

Filtračně-kompenzační zařízení velkého výkonu

Účinek na způsob provozování kompenzovaného spotřebiče a konfiguraci napájecí sítě

Ing. Jiří Holoubek, Ing. Jaroslav Pawlas, ELCOM, a. s.

Instalace energeticky náročného spotřebiče elektrické energie, který je současně i dominantním zdrojem energetického rušení (harmonické, nesymetrie, flickr – prudké změny napětí), by měla být doprovázena instalací kompenzačního zařízení, jehož úkolem je nejen kompenzovat jalový výkon spotřebováváný tímto spotřebičem, ale také v maximálně možné míře eliminovat jím generované energetické rušení. Míra eliminace úrovní jednotlivých typů energetického rušení však nezávisí pouze na parametrech kompenzačního zařízení, ale i na způsobu provozování rušivého spotřebiče a jeho začlenění do napájecí sítě. Co se týče konfigurace a parametrů kompenzačního zařízení, jde vždy o technicko-ekonomický kompromis, zohledňující ekonomické možnosti investora a meze úrovní energetického rušení ve společném napájecím bodě povolené distributorem elektrické energie. Článek popisuje instalaci filtračně-kompenzačního zařízení, které je v současné době nejvýkonnějším a nejmodernějším v České republice.

Instalaci tohoto zařízení si vyžádala modernizace tavicího agregátu ve velkém hutnicko-strojírenském podniku, jejímž cílem bylo:

- zvýšení roční výroby oceli,
- snížení nákladů na výrobu oceli,
- zefektivnění chodu tavicího agregátu (zvýšení stability oblouku, zredukování spotřeby elektrod, snížení spotřeby elektrické energie),
- ekologizace pece,
- automatizace chodu pece.

V rámci požadavků technologie byly stanoveny základní parametry pece po modernizaci (tab. 1). Kromě modernizovaného tavicího agregátu (EOP) zůstala v provozu dosavadní pánvová oblouková pec (LF) napájená z téže rozvodny.

Tab. 1. Základní parametry pece po modernizaci

Parametr	Hodnota
nominální velikost tavby	70 t
maximální kapacita pece	85 t
doba tavby	72 min
velikost pecního transformátoru	42 MV·A
elektrický výkon pro tavení	33 MW
primární napětí	22 kV
sekundární napětí	450 až 850 V
základní vsázka do pece	ocelový šrot
počet sázecích košů na jednu tavbu	2
výtěžnost kovu ze vsázky	90 %
intenzifikace tavení třemi hořáky (zemní plyn plus kyslík)	3 × 3 MW

Koncepce návrhu kompenzačního zařízení

V úvodní studii, která byla využita jako základ pro jednání s dodavatelem pece a pecního transformátoru, ale také s dodavatelem elektrické energie, byly vypracovány varianty kruhových diagramů pro různé hodnoty vřazeného sériového reaktoru a navržena jeho optimální hodnota 2,4 Ω. Tato hodnota zásadně ovlivňuje i negativní zpětné vlivy tavicího agregátu na napájecí síť. Z pohledu těchto negativních zpětných vlivů představuje oblouková pec jeden z nejhorších spotřebičů, který:

- pracuje s účinnkem 0,70 až 0,85,
- je zdrojem harmonických, především nízkých řádů – 2., 3., 4., 5. atd.,
- je zdrojem meziharmonických,
- odebíraný výkon je velmi proměnlivý, a tím způsobuje kolísání napětí (flickr),
- proudy jednotlivých fází nejsou symetrické, pec způsobuje v síti nesymetrii napětí.

Již ve fázi přípravy projektu bylo výpočty prokázáno, že jediným problematickým parametrem v ovlivňování napájecí sítě bude kolísání napětí a že hodnoty krátkodobé míry vjemu flickru P_{st} (*Flicker short term*, krátkodobý flickr) a dlouhodobé míry vjemu flickru P_{lt} (*Flicker long term*, dlouhodobý flickr) nebude možné udržet pod kompatibilními úrovněmi $P_{st} = 1,0$ a $P_{lt} = 0,8$ nebo mezemi předepsanými v pravidlech provozování distribučních soustav ($P_{st} = 0,8$ a $P_{lt} = 0,6$). Proto byla u energetického regulačního úřadu za přítomnosti zástupců investora, projektanta, dodavatele i distributora elektrické energie dojednána výjimka, která dovoľovala hodnotit provoz pece jen podle hodnoty dlouhodobé míry vjemu flickru P_{lt} . Tato hodnota nemá překračovat velikost 1,0 (percentil 95 %, měřený v časovém

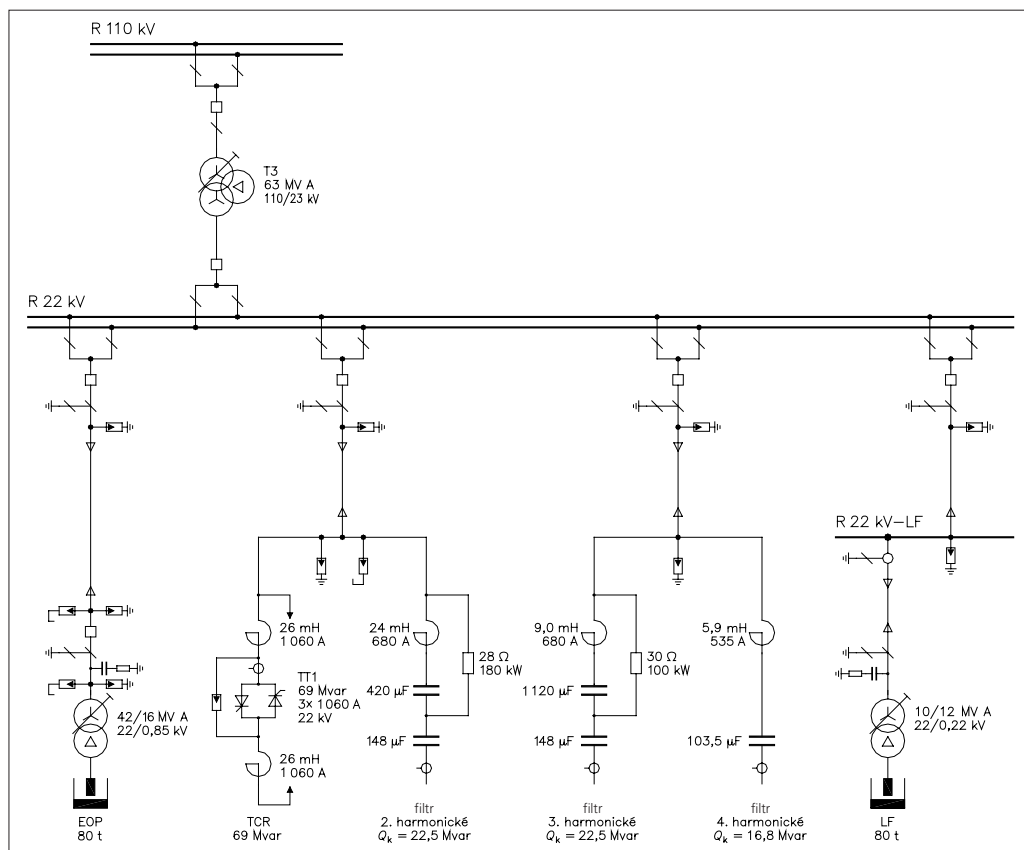
období sedmi dnů). Zároveň byla v kontraktu na dodávku kompenzačního zařízení investorem stanovena podmínka na dodržení hodnoty krátkodobé míry vjemu flickru $P_{st} = 1,17$, a to za předpokladu zkratového výkonu pece 70 MV·A (podle kterého byla dimenzována kompenzace) a splnění dalších podmínek ohledně způsobu provozování pece a napájecí sítě. Zde je nutné zdůraznit, že přesný výpočet flickru ve fázi projektování připojení pece není možný. Výpočet se opírá jen o empirické vzorce a odborné odhady na základě podobných instalací. Přesnost předpovědi hodnot P_{st} a P_{lt} je asi 20 %.

Děje, které probíhají při hoření oblouku a které určují velikost a rychlost změn proudu, jsou náhodné a velmi rychlé a ve třech fázích nesymetrické. Výsledná hodnota flickru závisí na:

- zkratovém výkonu v napájecí síti;
- technologii obloukové pece:
 - nastavené odbočce na sériovém reaktoru pece,
 - bezchybné funkci regulace elektrod,
 - skladbě šrotu,
 - obsahu šrotu ve vsázce;
- filtračně-kompenzačním zařízení:
 - principu činnosti,
 - instalovaném výkonu,
 - rychlosti a nastavení regulace.

Teprve jsou-li optimalizovány všechny uvedené parametry, je možné dosáhnout projektovaných parametrů v oblasti kolísání napětí. Proto je sice možné téměř ihned po uvedení regulované kompenzace do provozu dosáhnout neutrální hodnoty účinníku, filtrace harmonických, ale vyladění provozu na minimální kolísání napětí může trvat i několik měsíců; to se potvrdilo i v dále popisovaném případě.

U konfigurace, která byla pro řešení kompenzačního zařízení zvolena a jejíž přehledové schéma je uvedeno na obr. 1, byl celkový kompenzační výkon rozdělen do filtrů 2., 3. a 4. harmonické. Dynamická dekompenzační část je tvořena fázově řízeným tyristorovým spínačem napětí a reaktory, na nichž se při změně napětí plynuje měni dekompenzační výkon. Jde tedy o typickou konfiguraci TCR + FC (*Thyristor Controlled Reactor + Fixed Capacitor*, tyristorově řízená tlumivka + neproměnný kondenzátor). Kompenzační filtry 2., 3. a 4. harmonické, které jsou zdrojem konstantního kapacitního jalového výkonu a zároveň představují minimální impedanci pro frekvence naladěných harmonických,



Obr. 1. Přehledové schéma kompenzačního zařízení s kompenzovanými spotřebiči

nání s variantou kompenzace na principu TCR + FC a převyšovala by i cenu za modernizaci vlastní obloukové pece.

V tomto popisovaném konkrétním případě je filtr 2. harmonické umístěn na venkovním stanovišti, společně s dekompenzačními tlumivkami (obr. 2 a obr. 3). Filtry 3. a 4. harmonické jsou umístěny ve vnitřním prostoru sousedícího elektroobjektu (obr. 4). V nově přistavěné jednopodlažní budově o půdorysných rozměrech asi 10 × 6 m je umístěn tyristorový měnič (obr. 5), jeho chladicí jednotka a řízení kompenzace.

Návrhu rozhodujících komponent kompenzačních filtrů, tj. kondenzátorových baterií a vzduchových tlumivek, stejně jako vzduchových tlumivek dekompenzačního členu, je třeba u podobných náročných úloh věnovat maximální pozornost. Nejen požadavky na jejich parametry, ale i na technické provedení musí projektant s jejich výrobcí podrobně konzultovat. U kondenzátorových jednotek jde zejména o napětové namá-



Obr. 2. Kondenzátorové baterie filtru 2. harmonické doplněné rezistory



Obr. 3. Tlumivky dekompenzačního členu

mají instalovaný výkon 128,8 Mvar a kompenzační výkon 62 Mvar. Jsou sestaveny z jednofázových vzduchových filtračních tlumivek, jednofázových, dvupólově izolovaných kondenzátorů a tlumivých rezistorů.

Dekompenzační člen (TCR) pro plynulou regulaci jalového výkonu je s přímým připojením na síť 22 kV. Je sestaven z tyristorového měniče 69,3 Mvar, z jednotky pro jeho chlazení deionizovanou vodou a ze šesti jednofázových vzduchových tlumivek.

Princip regulace umožňuje měnit zapalovací úhel antiparalelně zapojených tyristorů v měniči dynamické části při změně žádané hodnoty jen jednou za 10 ms u jednofázové střídavé soustavy 50 Hz a za 3,33 ms u třífázové soustavy (platí pouze při symetrickém řízení fází). V obou případech jde o střední hodnoty zpoždění, které se může pohybovat od 0 do 10 ms, resp. od 0 do 6,66 ms. K tomuto zpoždění je nutné dále připočítat zpoždění regulátoru, které závisí na jeho konstrukci a které nemusí být u digitální regulace menší než u analogové. Děje probíhající při hoření oblouku (změny proudu) jsou rychlejší, a fyzikálně proto není možné potlačit kolísání napětí v celém rozsahu frekvencí. V ideálním případě, při dostatečném výkonu kompenzace a jejím dokonalém seřízení, je kompenzace na principu TCR + FC schopna snížit kolísání napětí (reprezentované krátkodobou mírou vjemu flikru P_{st}) na polovinu v porovnání se stavem bez kompenzace.

Technické řešení kompenzačního zařízení s měničem IGBT sice teoreticky zaručuje snížení hodnoty krátkodobé míry vjemu flikru na jednu třetinu až jednu čtvrtinu v porovnání se stavem bez kompenzace, nicméně cena tohoto řešení by byla přibližně trojnásobná ve srov-

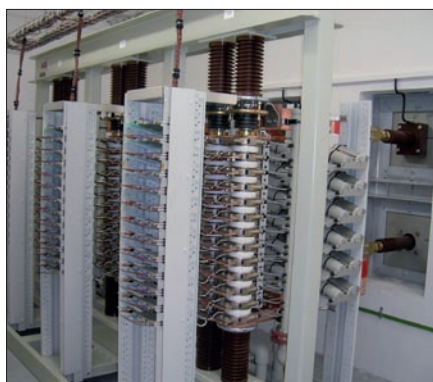


Obr. 4. Filtry 3. a 4. harmonické

hání jednotlivých svitků, které v sérioparalelní kombinaci tvoří požadovanou kapacitu kondenzátoru. V těchto velmi náročných úlohách je nutné, byť za cenu vyšších výrobních nákladů, zvolit řešení s větším počtem svitků v sérii, které zaručuje jejich menší napětové namáhání. Toto opatření má rozhodující vliv na životnost kondenzátorových jednotek, stabilitu naladění filtračních obvodů, a tím i provozní spolehlivost celého kompenzačního zařízení. Důležité je také zmínit konstruk-

ci nádob kondenzátorových jednotek z korozivzdorného plechu opatřeného dvousložkovým nátěrem (polyakryl a akrylpolyuretan) o tloušťce minimálně 50 μm .

Vzduchové tlumivky jak pro filtrační obvody, tak i pro dekompenzační člen navržené pro toto konkrétní zařízení jsou vyrobeny nejmodernější unikátní technologií, navíjením izolovaných lanových vodičů z E-Al 99,5 %. Tyto vodiče (vlastně jednožilové kabely) jsou před vlastním navíjením vytvarovány do čtyřhranného průřezu, který umožňuje optimalizovat geometrické rozměry tlumivek při současném velmi přesném dodržení požadovaných elek-



Obr. 5. Tři fáze tyristorového měniče 22 kV

trických parametrů. Základní hliníková nosná konstrukce vzduchových reaktorů dekompenzačního členu, které jsou dynamicky proudově velmi zatěžovány, je doplněna ještě konstrukcí ze skleněných vláken. Pro povrchovou úpravu je zvolen opět dvousložkový nátěr, který je u tlumivek pro venkovní provedení ještě doplněn nátěrem tzv. silikonového elastomeru odpuzujícího vodu a další nečistoty.

Velkou pozornost je v podobných případech použití nutné věnovat i silovým propojením. Jak je zřejmé z obr. 3 a obr. 6, jsou silové spoje realizovány trubkovým hliníkovým vedením s využitím speciálních propojovacích armatur, popř. holými hliníkovými vodiči. V části kompenzačního zařízení, která je umístěna ve vnitřním prostoru, jsou pro silové spoje zvoleny ploché měděné tyče a holé vodiče.

Řízení kompenzace je soustředěno ve dvou skříních, umístěných v budově tyristorového měniče. V nich je instalována digitální regulace, signalizace stavu a poruch, ochrany, blokování ovládání apod. Veškeré ochrany (nadproudové, balanční, nadpětové, podpětové apod.) jsou v řídicím systému naprogramovány jako softwarové bloky.

Zařízení komunikuje s obsluhou (vizualizace, ovládání, signalizace stavů a poruch atd.) přes vestavěný počítač s dotykovou obrazovkou 19"; druhý počítač pro ovládání a vizualizaci je ve velínu transformovny. Spojení mezi oběma počítači je zajištěno optickým kabelem.

Kompenzace se zapíná a vypíná jedním povelom (a jeho potvrzením). Další sekven-

ce už probíhá automaticky (sepnutí prvního vypínače s dekompenzačním členem a filtrem 2. harmonické, sepnutí druhého vypínače s filtry 3. a 4. harmonické atd.).

Zkušenosti s vlivem provozu pece a konfigurace napájecí sítě na výsledný efekt eliminace rušení

Elektrická oblouková pec je společně s filtračně-kompenzačním zařízením v provozu více než jeden rok. Po korekci v řízení pece a dynamické části filtračně-kompenzačního zařízení byl na základě prvních měsíců provozu dlouhodobě měřen vliv tohoto spotřebiče na napájecí síť 110 kV při různých provozních režimech. Měření bylo vykonáváno na primární straně transformátoru T3, 110/22 kV po dobu asi jednoho měsíce pro každý provozní režim, daný zařazením různé odbočky sériového reaktoru k pecnímu transformátoru. Vzhledem k tomu, že společným napájecím bodem (PCC – Point of Common Coupling) je ve smyslu normy vývod z rozvodny 110 kV dodavatele elektrické energie vzdálené asi 10 km od místa měření, byl pro tento PCC uskutečněn přepočít s činitelem



Obr. 6. Detail napojení venkovní části FKZ

0,8, který odpovídá skutečným zkratovým výkonům v obou bodech. V souladu s pravidly provozování distribučních soustav byly hodnoty statisticky vyhodnoceny a výsledky jsou shrnuty v tab. 2. Pro posouzení vlivu

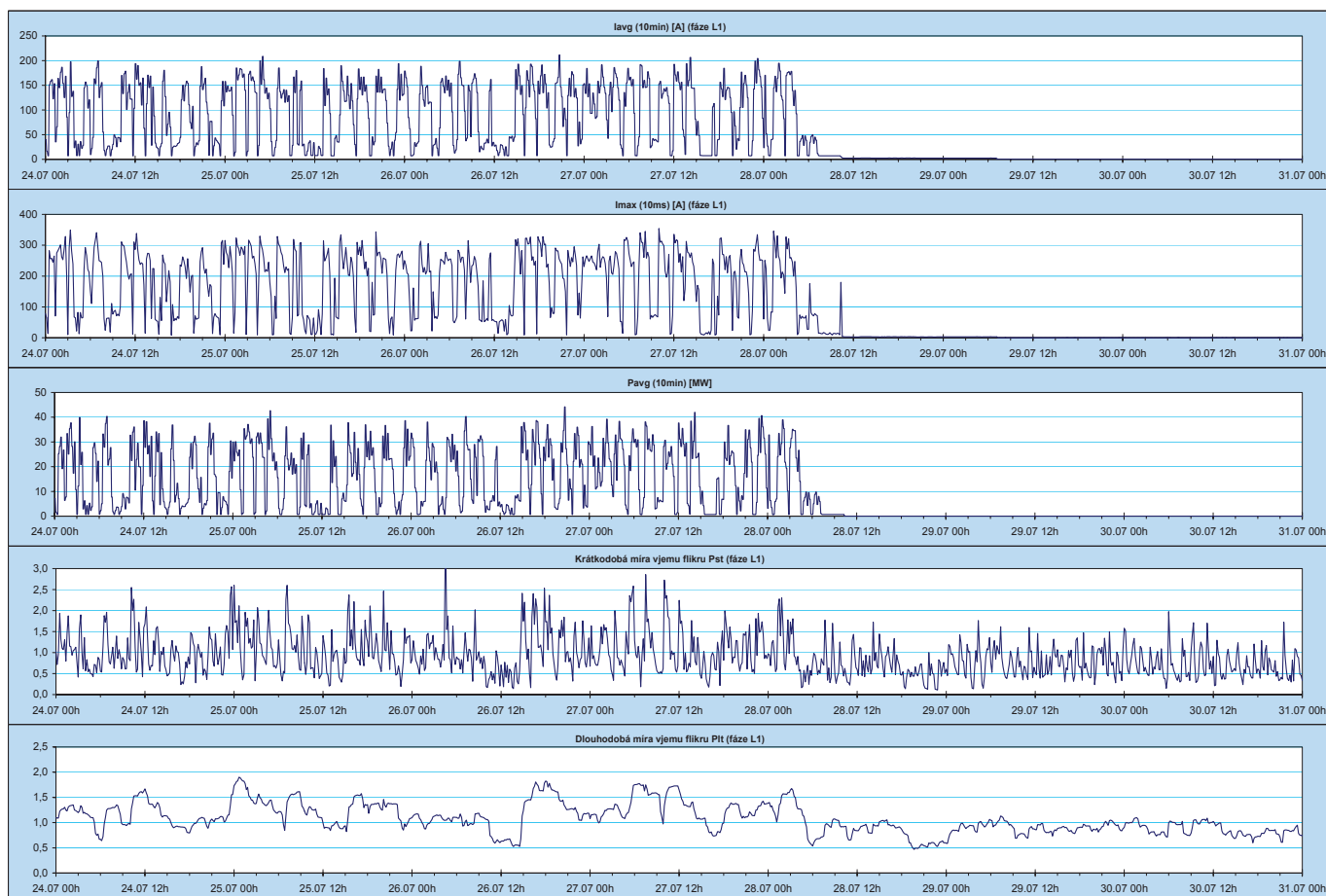
rušení jsou zásadními veličinami P_{st} a Plt . Velmi zajímavé výsledky dává měření usku-tečněně v době od 24. do 31. července 2007, kdy v první části tohoto časového intervalu (do 28. července) byla provozována pec se zařazenou 5. odbočkou sériového reaktoru a po zbývající dny byl sledován stav napájecí sítě bez provozu pece, a tedy i bez filtračně-kompenzačního zařízení (obr. 7).

Výsledky dlouhodobého měření lze zformulovat do tohoto komentáře:

- Porovnání průměrných hodnot veličin při provozu s různými odbočkami na reaktoru nemusí být směřodátné, protože tyto hodnoty jsou závislé na poměru mezi dobou tavení a dobou přestávek v hodnoceném období. Proto je výhodnější použít percentily 95 %.
- Rozdíl mezi proudy I_{200} a I_{max} na odbočkách 3 (nejmenší reaktance) a 6 (největší reaktance) je asi 10 %. Hodnotě proudu 339,9 A při odbočce 3 odpovídá zdanlivý výkon 69 MV·A, což se blíží zkratovému výkonu obloukové pece.
- V řádku EOP + LF v R 110 kV tab. 2 je příspěvek samotných pecí ke kolísání napětí očištěné o příspěvek ostatních zdrojů kolísání v síti 110 kV (tj. s odečteným pozadím sítě).
- V řádku EOP + LF v PCC tab. 2 je příspěvek pecí ke kolísání napětí přepočten z rozvodny R 110 kV do společného napájecího bodu (PCC).
- Je zřejmé, že hodnoty P_{st} a Plt očištěné o vliv pozadí sítě 110 kV se mění v závislosti na zařazené odbočce sériového reaktoru pecního transformátoru obloukové pece. Pro provoz s odbočkami 6; 5; 4; 3 vycházejí hodnoty P_{st} na 1,47; 1,60; 1,76; 1,86 a hodnoty Plt na 1,27; 1,32; 1,43; 1,47. Přitom je třeba si uvědomit, že negativní vlivy kolísání napětí rostou s třetí mocninou hodnoty P_{st} – mezi odbočkou 3 a 6 je tedy rozdíl $1,863/1,473 = 2,0$.
- Naměřené hodnoty odpovídají teorii, protože se snižující se impedancí sériového reaktoru roste zkratový výkon pece a zvyšují se negativní zpětné vlivy na napájecí síť.

Tab. 2. Výsledky dlouhodobého měření vlivu EOP a FKZ

Veličina	Popis	Odběr reaktoru	6	5	4	3	
I_{avg} (A)	střední hodnoty proudu v intervalech 10 min	průměr	83,60	87,20	88,50	88,00	
		percentil 95 %	181,80	185,60	189,80	190,20	
I_{200} (A)	okamžité hodnoty (200 ms) proudu v intervalech 10 min	průměr	128,50	135,90	140,30	141,20	
		percentil 95 %	239,80	246,50	256,40	263,00	
I_{max} (A)	maximální hodnoty (10 ms) proudu v intervalech 10 min	průměr	162,70	173,00	178,20	174,60	
		percentil 95 %	309,50	318,70	329,90	339,90	
P_{avg} (W)	střední hodnoty výkonu v intervalech 10 min	průměr	14,50	15,10	15,30	14,90	
		percentil 95 %	35,90	36,80	37,80	37,70	
P_{st} (-)	pozadí sítě 110 kV	percentil 95 %	1,34	1,34	1,34	1,34	
		celkem EOP + LMF + pozadí	percentil 95 %	1,77	1,87	1,98	2,07
		EOP + LF na R 110 kV	percentil 95 %	1,47	1,60	1,76	1,86
		EOP + LF v PCC	percentil 95 %	1,17	1,28	1,40	1,49
Plt (-)	pozadí sítě 110 kV	percentil 95 %	1,06	1,06	1,06	1,06	
		celkem EOP + LMF + pozadí	percentil 95 %	1,48	1,52	1,61	1,64
		EOP + LF na R 110 kV	percentil 95 %	1,27	1,32	1,43	1,47
		EOP + LF v PCC	percentil 95 %	1,02	1,06	1,15	1,18



Obr. 7. Grafy veličin rozhodujících pro posouzení efektu FKZ

- Měřením bylo prokázáno, že při provozu na libovolné odbočce sériového reaktoru v rozsahu 3 až 6 nejsou problémy s dodržением účinníku, dovolené úrovně harmonických napětí, zkrasení napětí a nesymetrie napětí.
- Měřením flickru v době přestávky v provozu EOP a LF bylo zjištěno, že v napájecí síti 110 kV je hodnota Pst (95 %) = 1,34 a Plt (95 %) = 1,06 (tab. 2), a jsou tak překročeny kompatibilní úrovně i bez provozu EOP a LF. Je to způsobeno tím, že ze společné sítě 110 kV jsou napájeny i další velké průmyslové podniky v regionu, které provozují např. válcovny, pánvové pece, těžní střeže, jež jsou také zdrojem kolísání napětí.
- Je zřejmé, že při provozu s odbočkou 6 sériového reaktoru jsou splněny podmínky dané výjimkou energetického regulačního úřadu (Plt) a kontraktem (Pst). Zároveň je ale patrné, že i při tomto provozu budou překročeny kompatibilní úrovně dané normou. Protože metoda měření kolísání napětí je založena na modelu žárovky 60 W, je důležitá především úroveň flickru v sítích 230 V. Při šíření kolísání elektrického napětí ze sítě 110 kV, přes síť vn až do sítí nn může dojít ke značnému útlumu (podle literatury na 65 až 85 %) a v sítích 230 V budou naměřené hodnoty nižší.



Ing. Jiří Holoubek

Po absolvování Elektrotechnické fakulty Vysokého učení technického v Brně pracoval jako samostatný vývojový pracovník v EZ Praha, později v Elektromontu Brno. V letech 1985 až 1992 byl odborným asistentem na katedře elektroenergetiky FE VUT v Brně, kde se věnoval problematice elektrotepelných spotřebičů velkých výkonů, energetickému rušení a rozvodným zařízením pro průmyslové sítě. Od roku 1992 pracuje ve společnosti ELCOM, a. s., kde zastává funkci výkonného ředitele. Je autorem vysokoškolského skriptu, spoluautorem příručky Kompenzace jalového výkonu v praxi a mnoha článků v odborných časopisech a příspěvků na odborných konferencích.

jiri.holoubek@elcom.cz



Ing. Jaroslav Pawlas

V roce 1980 absolvoval Elektrotechnickou fakultu Vysokého učení technického v Brně v oboru silnoproudá elektrotechnika. V roce 1989 se začal věnovat na též škole postgraduálnímu studiu v oboru navrhování a výpočty elektrických sítí. Do roku 1993 pracoval jako vedoucí projektant v Hutním projektu Ostrava. V roce 1993 se stal zaměstnancem společnosti ELCOM, a. s., kde pracuje v divizi Realizace a inženýring jako inženýr specialista se zaměřením na projekty průmyslových sítí vysokého napětí, na elektrická měření, výpočty elektrických sítí a navrhování kompenzačních prostředků vysokého napětí.

jaroslav.pawlas@elcom.cz

- Řešením je oddělení sítí napájejících velké průmyslové odběry (hutě, doly, strojírenské podniky) od ostatního odběru (byty, kanceláře). Toto je však možné uskutečnit jedině na straně dodavatele elektrické energie.
- Měřením bylo prokázáno, že se snižující se odbočkou na sériovém reaktoru rostou maximální proudy odebírané pecí ze sítí a zvyšuje se jejich proměnlivost. Přitom se také mírně zvyšuje činný výkon pece, opět ale za cenu jeho většího kolísání. ☒