

SYNCHRONNÍ FÁZORY – MĚŘENÍ A MOŽNOSTI VYUŽITÍ

Antonín Popelka, Daniel Juřík, AIS spol. s r.o.

Používání synchronních fázorů napětí a proudů je současným trendem pro zlepšení kvality monitorování chodu přenosové i distribuční soustavy. Synchronní fázory je možno využívat pro celou řadu aplikací, jako např. estimace, výpočty chodu sítě, lokalizace poruch, měření parametrů vedení, podpora při spínání aj.

1. FÁZORY

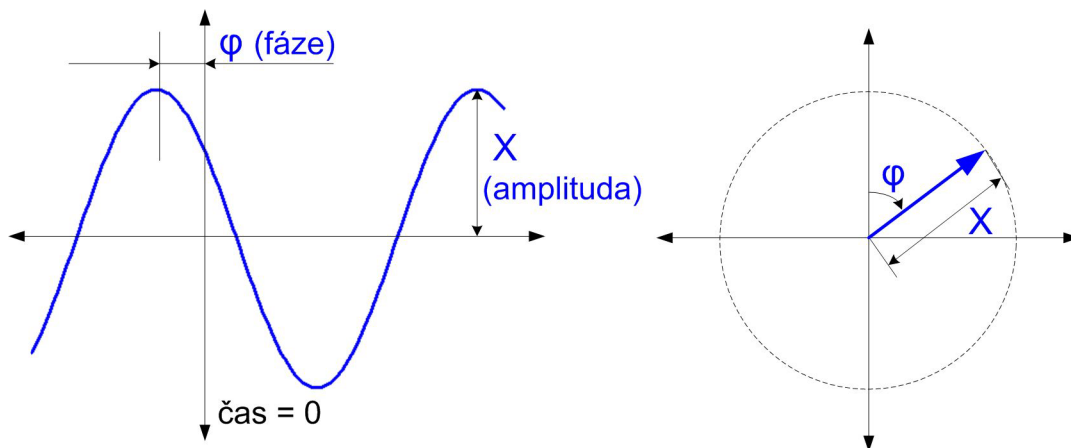
Definice fázorů, matematická formalizace určení jejich vektorové chyby, rámcová doporučení pro jejich měření a definice komunikačního protokolu vhodného k přenosu fázorových veličin jsou definovány v normách IEEE 1344 a v novější IEEE C37.118.

Elektrické veličiny (1. harmonická napětí a proudy) jsou definovány vztahem

$$x(t) = X \cdot \cos(\omega \cdot t + \varphi),$$

kde φ je úhel – natočení vektoru pro čas $t=0$.

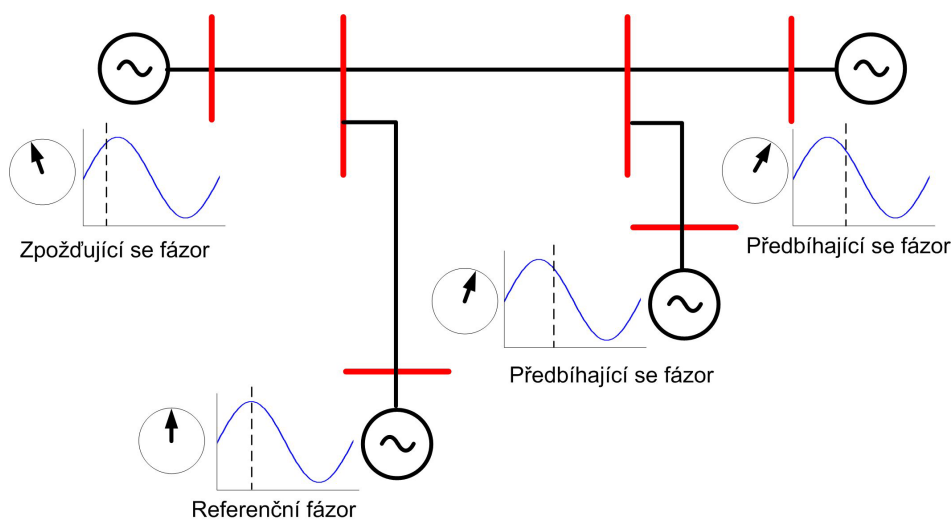
Fázor je vektor charakterizovaný amplitudou X a úhlem φ .



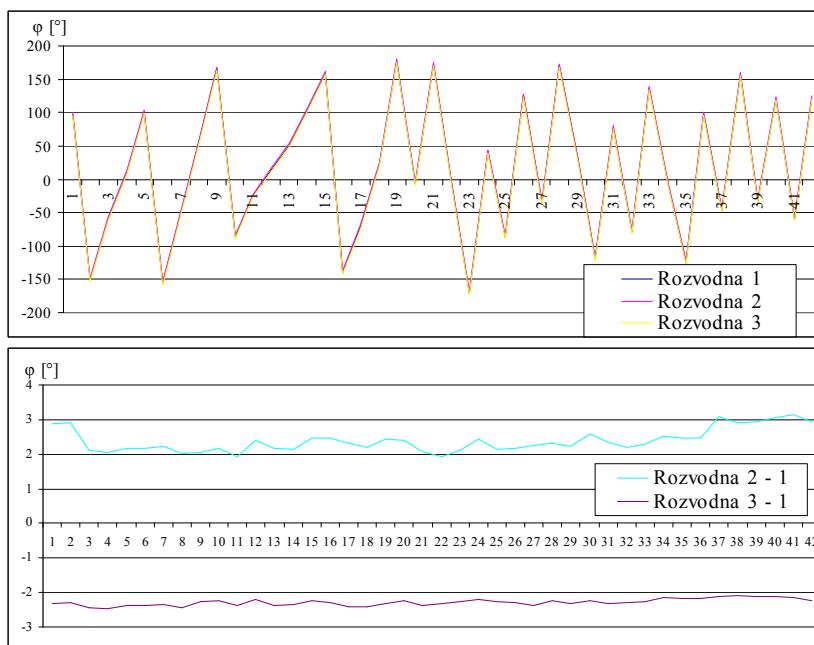
obr. 1 – Reprezentace fázoru

Fázory na různých místech sítě lze zjistit díky časové synchronizaci měření v jeden stejný okamžik. Soubor fázorů změřených na různých místech v jeden stejný okamžik doplněný o čas měření je souborem synchronních fázorů.

V souboru synchronních fázorů můžeme analyzovat vzájemný úhel mezi synchronními fázory zjištěnými ve stejný čas $t=0$ a jejich změnu v čase. Pro přehlednost se může vybrat jeden fázor jako referenční $\varphi_r=0$ a ostatní vztáhnout k němu. Dostaneme soubor relativních fázorů s referencí vybrané veličiny.



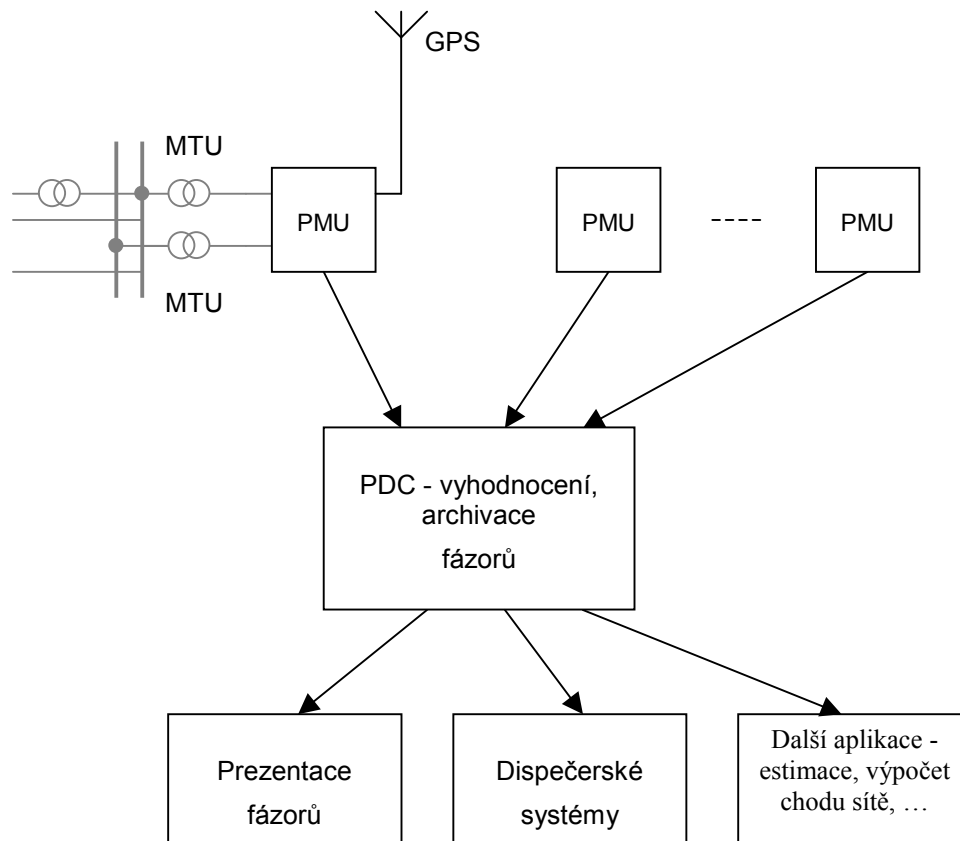
obr. 2 – Snímek relativních fázorů rozlehlého systému s referenčním fázorem



obr. 3 – Ukázka průběhu synchronních a relativních (reference v rozvodně 1) fázorů

2. SYSTĚM MĚŘENÍ

Měření fázorů se provádí převážně na systémech přípojnic v elektrických stanicích.



obr. 4 – Ideové schéma systému měření a využití fázorů

Systém tvoří:

2.1. MĚŘICÍ PŘÍSTROJE

Fázorové měřicí jednotky jsou v anglosaské literatuře nazývány Phasor Measurement Units (PMU). Jejich funkce je definována normou IEEE. Pevážně se používá měření napětí, měření proudů je více zatíženo větší chybou úhlu v měřicích transformátorech proudů. Parametry měření definuje norma v širokém rozsahu, což vede k potížím při srovnávání výsledků mezi různými přístroji. Četnost měření je v rozsahu od 50 (60) vzorků po 1 vzorek za sekundu.

2.2. KOMUNIKAČNÍ INFRASTRUKTURA

Komunikace mezi PMU a PDC výrazně ovlivňuje možnosti a použitelnost systému. Pro různé aplikace existují velmi rozdílné požadavky, a to v těchto parametrech:

- zpoždění při přenosu dat, tj. rychlost, s jakou jsou konkrétní data k dispozici vyšším aplikacím,
- četnost přenosu dat,
- objem dat přenášených z PMU do centra (PDC).

Například pro aplikace související s chráněním rozsáhlých sítí v reálném čase je požadováno maximální zpoždění při přenosu dat desítky milisekund. Pro sběr fázorů pro účely zpřesnění estimačních aplikací zase naopak dostačuje četnost a zpoždění dat řádově v sekundách.

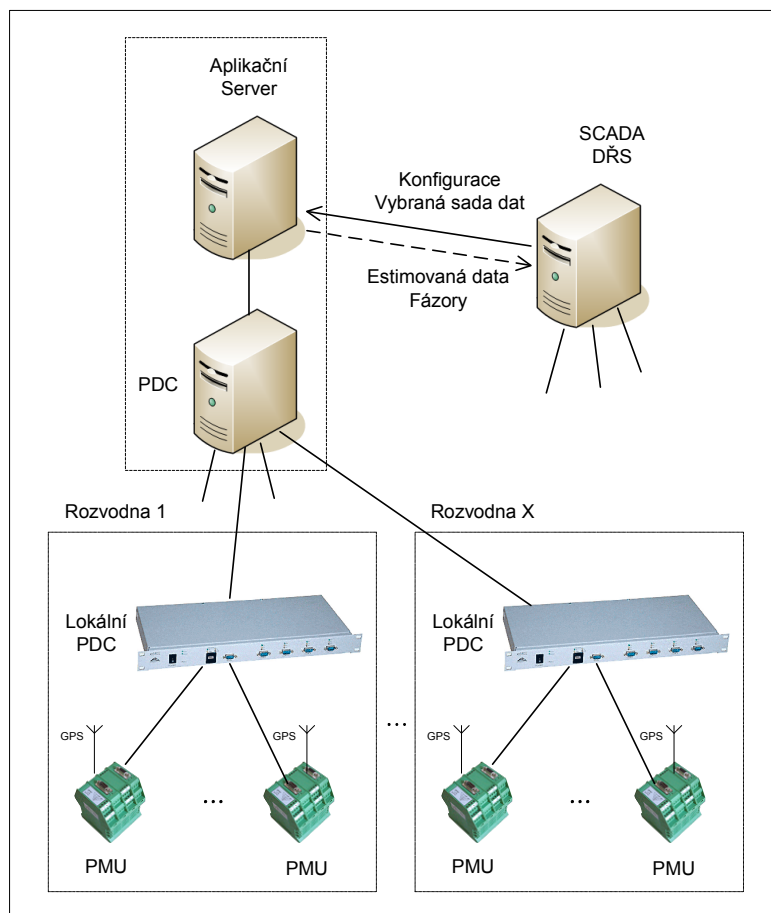
2.3. FÁZOROVÉ SERVERY

PDC (Phasor Data Concentrator - fázorový server) je představován serverem, který organizuje sběr údajů z PMU, data předzpracuje a uchovává v databázi pro navazující aplikace.

Vhodnou infrastrukturou serverů PDC (jejich vrstevnou a vícenásobnou organizací) lze zajistit:

- Integrovaný charakter implementovaného systému, tj. možnost zapojit do celého systému jednotky PMU různých výrobců a typů.
- Distribuci výpočetního výkonu podle potřeb různých aplikací (např. aplikace s požadavkem na minimální zpoždění dat a nevyžadující data z jiných měřicích míst mohou hostovat na lokálních PDC).
- Možnost poskytovat data v různých kvalitách různým uživatelům (např. z různých firem sdílejících jednu technologii, tj. jedny fázorová data, nebo z různých divizí jednoho uživatele).
- Prolínání s jinými informačními systémy, např. se systémem SCADA pro zajištění potřebných dat (konfigurace, jiné veličiny) pro aplikační programy.

Různé požadavky na rychlost zpracování a na množství dat lze v některých případech řešit použitím lokálních PDC umístěných ve stanicích. Jejich úkolem je kromě předzpracování a agregace dat provádět některé aplikace.



obr. 5 – Systém s lokálním koncentrátorem

2.4. APLIKACE

Aplikacemi se rozumí programy a systémy, které soubory fázorů využívají. Soubory fázorů jako zdroj kvalitních dat se využívají např. pro:

- plošné monitorování chodu a stavu sítě (Wide Area Monitoring - WAM),
- operativní řízení sítě,
- vyhodnocování kritických stavů sítě, alarm
- následnou analýzu po zajímavých událostech v síti.

Některé aplikace budou popsány v kap. 4.

3. NĚKTERÉ ASPEKTY POUŽITÍ SYNCHRONNÍCH FÁZORŮ

3.1. SOUČASNOST DAT

Kvalita dat získaných dosavadními způsoby měření je mimo jiné ovlivňována nesoučasností jednotlivých měření. Výsledkem je omezení přesnosti při analýze souboru dat. Synchronní měření, jmenovitě měření synchronních fázorů, představuje možnost, jak omezit nebo zcela vyloučit tyto chyby. Data získaná synchronním měřením představují významný vklad do nových trendů v dispečerském řízení distribučních sítí.

Potřeba spolehlivé dodávky elektrické energie klade velké nároky na moderní systémy řízení sítě, na podpůrné systémy a na softwarové nástroje pro bezpečné, efektivní a cenově optimální řízení. Řízení elektrické sítě je založeno na jejím stavovém vektoru. Redundantní měření jsou využívána pro estimaci vektorů napětí a proudů a pro estimaci činného a jalového výkonu. Výpočetní algoritmy však platí jen pro současně měřená data. Nepřesnost měření má původ v chybách jednotlivých částí měřicího řetězce v řídicím systému rozvodny. Zdrojem časových chyb je asynchronnost měřených veličin a časová zpoždění na komunikačních linkách. Všechny tyto chyby mají za následek zhoršení přesnosti výpočtů.

Relativní fázory mezi uzly sítě představují specifický typ měřených veličin. Metody jejich měření jsou v principu synchronní a nejsou závislé na chybě amplitudy. Požadavky na jejich kvalitu se liší podle způsobu jejich využití.

Optimalizace využití distribučních sítí při velkých zátěžích vyžaduje znalost ustálených i přechodových stavů v reálném čase. Řešení těchto problémů představují zařízení pro synchronní měření napěťových fázorů, zlepšování kvality komunikací mezi jednotlivými objekty a dispečerským centrem a výkonný výpočetní systém.

Synchronní měření hrají klíčovou roli v estimaci sítě. Praktické zkušenosti ukazují, že zpoždění informace o změně měřené veličiny může významně zhoršit přesnost estimace. Míru zlepšení po zahrnutí napěťových synchronních fázorů do výpočtu je možno vyhodnotit pomocí srovnávacího výpočtu estimačního kritéria. Fázorová měření mohou významně omezit nevýhody tradičních asynchronních měření.

3.2. ČETNOST MĚŘENÍ

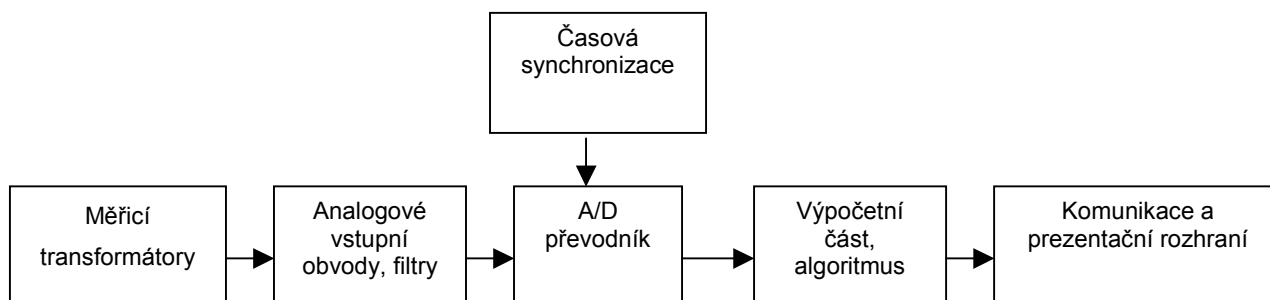
Četnost měření a výpočtu synchronních fázorů bývá v rozsahu 1x za 10s až 50x za 1s podle požadavku předpokládaných aplikací. Řídké měření je použitelné např. pro statickou estimaci nebo podporu spínání, rychlé měření je nutné např. pro lokalizaci poruch, ochranné aplikace aj.

3.3. PŘESNOST MĚŘENÍ FÁZORŮ

Přesnost zjištění fázoru (současnosti měření, velikosti úhlu, amplitudy veličiny) má vliv na možnosti použití. V tabulce je odhad požadavků na požadovanou přesnost časové synchronizace pro některé použití:

Funkce	Parametr	Přesnost	Časový zdroj
Lokátor poruch	300m	1 μ s	GPS
Měření fázorů	+/-0,1 stupně	5,5 μ s (50Hz)	GPS
Stabilita sítě	+/-0,1 stupně	5,5 μ s (50Hz)	GPS
Poruchový zapisovač	Porovnání záznamů	1 ms	GPS, DCF77

Měřicí řetězec zahrnuje všechny prvky od měřicích transformátorů napětí a proudů až po komunikační a presentační subsystémy.



obr. 6 – Měřicí řetězec

Přesnost měření ovlivňují všechny prvky měřicího řetězce. Při analýze požadavků uživatele je třeba hodnotit všechny tyto vlivy.

- Měřicí transformátory napětí a proudů. Dle normy ČSN je v závislosti na třídě přesnosti a zatížení chyba $0,08^\circ$ až 2° . U proudových transformátorů má chyba významný efekt, protože monitorujeme při zatížení v celém rozsahu.
- Vstupní obvody s oddělením s anti-aliasing filtrem zatíží průběh posuvem, v ideálním případě stejným pro všechny přístroje daného výrobce, který lze korigovat ve vyhodnocení. Musí být zajištěna stabilita těchto obvodů.
- Časová synchronizace z GPS má dle výrobců přijímače GPS přesnost od 50ns do 500ns. Další chybu způsobí přenos a zpracování synchronizačního impulsu. Chyba $5,5\mu\text{s}$ odpovídá úhlu $0,1^\circ$.
- Metoda analýzy ovlivní kvalitu měření především pro účely srovnání mezi systémy různých výrobců. Jedná se o frekvenci vzorkování, velikost měřicího okna, četnost vyhodnocení a přenosu.
- Další články řetězce (komunikační subsystém, zpracování v centrále, přenos k uživateli) nemají na přesnost vliv, ale jejich parametry určují možnosti použití v aplikacích.

Obvyklý podíl jednotlivých částí na celkové chybě se odhaduje:

Zdroj chyby	Chyba ve stupních	Chyba v μs
Synchronizace času	$\pm 0,02$	± 1
Primární měřicí transformátory (tř. 0,3)	$\pm 0,3$	$\pm 16,5$
Chyba přístrojů a metody	$\pm 0,06$	± 3

3.4. ŽIVOTNOST DAT

Systém WAM musí zajistit kvalitní data pro aplikace s rozdílnými požadavky na jejich kvalitu, zvláště na jejich četnost. Jednotka PMU měří data s četností požadovanou nejvíce náročnou předpokládanou aplikací. Na úrovni lokálního PDC mohou být umístěny tyto aplikace a pro aplikace na centrálním PDC jsou odesílána data méně četná.

Objem změřených dat a výstupů aplikací je významný. Proto je třeba věnovat pozornost volbě času do jejich smazání – životnosti dat. V tabulce je uveden návrh použitelnosti dat pro některé aplikace:

Aplikace	Četnost	Archivace	Alarm	Oblast	WAM/LM	Další data
Frekvence a změny	25/s 1/s	24H 2R	A	Operativa	LM	
Estimace	1/s	1H	N	Operativa Prognoza	WAM	SCADA
Poruchový záznam	25/s	+/-5m	N	Analýza	Archiv událostí	
Stabilita krátkodobá / dlouhodobá	25/s 25/s	1H 24H	A	Operativa	LM WAM	- SCADA
Oscilace	25/s	1H	A	Operativa	LM WAM	
Ostrovy - spínání	25/s	1H	A	Operativa	WAM	
Spektr.analýza f,P	25/s	1H	N	Operativa Prognoza	LM WAM	

3.5. VÝZNAM AMPLITUDY FÁZORU

PMU při výpočtu fázoru rekonstruuje průběh 1. harmonické a vliv vyšších harmonických eliminuje. Proto amplituda změřeného synchronního fázoru představuje amplitudu 1. harmonické měřené veličiny.

Tato skutečnost podporuje použitelnost fázorů pro většinu aplikací, zvláště pak těch, které počítají se základní harmonickou (estimace, chod sítě a pod.). Tuto vlastnost je nutné zohlednit např. i při srovnání napětí zjištěného přístrojem měřícím „true RMS“ s napětím z fázorového měření.

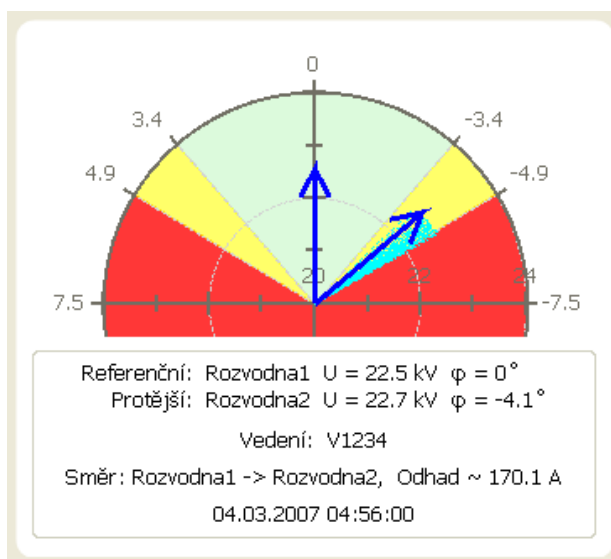
4. NĚKTERÉ APLIKACE

4.1. PODPORA BEZPEČNÉHO SPÍNÁNÍ – KRUHOVÁNÍ

Znalost podmínek pro bezpečné spínání je nutným předpokladem pro rychlou rekonstrukci provozu po výpadcích nebo pro kruhování sítě. Podmínkou je, že vyrovnávací proud po sepnutí nepřekročí určité hranice. Jako podklad pro odhad vyrovnávacího proudu slouží rozdíl úhlů získaný z měření synchronních fázorů na přípojnicích mezi spínanými stanicemi.

Pro tento účel slouží systém FOTEL u některých distributorů v ČR.

Dispečer tak získává např. on-line informaci o rozdílu úhlů napětí mezi dvěma spínanými místy a může se rozhodnout, zda provede sepnutí nebo přijme opatření ke snížení tohoto rozdílu. Ukázka okna s podporou „bezpečného spínání“ je na obrázku:

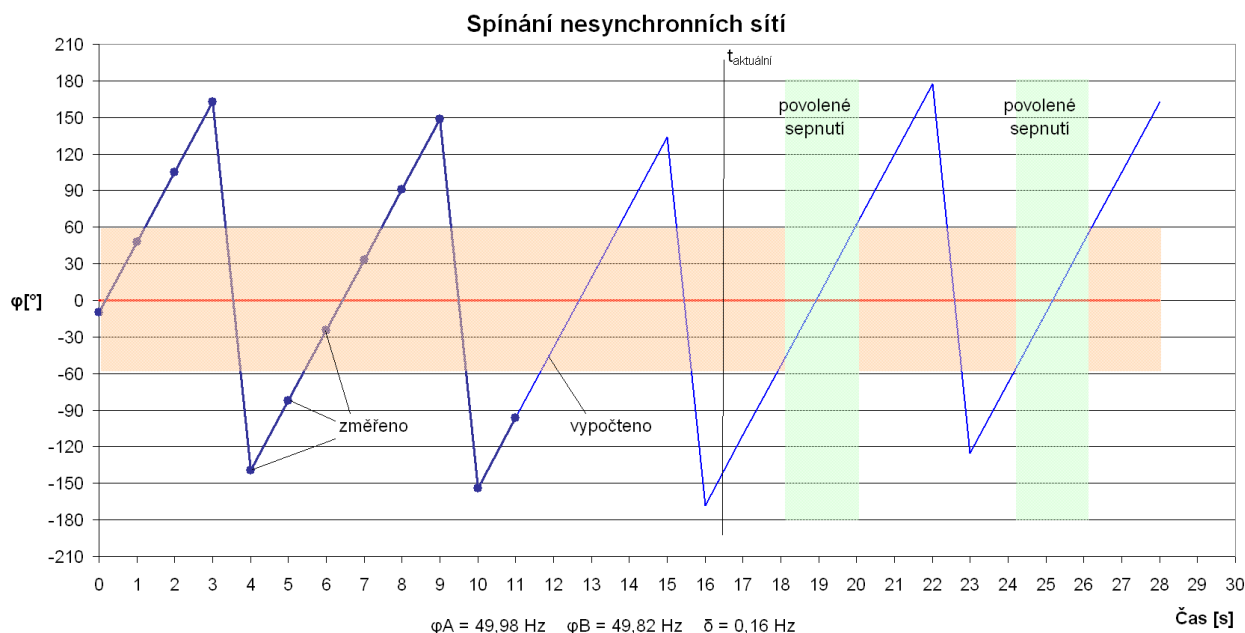


obr. 7 – Spínání v síti 22kV – rozdíl úhlů

4.2. PODPORA SPÍNÁNÍ NESYNCHRONNÍCH SÍTÍ

Další možností aplikace pro podporu spínání je využití fázorových měření při spínání nesychnonních částí sítě, např. po rozpadu sítě na ostrovní provozy. Vhodný okamžik sepnutí nesychnonních částí je velmi krátký. S využitím měřených hodnot lze on-line predikovat na krátkou následnou dobu průběh rozdílů fází obou sítí a vypočítat časový interval, kdy bude rozdíl minimální a sepnutí bezpečné.

Následující obrázek ideově znázorňuje průběh rozdílů úhlů mezi ostrovy A a B. V důsledku rozdílné frekvence úhel trvale lineárně narůstá pokud se žádná frekvence nemění. Body na průběhu jsou úhly změřené, doprava je znázorněn průběh úhlu dopočítaný. Ve svislém zeleném pruhu je čas možného sepnutí za předpokladu, že je povolen úhe $\pm 60^\circ$.



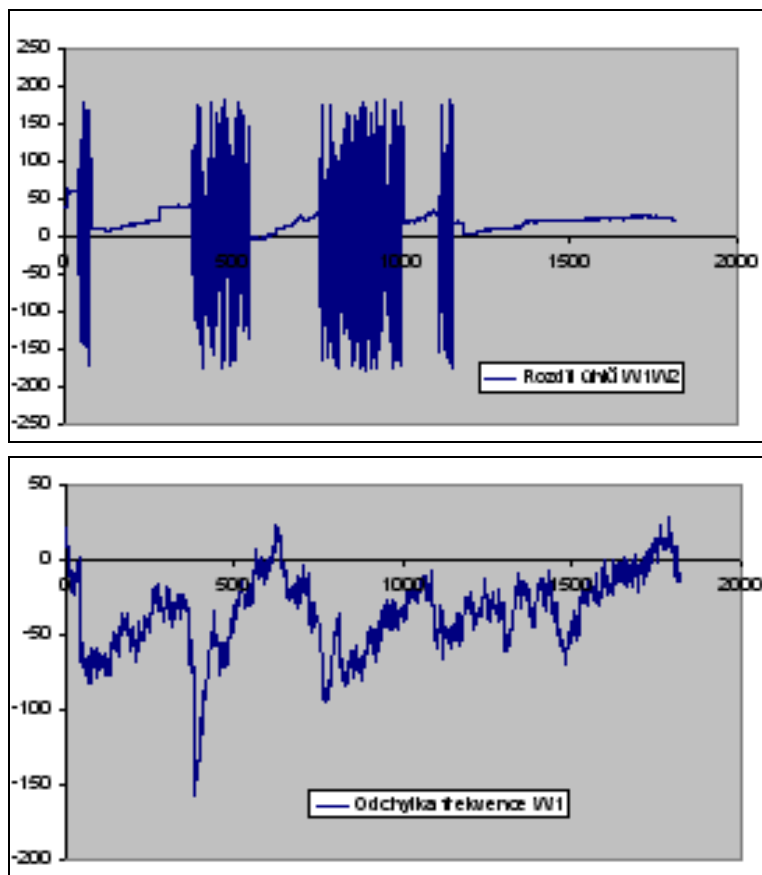
obr. 8 – Spínání ostrovů

4.3. ANALÝZA UDÁLOSTÍ

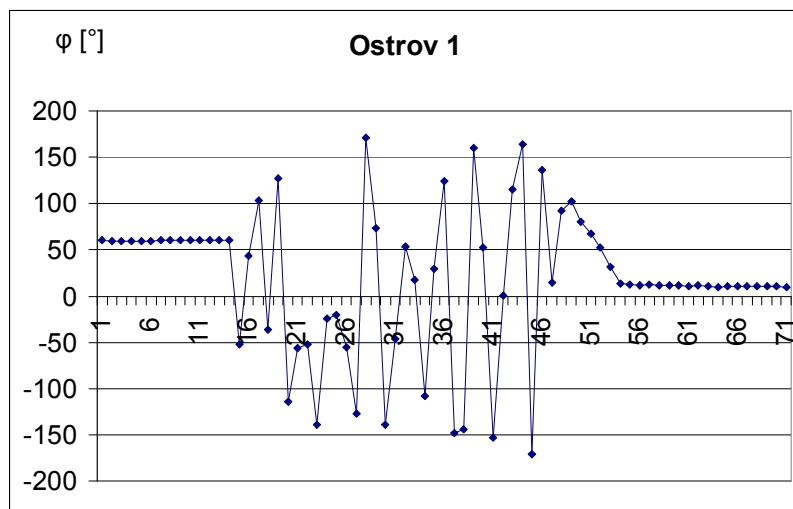
Fázorové aplikace poskytují i další nástroje pro práci s daty uloženými na PDC, např. výpočty okamžité frekvence a zobrazení grafických průběhů fázorů pro možnost následných analýz.

Jako příklad je v grafech znázorněn úhel a odchylka frekvence během vyhlášeného stavu nouze v přenosové síti dne 25.7.2006. Měření bylo prováděno v síti 110kV mezi rozvodnami Chrást a Vítkov. Vzorkování bylo 10s, okamžitá frekvence byla počítána z rozdílů úhlů. Názorně je vidět, že rozpad sítě na ostrovy nastal vždy při úhlovém rozdílu cca 50° . Po připojení ostrova postupně opakovaně došlo k narůstání úhlu a při zhruba stejném úhlu došlo k dalšímu rozpadu. Na dalších obrázcích je v časové lupě znázorněn průběh rozdílů úhlů během rozdělení sítě na ostrovy.

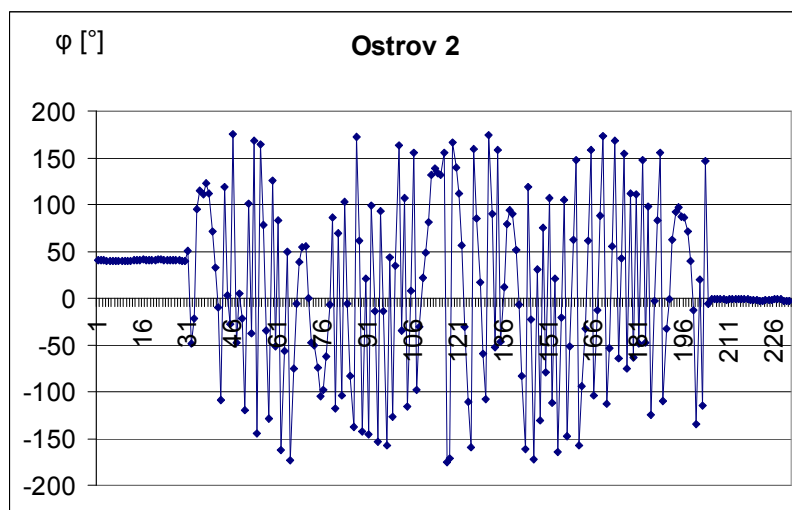
Jednotka na časové ose je 10s.



obr. 9 – Frekvence a rozdíl úhlu během stavu nouze 25.6.2006



obr. 10 – Rozdíl úhlů při rozpadu sítě (1. ostrov)



obr. 11 – Rozdíl úhlů při rozpadu sítě (2. ostrov)

4.4. MONITORING NAPĚTÍ

Fázory jsou reprezentovány velikostí a úhlem. Ve společnostech, ve kterých je instalováno měření fázorů, je možné plošně monitorovat velikost napětí. Výhodou je nezávislost takového měření na ostatních systémech a stejný způsob měření ve všech stanicích. V případě významného vybočení hodnoty napětí může být generován alarm.

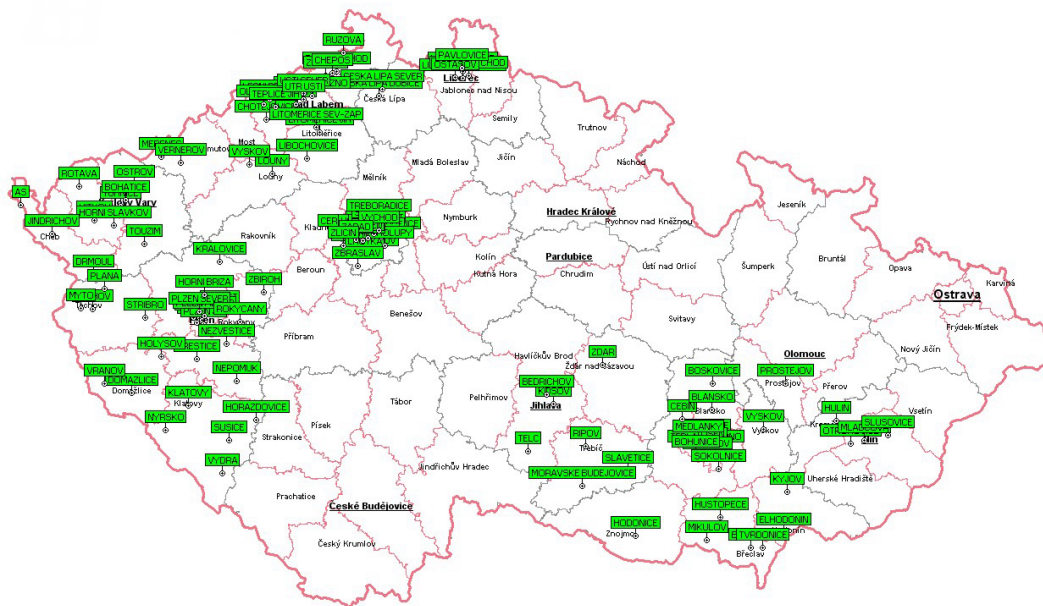
4.5. ESTIMACE

Fázové úhly jsou velmi důležité stavové veličiny, protože určují toky výkonu, stabilitu synchronního chodu zdrojů i stabilitu napětí. Synchronní měření představuje významný vklad do souborů dat používaných k estimaci. V estimačních algoritmech nahrazují klasická měření, eliminují výpočetní chyby způsobené nesynchronními měřeními a tím podporují přesnější a spolehlivější výsledky estimací. V případě rozšíření estimací do přilehlých částí sítě vysokého napětí jde o efektivní a ekonomické řešení, navíc nižší požadavky na přenos dat vedou k úsporám telekomunikačních linek. Z hlediska potřebných úprav estimačního systému vyžaduje zahrnutí synchronních měření jen malou modifikaci algoritmu nejmenších čtverců.

Napěťové fázory jsou také perspektivní pro využití v dynamické estimaci pro monitorování přechodových jevů v reálném čase. Dynamická estimace fázoru napětí umožní spolehlivě monitorovat přechodové procesy v reálném čase, tj. provádět skutečnou dynamickou estimaci stavu. Navazující algoritmy pak umožní rychle a efektivně reagovat na rozvíjející se poruchu a realizovat včas případný korekční zásah. Hlavní výsledný efekt je v tom, že se zabrání šíření poruchy nebo nadbytečnému působení ochran a sníží se nebezpečí nežádoucích rozpadů. Použití fázorů je velmi přesné pro ustálený stav, avšak obtížnější a méně přesné v přechodovém procesu, kde vyžaduje náročnější zpracování, protože se mění kmitočet sítě. Na druhé straně však právě při změnách v soustavě by synchronní fázory s rychlým vzorkováním (několikrát za periodu) poskytly spolehlivou informaci o jevech v síti, na rozdíl od klasických měření, která se uplatní až po ustálení stavu.

5. FÁZORY V ČECHÁCH

Firma AIS implementovala první systém měření fázorů v roce 2000. Nyní je systém pro měření synchronních fázorů FOTEL v ČR používán v několika distribučních společnostech. Ke konci roku 2006 je v provozu měření fázorů na 120 rozvodných distribučních soustav. Z počtu 429 měřených uzlů je 146 uzlů měřeno ve všech třech fázích, celkem je tedy měřeno 721 fázorů. Na mapě je znázorněno rozmístění terminálů na rozvodných distribučních soustavách:



obr. 12 – Rozšíření fázorových měření v distribuční síti ČR

6. ZÁVĚR

V referátu jsme chtěli naznačit široké možnosti využití měření synchronních fázorů v distribučních i v přenosových sítích. Problematika je velice obsáhlá a proto uvažujeme o sérii přednášek nebo workshopů, na kterých bychom se zájemci vlastnosti změřených fázorů, ale především možnosti aplikací projednali.

V dnešní době mají některé distribuční společnosti aktuální databáze synchronních fázorů napětí, které využívají pro zjišťování podmínek pro bezpečné spínání. Podle našeho přesvědčení je žádoucí širší využití těchto dat pro kontrolu a monitoring chodu sítě.

Kontakty:

AIS spol. s r.o.

Palackého tř. 258/73

61200 Brno

www.ais-brno.cz

popelka@ais-brno.cz

Ing. Antonín Popelka

Vystudoval obor Technická kybernetika FE VUT v Brně. Po absolvování byl zaměstnán v ORGREZu Brno, do konce r. 1992 jako vedoucí oddělení řízení v rozvodu a výrobě elektrické energie. Spolupracoval nebo řídil řadu různých projektů výzkumu, vývoje a instalace řídicích, dispečerských a informačních systémů v elektrárnách a v rozvodné elektrizační síti. Vedl např. skupinu odborníků, která v roce 1974 nasadila na Českém energetickém dispečinku v Praze první počítačový informační systém v Československu pracující v reálném čase. Kromě jiných prací konzultoval koncem 80. let některé projekty Tesly Strašnice pro řízení rozvodu el. energie v Egyptě a na Kubě. V r. 1992 absolvoval na Business School Georgetown University ve Washingtonu úplný kurs managementu (mini-MBA) organizovaný pro řídicí pracovníky z ČSFR. Součástí tohoto kurzu byla 4 týdenní stáž u Booz-Allen & Hamilton, jedné z nevýznamnějších konzultačních firem na světě. Od roku 1998 se věnuje výzkumu metodiky měření synchronních fázorů v rozsáhlých sítích, o této problematice přednáší na odborných konferencích a seminářích a publikuje v odborném tisku. Ve firmě AIS spol. s r.o. je ředitelem společnosti.

Ing. Daniel Juřík, Ph.D

Vystudoval obor Technická kybernetika FE VUT v Brně. Po absolvování byl zaměstnán ve firmě ELCOM a v ORGREZu Brno, kde spolupracoval na různých projektech na vývoj a instalaci řídicích, dispečerských a informačních systémů v elektrárnách. V roce 1987 pracoval ve firmě Forssan Kirjapaino OY (Finsko) na problematice zavádění systémů DTP do tiskárenských provozů. V letech 1990-1991 externě vyučoval na FE VUT Brno. V letech 1994-96 byl externím lektorem autorizovaného školicího střediska firmy Microsoft u PVT a.s. V roce 1994 absolvoval kurs managementu pro řídicí pracovníky organizovaný Llandrillo College (Wales). Po absolvování tohoto kursu získal certifikát NEBS (The National Examining Board for Supervisory Management). V roce 2003 obhájil doktorskou práci na téma „Sběr technologických dat v sítích Ethernet“. Od roku 1993 je společníkem ve firmě AIS spol. s r.o. a specializuje se na problematiku snímání, přenosu, zpracování a prezentaci dat z technologických procesů.