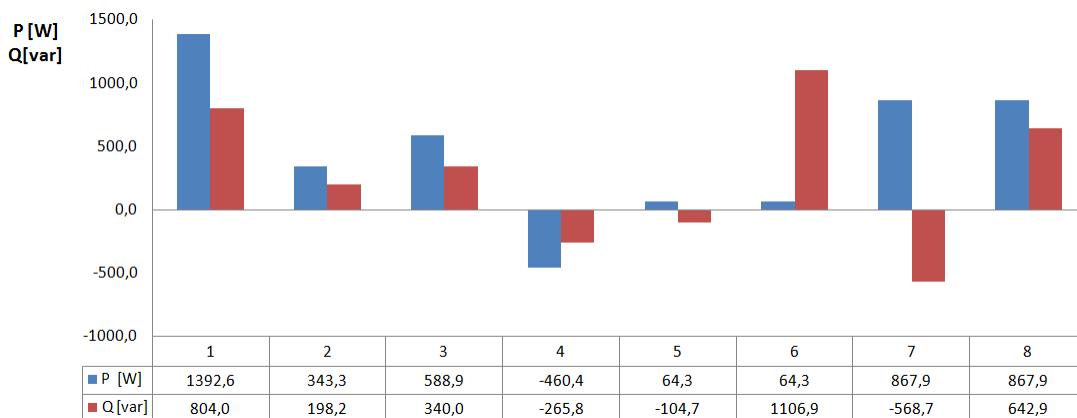


Obr. P 6 Protokol diagnostiky pro variantu chybného zapojení U1-(-I1), U2-I2,U3-I3

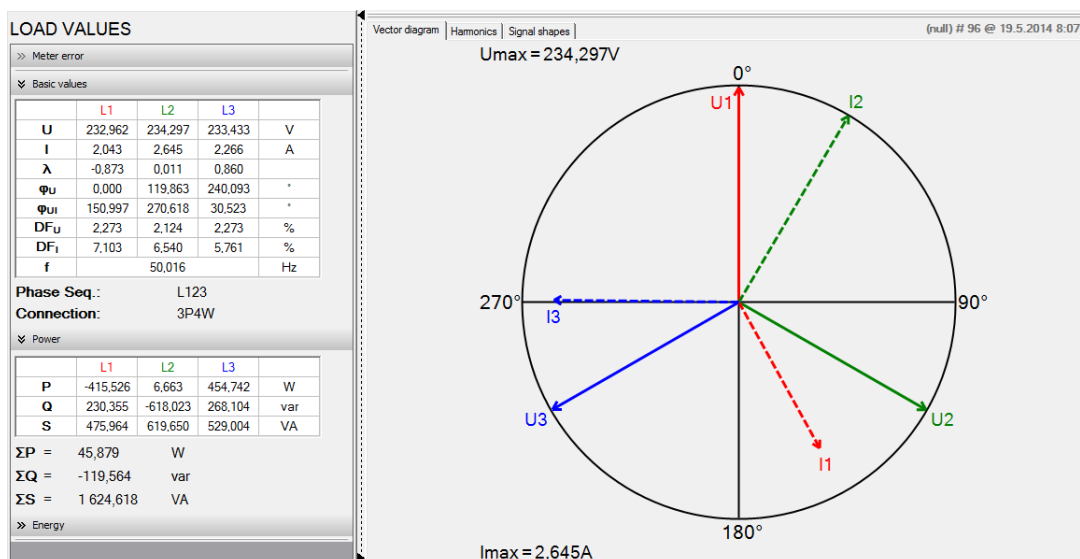
Tabulka P4 Matematický model pro třísystémové - čtyřvodičově připojené měřicí systémy zobrazující výsledky pro variantu chybného zapojení U1-I2, U2-I1,U3-I3

Vstupní parametry	U _{L1} [V]	φ _{U1} [°]	U _{L2} [V]	φ _{U2} [°]	U _{L3} [V]	φ _{U3} [°]	I ₁ [A]	I ₂ [A]	I ₃ [A]	φ [°]
	232	0	233	240	234	120	2	2,6	2,3	-30

Varianata zapojení	Systém U1	Systém U2	Systém U3	φ _{I1} [°]	φ _{I2} [°]	φ _{I3} [°]	φ _{U1-I1} [°]	φ _{U2-I2} [°]	φ _{U3-I3} [°]	P _{L1} [W]	P _{L2} [W]	P _{L3} [W]	Q _{L1} [var]	Q _{L2} [var]	Q _{L3} [var]	P [W]	Q [var]
1 - správné	I1	I2	I3	-30,0	210,0	90,0	30,0	30,0	30,0	401,8	524,6	466,1	232,0	302,9	269,1	1392,6	804,0
2	I1	I2	I3	-30,0	30,0	90,0	30,0	210,0	30,0	401,8	-524,6	466,1	232,0	-302,9	269,1	343,3	198,2
3	I1	I2	I3	150,0	210,0	90,0	-150,0	30,0	30,0	-401,8	524,6	466,1	-232,0	302,9	269,1	588,9	340,0
4	I1	I2	I3	150,0	30,0	90,0	-150,0	210,0	30,0	-401,8	-524,6	466,1	-232,0	-302,9	269,1	-460,4	-265,8
5	I2	I1	I3	210,0	-30,0	90,0	-210,0	270,0	30,0	-401,8	0,0	466,1	232,0	-605,8	269,1	64,3	-104,7
6	I2	I1	I3	210,0	150,0	90,0	-210,0	90,0	30,0	-401,8	0,0	466,1	232,0	605,8	269,1	64,3	1106,9
7	I2	I1	I3	30,0	-30,0	90,0	-30,0	270,0	30,0	401,8	0,0	466,1	-232,0	-605,8	269,1	867,9	-568,7
8	I2	I1	I3	30,0	150,0	90,0	-30,0	90,0	30,0	401,8	0,0	466,1	-232,0	605,8	269,1	867,9	642,9



Obr. P 7 Grafické zobrazení výkonů pro variantu chybného zapojení U1-I2, U2-I1,U3-I3



Obr. P 8 Protokol diagnostiky pro variantu chybného zapojení U1-I2, U2-I1,U3-I3