

ZÁZNAMY RYCHLÝCH ZMĚN NAPĚTÍ A PROUDŮ

Ladislav Pospíchal, Jiří Babka, ml., Karel Hoder, Antonín Kubeš
 MEGa – Měřicí Energetické Aparáty, a.s.

Rychlé změny napětí jsou v převážné míře způsobeny přechodnými proudovými odběry při změnách pracovních režimů spotřebičů. Jejich monitorování je účelné pro identifikaci spotřebičů s výraznými změnami odebíraných proudů, jejichž provozováním může být snížena kvalita napětí spotřebičů v elektricky blízkém okolí.

1. ÚVOD

Již při výběru přístrojů pro měření kvality napětí v r. 2005 bylo požadováno měření rychlých změn napětí. Rychlé změny napětí r se vyskytují při normálních provozních podmínkách, jako jevy charakterizované změnami efektivních hodnot napětí dU jednotlivých period. Byla stanovena rozmezí počtů rychlých změn napětí za hodinu, rozříděných podle maximálních hodnot změn napětí dU_{\max} .

Četnost [r/h]	$r \leq 1$	$1 < r \leq 10$	$10 < r \leq 100$	$100 < r \leq 1000$
dU_{\max} [% U_{jm}]	3,0	2,5	1,5	1,0

Tabulka 1 Rozdělení počtu rychlých změn napětí podle maximální hodnoty změny napětí

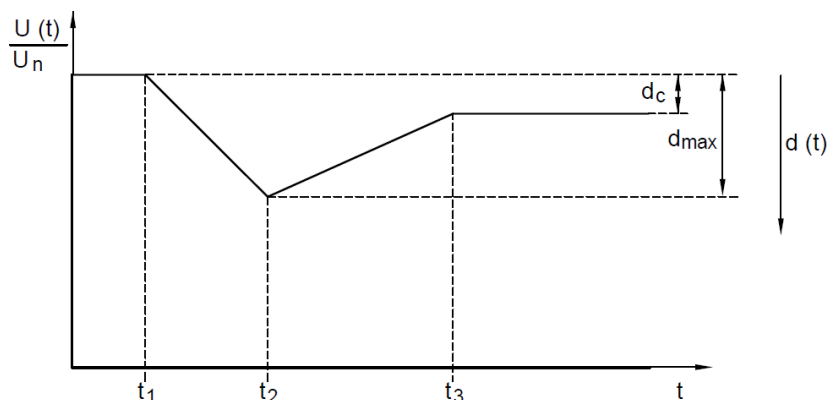
Obecně norma ČSN EN 50160 z r. 2000 popisuje rychlou změnu napětí (rapid voltage change) jako jednotlivou rychlou změnu efektivní hodnoty napětí mezi dvěma nebo více po sobě následujícími úrovněmi napětí, které trvají určitou, avšak nestanovenou dobu. Dále jsou v normě rychlé změny napětí popsány jako jevy, způsobené změnami zatížení v instalacích odběratelů nebo spínáním v síti. Pokud se týká kvantifikace rychlých změn napětí, připouštěla norma ČSN EN 50160 až několik rychlých změn napětí do velikosti 10% U_{jm} denně.

Standard ČSN EN 61000-4-30 z ledna 2004 uvádí, že rychlá změna napětí je rychlý přechod efektivní hodnoty napětí mezi dvěma ustálenými stavy a pro měření rychlých změn napětí je třeba definovat krajní hodnoty pro každou z následujících charakteristik:

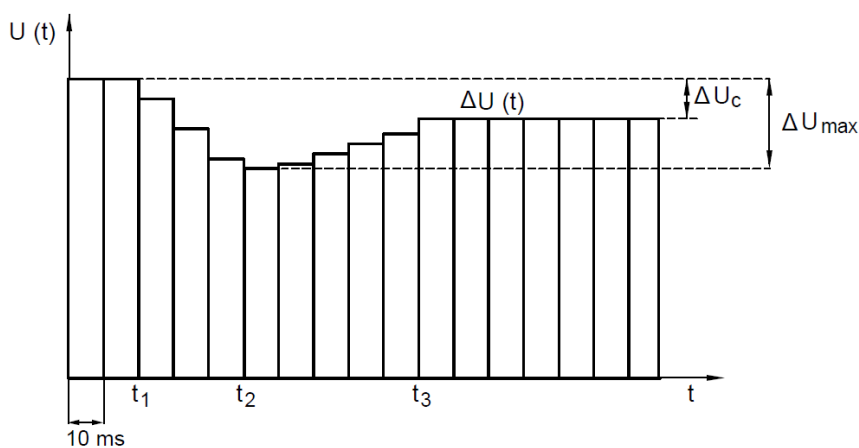
- maximální rychlost změny,
- minimální doba trvání ustáleného stavu,
- minimální rozdíl napětí mezi dvěma ustálenými stavy,
- stálost ustáleného stavu.

Dále standard uvádí, že rychlé změny napětí nesmí překročit prahovou hodnotu krátkodobého poklesu napětí a/nebo prahovou hodnotu krátkodobého zvýšení napětí, jinak by rychlá změna napětí byla považována za krátkodobý pokles nebo krátkodobé zvýšení napětí. Je v něm rovněž uvedeno základní grafické zobrazení časového průběhu rychlé změny napětí, viz obr. 1, kde $d(t)$ ukazuje kladný směr rychlé změny napětí.

V normě ČSN EN 61000-3-3 změna Z1 z února 2002 a následně v její druhé edici ze září 2008 je zpřesnění tvaru efektivní hodnoty napětí $U(t)$ (r.m.s. voltage shape) rychlé změny napětí. Vyhodnocuje se efektivní hodnota napětí pro každou následující půlperiodu mezi průchody napětí nulou, přičemž charakteristika změny napětí $\Delta U(t)$ (voltage change characteristic) je časová funkce změny efektivní hodnoty napětí vyhodnocená jako jediná hodnota z postupně následujících půlperiod mezi časovými intervaly, ve kterých je napětí v ustáleném stavu alespoň 1s, viz obr. 2. Při měření se za ustálený stav považuje stav, kdy měřené napětí je konstantní v rámci přesnosti měření. Charakteristika maximální změny napětí ΔU_{\max} (maximum voltage change characteristic) je rozdíl mezi maximální a minimální efektivní hodnotou charakteristiky změny napětí.



Obrázek 1 Charakteristika rychlé změny napětí dle ČSN EN 61000-4-30 z ledna 2004



Obrázek 2 Charakteristika rychlé změny napětí dle ČSN EN 61000-3-3 ed.2

Změna ustáleného stavu napětí ΔU_c (steady-state voltage change) je rozdíl mezi dvěma sousedními ustálenými stavy oddělenými od sebe alespoň jednou charakteristikou změny napětí.

Edice 2.0 standardu ČSN IEC 61000-4-15 ze září 2011 popisuje výstupy flikrmetru umožňující prokázání shody s požadavky i standardu EN 61000-3-3. Zde je popsána efektivní hodnota půlperiody napětí U_{hp} jako hodnota síťového napájecího napětí, určená po dobu poloviny periody mezi po sobě jdoucími průchody napětí základního kmitočtu nulovou hodnotou.

Napětí ustáleného stavu U_{hp_avg} se určí z posledních 100 hodnot U_{hp} , přičemž po každé nové hodnotě U_{hp} se počítá klouzavá 1 s hodnota U_{hp_avg} . Jestliže žádná nová hodnota U_{hp_avg} ze sta za sebou následujících nepřekročila toleranční pás $\pm 0,2\% U_{jm}$, pak byla splněna podmínka ustáleného stavu.

Změna ustáleného stavu napětí d_c je hodnota rozdílu mezi dvěma po sobě jdoucími hodnotami ustáleného stavu. Je-li hodnota napětí nového ustáleného stavu menší než hodnota napětí ustáleného stavu předchozího, pak je znaménko změny ustáleného stavu d_c kladné.

Maximální změna napětí d_{max} během rychlé změny napětí je vyhodnocena jako absolutní hodnota největšího rozdílu mezi poslední hodnotou ustáleného stavu a následujícími hodnotami U_{hp} v průběhu rychlé změny napětí. Rovněž polarita maximální změny napětí je kladná, jestliže je hodnota U_{hp} při rychlé změně napětí menší než poslední hodnota ustáleného stavu.

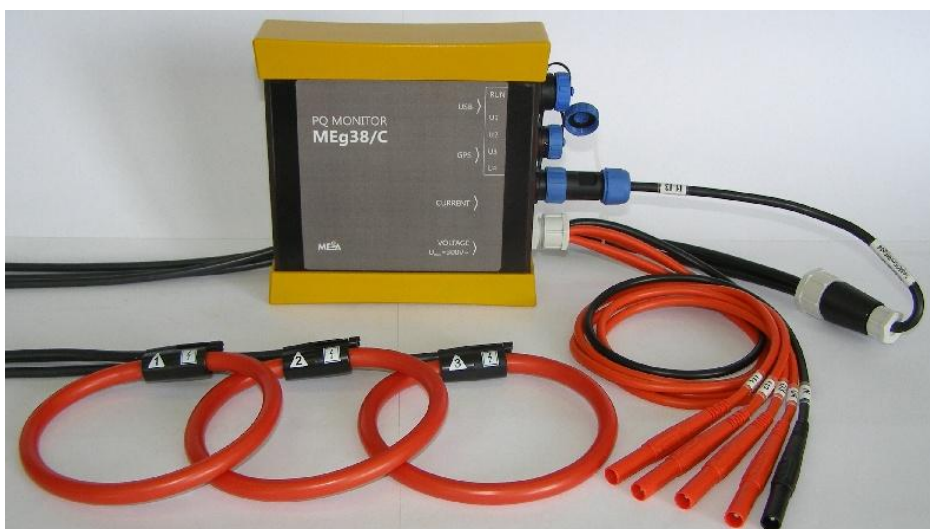
Z předloženého vývoje charakteristik rychlých změn napětí je vidět, že měření a statistické hodnocení rychlých změn napětí lze realizovat přístroji třídy S, pokud vyhodnocují hodnoty napětí po půlperiodách.

Pro statistická souhrnná vyhodnocení je účelné hodnocení rychlých změn napětí pomocí soustavy výše uvedených charakteristik. Hodnocení jednotlivých rychlých změn napětí je vhodné na základě záznamů časových průběhů efektivních hodnot napětí případně oscilografických záznamů.

Standardizovaná soustava charakteristik hodnocení rychlých změn napětí však není jednoznačná a stírá skutečnosti nutné při řešení jednotlivých událostí. Naopak záznam efektivních hodnot napětí a oscilografický záznam je při nepřetržitém a dlouhodobém monitorování náročný na rozsah paměti v datových skladech. To komplikuje situaci při návrzích přístrojů pro měření kvality napětí nové generace. Vhodné optimální řešení musí vyjít z požadavků uživatelů opírajících se o rentabilitu a účelnost měření a vyhodnocení rychlých změn napětí, a proto je vhodným tématem pro práci specializovaných skupin také v CIRED.

2. ZÁZNAMY RYCHLÝCH ZMĚN NAPĚTÍ

Dále uvedené záznamy rychlých změn napětí, spolu s harmonickými složkami a oscilografickými záznamy byly uskutečněny PQ monitorem MEg38/C, popsaným v [1]. Přístroj v kompaktním provedení na obr. 3 obsahuje měřicí jednotku i trojfázový zdroj zajištěného napájení s napájením z měřicích vstupů a rozsahem napájecích napětí od 50 V do 450 V. Doba zajištěného napájení při přerušení měřeného napětí zahrnuje až pět tříminutových přerušení. K měření proudů byly použity ohebné snímače AMOSm, napěťové vstupy byly nastaveny na hladinu nn. K parametrizování měření a vyhodnocení změřených dat sloužil uživatelský SW DataViewer MEg.

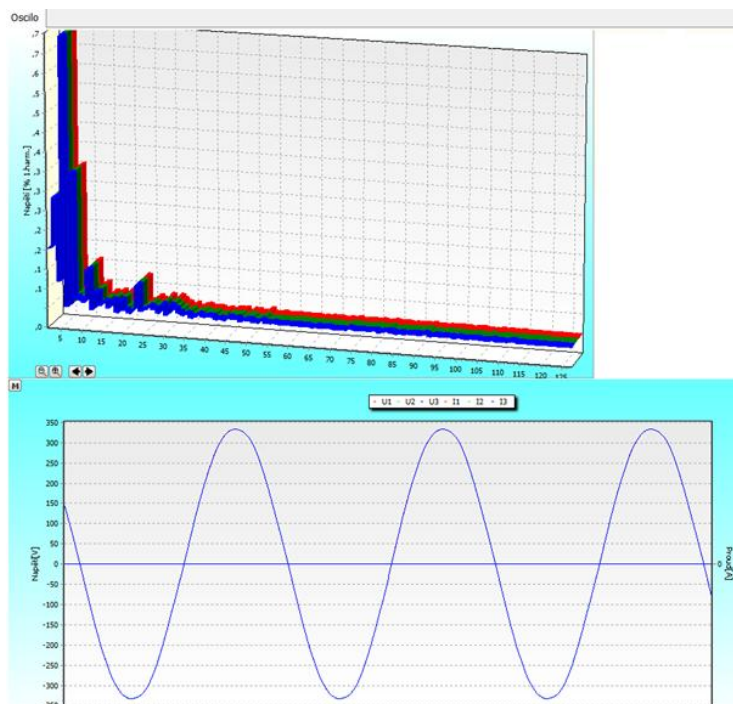


Obrázek 3 PQ monitor MEg38/C v kompaktním provedení v sestavě pro měření na hladině nn

Měření se uskutečnilo dne 18. 9. 2012 v transformovně 400kV Čebín. Nejprve byla změřena jednofázová nn napětí nezajištěného a zajištěného napájení rozvodny při ustáleném chodu, poté napětí a proudy při vypnutí a následném zapnutí automatického zapínacího pochodu na vstupu usměrňovače zdroje zajištěného napětí a nakonec napětí a proudy při manuálně prováděném postupném zapínání a vypínání chladicích obvodů transformátoru T 403.

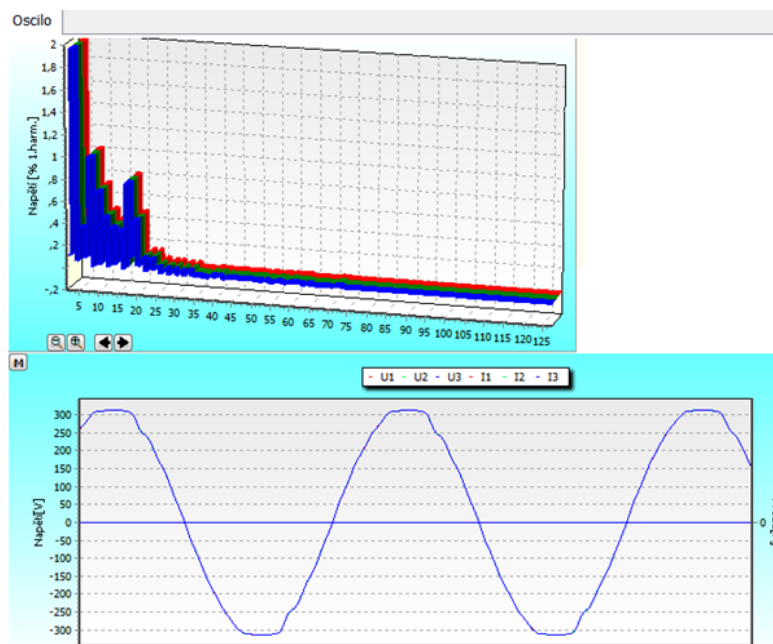
2.1. POROVNÁNÍ NN NAPĚTÍ TRANSFORMOVNY

Nezajištěné nn napětí transformovny je odvozeno postupnou transformací od napětí na hladině 400 kV. Protože se jedná o napětí v transformovně s dostatečně dimenzovanými napájecími vedeními zanedbatelné délky, má toto napětí prakticky ideální sinusový průběh s harmonickými složkami o velikostech desetin a setin %U_{jm} do řádu 125, viz obr. 4. Takto nezkraslené sinusové nn napětí se nikde jinde v distribučních sítích nevyskytuje, a proto je zde zobrazeno. Z hlediska kvality napětí se jedná o napětí nejvyšší kvality.



Obrázek 4 Záznam harmonických složek a oscilografický záznam nezajištěného nn napětí transformovny

Zajištěné nn napětí transformovny je vyráběno střídači ze stejnosměrného napětí baterie akumulátorů. Na oscilografickém průběhu je znatelná deformace průběhu napětí v oblasti maxim, způsobená nelineárními spotřebiči transformovny a nižším výstupním výkonem střídačů v porovnání s transformátorem vn/nn nezajištěného napětí. To se projevuje zvýšením složek 3., 5. a 7. harmonické nad hodnotu 1%U_{jm}. I v oblasti 20. harmonické jsou složky napětí až osminásobně vyšší než je u napětí nezajištěného. Přesto zajištěné nn napětí má pro chod transformovny mimořádný význam spočívající v jeho přítomnosti při poruchách a haváriích.

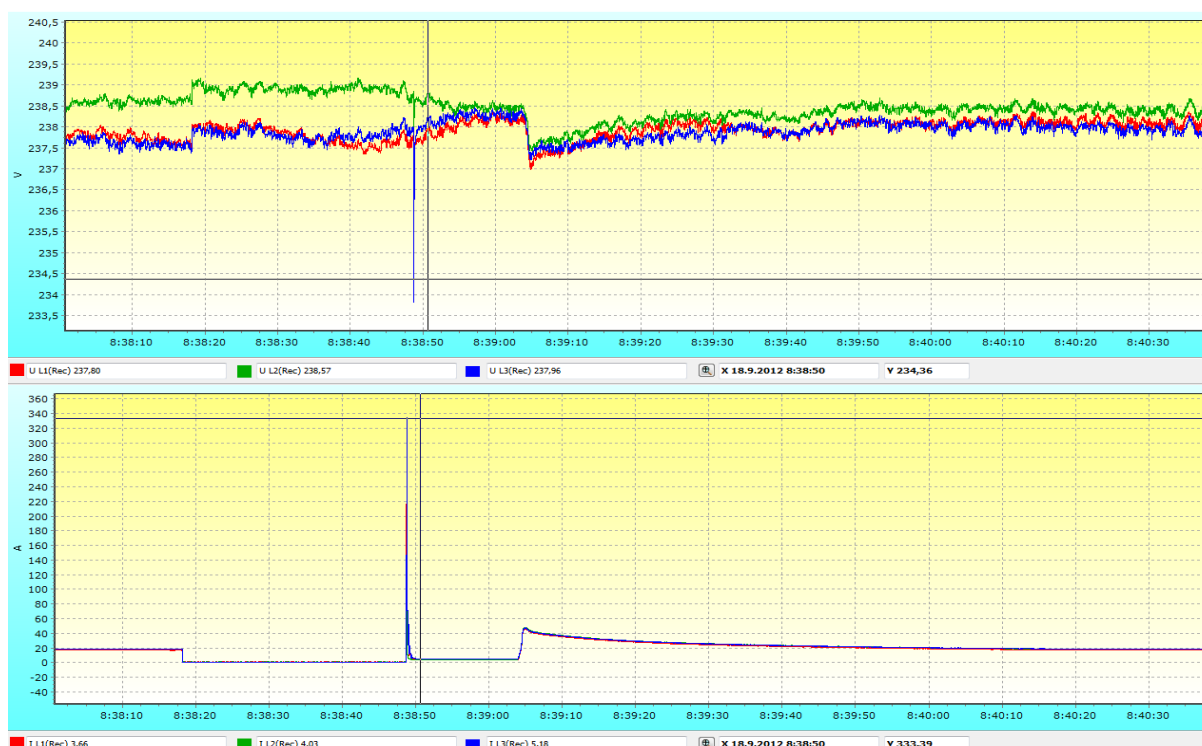


Obrázek 5 Záznam harmonických složek a oscilografický záznam zajištěného napětí transformovny

2.2. USMĚRŇOVAČ SCHUSTER 220V_{ss}/150A

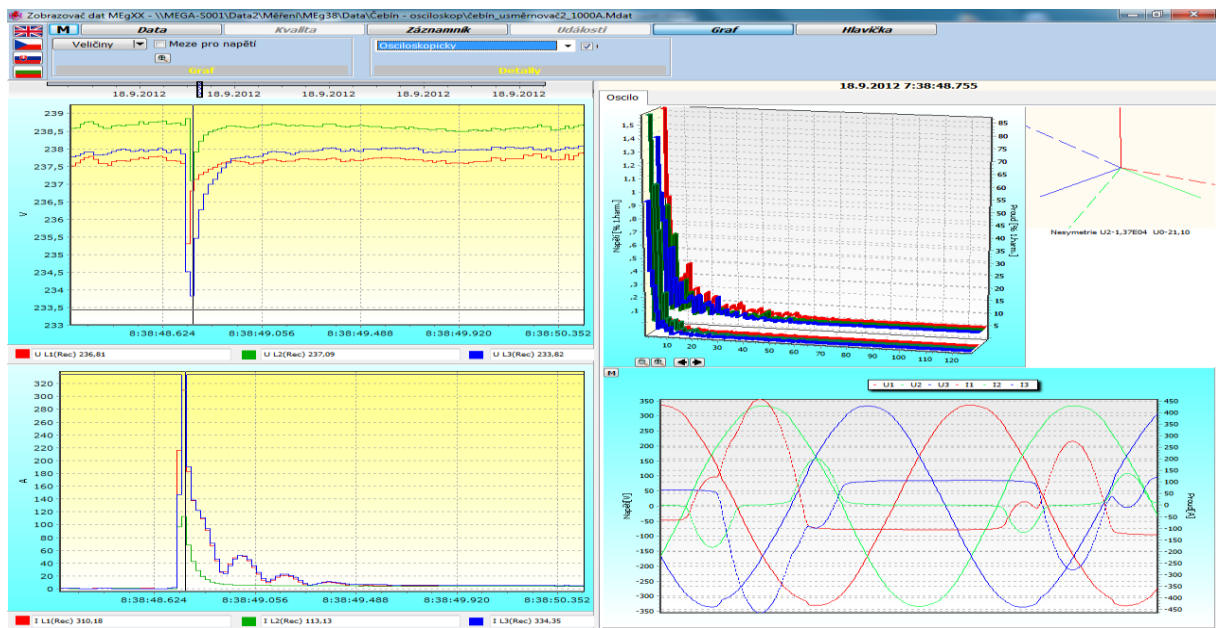
Záznam průběhu efektivních hodnot třífázového napětí a proudu napájecího usměrňovače akumulátorových baterií zdroje zajištěného napájení transformovny je na obr. 6. Záznam má délku 2m40s, byl zahájen v 8h38m. Jmenovitý rozsah ohebných snímačů AMOSm byl při tomto měření nastaven na 1000 A.

Nejprve je vidět ve všech třech fázích shodný nabíjecí proud usměrňovače, který dobíjí akumulátory zdroje zajištěného napájení pracujícího v režimu on-line. Napájecí napětí usměrňovače se pohybuje v okolí 238 V a je na něm vidět prakticky zanedbatelná negativní rychlá změna napětí o velikosti 0,4 V v čase 8h38m18s způsobená vypnutím usměrňovače. Při zapnutí usměrňovače v čase 8h38m48s je vidět nabíjecí proudový ráz o velikost 330 A_{ef} a tomu odpovídající kladná rychlá změna napětí z 238 V na 235 V o velikosti 1,3% U_{jm}. Detail průběhů fázových proudů a fázových napětí při nabíjecím rázu usměrňovače je zaznamenán na obr. 7. Na něm je rovněž osciloskopický záznam fázových napětí a proudů při nabíjecím rázu. Nabíjecí proudový ráz je mezi fázemi L1 a L3 a dosahuje vrcholové hodnoty 450 A. Záznam harmonických složek napětí i proudů je zkeslen průměrováním za 10 period podle standardu ČSN EN 61000-4-7. Po odeznění nabíjecího rázu se fázové proudy před automatickým připojením akumulátorů ustálily na hodnotách 3,66 A, 4,30 A a 5,18 A, viz obr. 6.

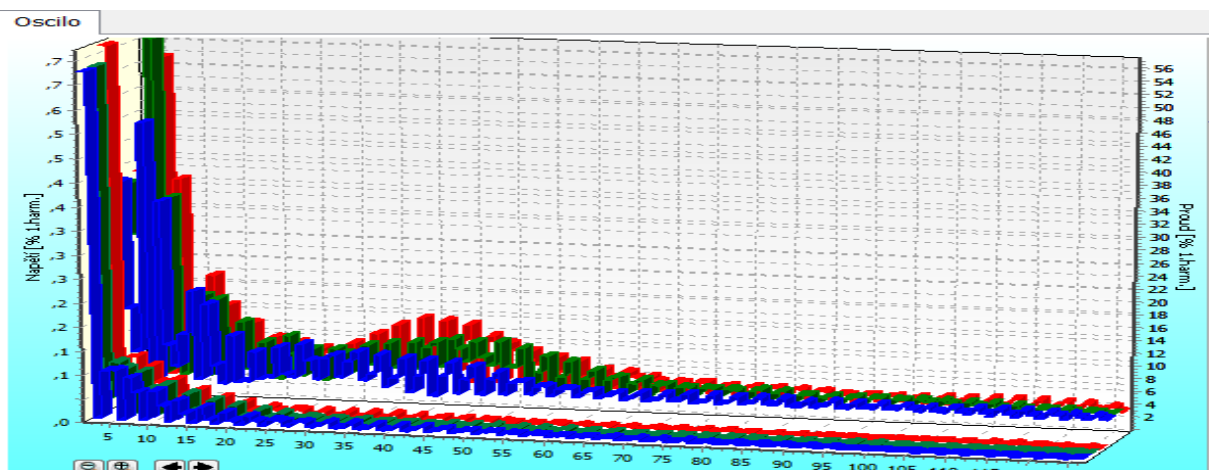


Obrázek 6 Průběhy fázových napětí a proudů usměrňovače zdroje zajištěného napájení při vypnutí a následném zapínacím pochodu

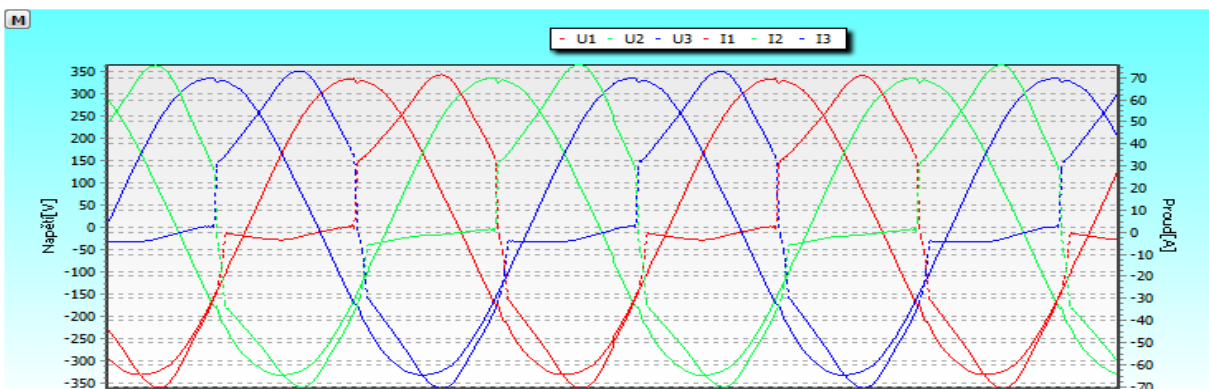
Automatické připojení zátěže tj. dobíjené akumulátorové baterie nastalo v 8h39m04s tj. za 16 s po zapnutí usměrňovače. Počáteční fázové proudy měly pravé efektivní hodnoty o velikosti až 45 A a jejich harmonické složky s lokálním maximem v okolí 40. harmonické a velikosti až 14% proudu 1. harmonické jsou dobře vidět na obr. 8. Počáteční nabíjecí proud měl výrazné tvarové zkeslení, protože 5. harmonická proudu dosahovala velikosti až 56% hodnoty 1. harmonické a i hodnota třetí a sedmé harmonické složky proudů dosahuje přes 30% první harmonické, to je vidět i na osciloskopickém záznamu na obr. 9. Za cca 1,5 minuty, viz obr. 6, se hodnoty napájecích proudů usměrňovače ustálily na hodnotách kolem 20 A shodných s hodnotami před přerušením napájení, které trvalo 30 s a následném zapínacím pochodu s dobou 18 s.



Obrázek 7 Detail průběhu efektivních hodnot, harmonických složek a oscilografický záznam napětí a proudu při zapínacím rázu usměrňovače



Obrázek 8 Detail zaznamenaných harmonických složek napětí a proudů na začátku dobíjení akumulátoru



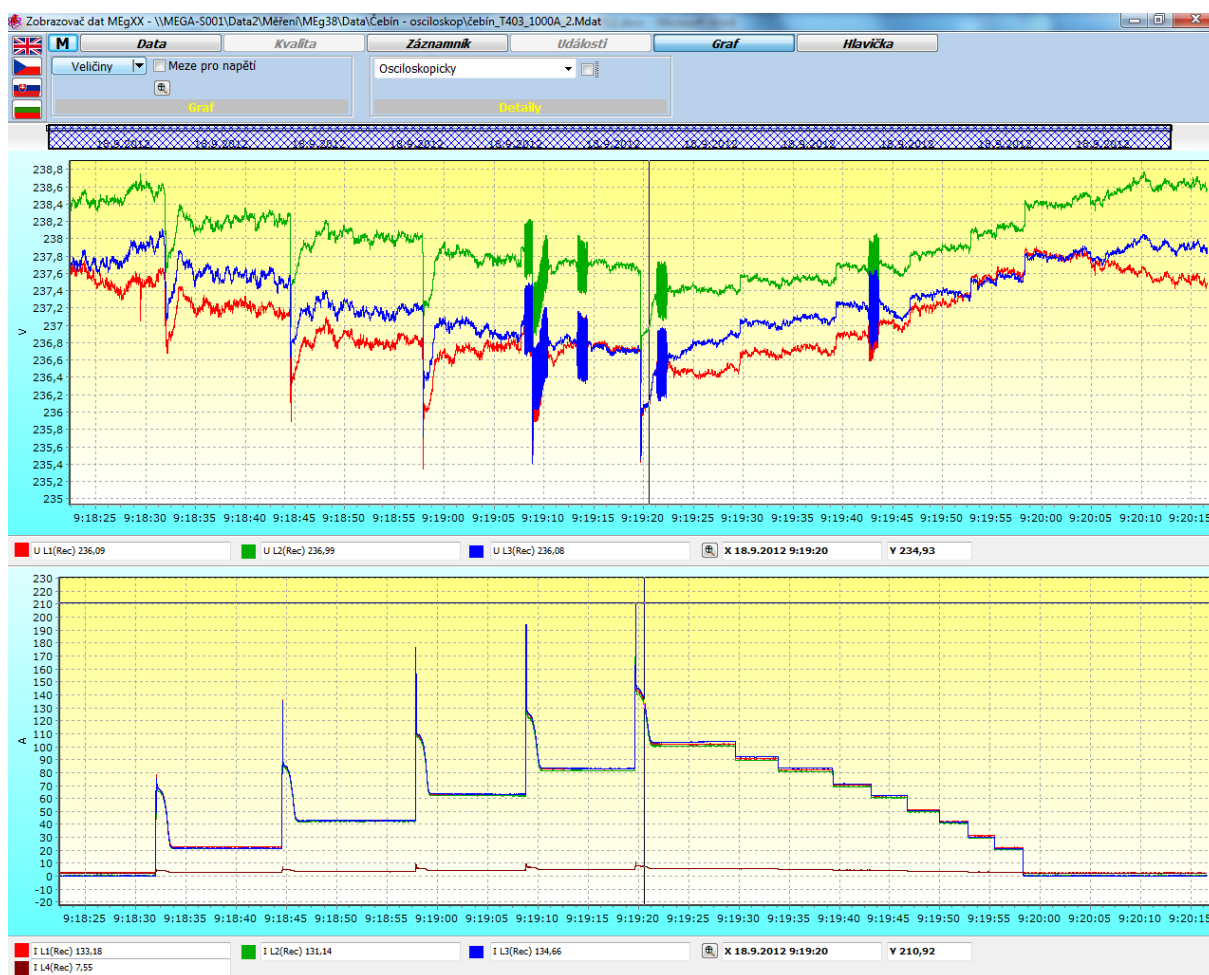
Obrázek 9 Oscilografické průběhy napájecího napětí a proudů na začátku dobíjení baterie akumulátorů

2.3. CHLAZENÍ TRANSFORMÁTORU T403

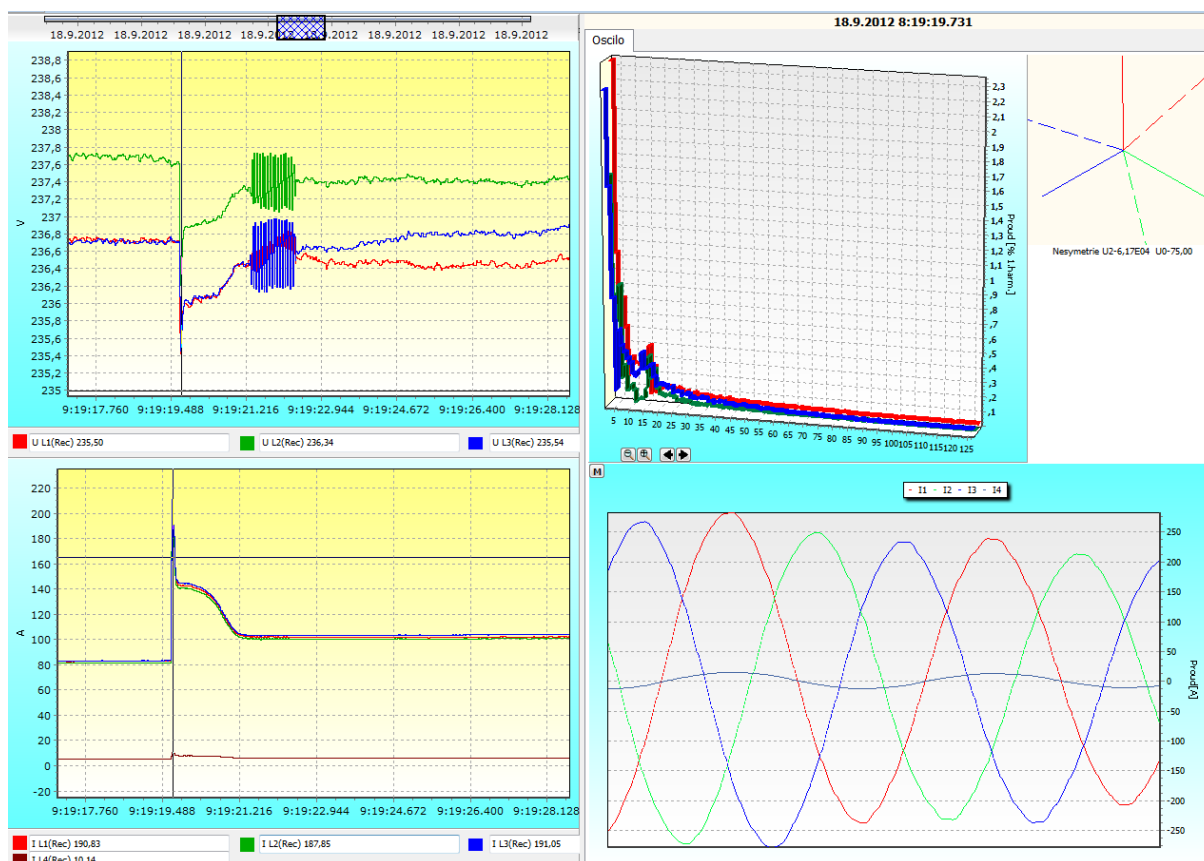
Průběhy fázových napětí a proudů při postupném ručně prováděném zapínání a vypínání jednotlivých chladicích okruhů transformátoru T403 400kV/110kV jsou zaznamenány na obr. 10. Při měřeném pochodu zahrnujícím zapínání pěti chladicích okruhů jsou vidět proudové rázy spojené s rozběhem motorů jednotlivých okruhů a prakticky ekvidistantní nárůst ustálených proudů z 0 A po 20 A na hodnotu 100 A. S tímto nárůstem je spojeno snižování ustálené hodnoty napětí z 238V o cca 1V. Jednotlivé proudové rázy o velikostech 110 A vyvolaly kladné rychlé změny fázových napětí s $\Delta U_{\max} = 0,8 \text{ V}$ tj. $0,35\%U_{jm}$. Tyto rychlé změny napětí jsou z hlediska kvality napětí zanedbatelné. Detail záznamu posledního proudového rázu se záznamem odpovídající rychlé změny napětí, osciloskopickým záznamem a grafem harmonických složek fázových napětí a proudů je na obr. 11.

Při vypínání jednotlivých chladicích okruhů je vidět zdvojené vypínání. Vždy po vypnutí chladicího okruhu následovalo okamžité, avšak poloviční snížení odebíraného proudu a za cca 4 s snížení proudu o zbývající polovinu. Celý vypínací pochod je z hlediska hodnocení rychlých změn napětí bezvýznamný. Při vypnutí posledního okruhu však následuje okamžité vypnutí celého proudu.

Na obr. 10 je vidět i záznam čtvrtého proudu protékajícího středním vodičem, který jen při zapínacích rázech jednotlivých chladicích okruhů dosahoval na přechodnou dobu hodnoty 7,3 A.

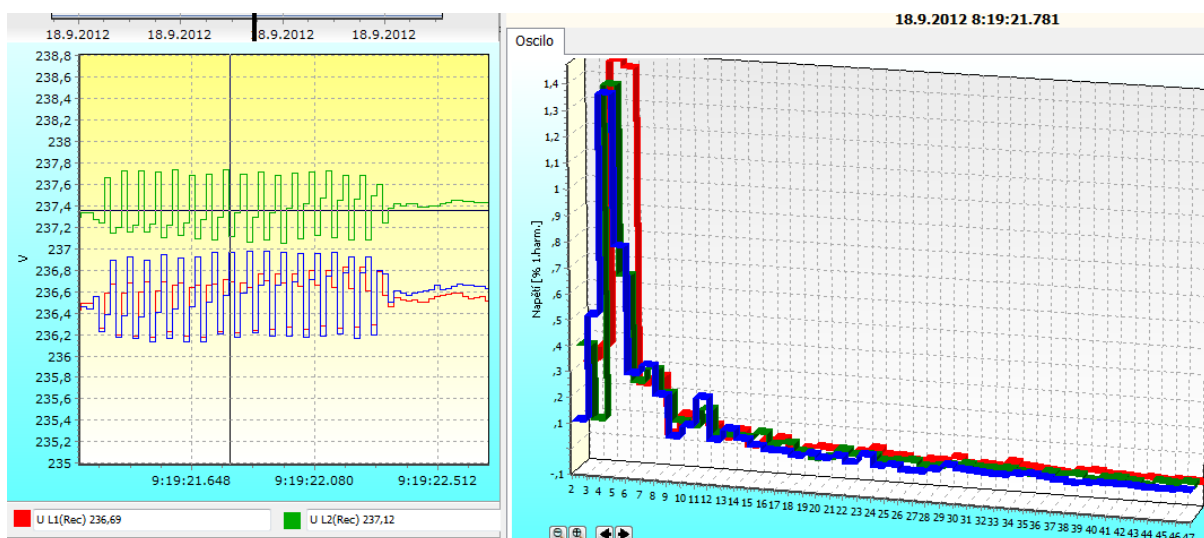


Obrázek 10 Záznam fázových napětí a proudů při zapínání a vypínání chladicích obvodů transformátoru T403



Obrázek 11 Detail průběhu, harmonických složek a osciloskopického záznamu fázových napětí a proudů posledního zapínacího rázu

Na obr. 10 jsou na průbězích všech tří fázových napětí zaznamenány vícenásobně se opakující oscilace o velikosti $U_{\delta-\delta} = 0,8 \text{ V}$ v kmitočtovém pásmu 10. harmonické tj. 500 Hz, viz obr. 12. Příčina tohoto záznamu by si zasloužila vzhledem k významu chlazení pro provoz transformátoru bližší pozornost.



Obrázek 12 Harmonická analýza při kmitavém jevu na napětí

3. ZÁVĚR

Parametr rychlá změna napětí je jako součást systému hodnocení kvality napětí obsažen již v základním standardu ČSN 50160 z r. 2000. Charakteristiky a definice rychlé změny napětí se postupně zpřesňovaly, nicméně i v současné době jsou s jeho aplikací spojeny otázky a nejasnosti.

Nejnovejší popis parametrů rychlé změny napětí je orientován na přístroje třídy A měřící kvalitu napětí. Jeho použití u přístrojů třídy S by vyžadovalo přesnost měření napětí alespoň 0,2%U_{jm}, měření pravé efektivní hodnoty napětí po půlperiodě, odvození počátku měření od průchodu základní harmonické nulou. Diskutabilní je i stabilita časové základny. Např. požadované statistické hodinové hodnocení by se v průběhu týdenního měření mohlo u přístrojů třídy S s předepsanou stabilitou časového normálu 5 s za 1 den rozsynchronizovat až o 35 s, tj. o 1% z hodinového intervalu.

Význam rychlých změn napětí se u nových spotřebičů v důsledku zdokonalování jejich zdrojových částí nebo na základě jejich modernějších principů stává obecně méně významným. V současné době spínané zdroje prostředků IT, stejně jako průmyslové i spotřební elektroniky se dobře vyrovnávají s rychlými i pomalými změnami napětí. Také současně používané světelné zdroje jsou vesměs více imunní vůči změnám velikosti i tvaru napětí. Hodnoty rychlých změn napětí jsou nižší v důsledku snižování impedancí distribučních nn vedení s cílem snížení transportních ztrát na vedeních. Také podpora a rozvoj distribuované výroby s méně výkonnými střídači vede k vyšší tolerovatelnosti nejen tvarových zkreslení střídavých napětí ale i rychlých změn napětí.

Komplikace při hodnocení kvality napětí pomocí rychlých změn napětí představuje stupňovitá regulace nově provozované distribuované výroby, která je nezbytnou podmínkou udržení stability sítě. Při stupňovité regulaci vznikají na základě jejich definice rychlé změny napětí. Tato situace je u ostatních závazných parametrů kvality napětí ošetřena principem flagování vedoucím k vyloučení z hodnocení.

4. LITERATURA

- [1] Pospíchal L., Babka J., Hoder K., Kubeš A.: *Měření kvality napětí a elektrických energií nn I vn distribučních sítích*, Energetika č.8-9

Doc. Ing. Ladislav Pospíchal, CSc.

Má dlouhodobé zkušenosti s realizací vývoje a zajištění výroby slaboproudých zařízení a systémů v energetice. Analyzuje provozní požadavky a na jejich základě definuje požadavky na nové měřicí přístroje.

Ing. Karel Hoder

Navrhuje analogové a zdrojové části měřících přístrojů. Vedl nejvýznamnější vývojové týmy z oblasti měřicí techniky. Je autorem řady patentů a původních řešení.

Ing. Jiří Babka ml.

V r. 2002 absolvoval ČVUT. Navrhuje číslicové části přístrojů a komunikačních jednotek. Pracuje jak na řídicích, tak i uživatelsky orientovaných SW produktech.

Antonín Kubeš

Tvoří vyšší uživatelsky orientované vrstvy SW produktů. Při jejich návrzích s výhodou uplatňuje svoje provozní zkušenosti.