

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

**FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ
ÚSTAV ELEKTROENERGETIKY**

**FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION
DEPARTMENT OF ELECTRICAL POWER ENGINEERING**

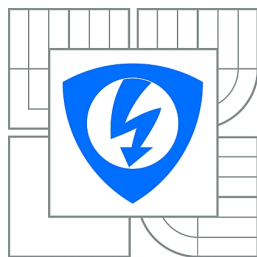
NÁVRH KONCEPCE KOMPENZACE JALOVÉHO VÝKONU V PRŮMYSLOVÉ SÍTI

**DIPLOMOVÁ PRÁCE
MASTER'S THESIS**

**AUTOR PRÁCE
AUTHOR**

Bc. JIŘÍ POPEK

BRNO 2012



VYSOKÉ UČENÍ
TECHNICKÉ V BRNĚ

Fakulta elektrotechniky
a komunikačních technologií

Ústav elektroenergetiky

Diplomová práce

magisterský navazující studijní obor
Elektroenergetika

Student: Bc. Jiří Popek

ID: 106725

Ročník: 2

Akademický rok: 2011/2012

NÁZEV TÉMATU:

Návrh koncepce kompenzace jalového výkonu v průmyslové síti

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

1. Souhrn stávající legislativy pro provoz LDS
2. Kvalita elektřiny obecně
3. Bilance činného a jalového výkonu
4. Způsoby kompenzace a základní typy kompenzátorů jalového výkonu
5. Návrh koncepce kompenzace jalového výkonu pro konkrétní průmyslovou síť – LDS
6. Posouzení variant možností nedokompenzování a překompenzování jednotlivých odběrů
7. Ekonomické vyhodnocení navrženého technického řešení

DOPORUČENÁ LITERATURA:

podle pokynů vedoucího práce

Termín zadání: 6.2.2012

Termín odevzdání: 18.5.2012

Vedoucí práce: doc. Ing. Ilona Lázníčková, Ph.D.

Konzultanti diplomové práce:

doc. Ing. Petr Toman, Ph.D.

Předseda oborové rady

UPOZORNĚNÍ:

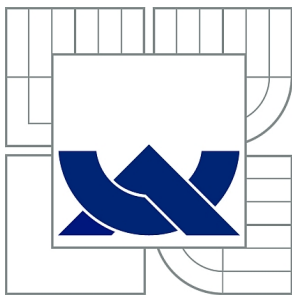
Autor diplomové práce nesmí při vytváření diplomové práce porušit autorská práva třetích osob, zejména nesmí zasahovat nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a musí si být plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č.40/2009 Sb.

Bibliografická citace práce:

POPEK, J. *Návrh koncepce kompenzace jalového výkonu v průmyslové síti*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2012. 55 s. Vedoucí diplomové práce doc. Ing. Ilona Lázníčková, Ph.D..

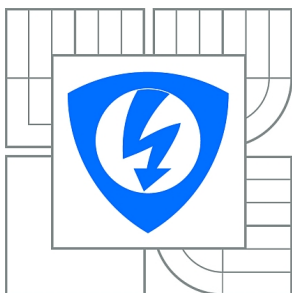
Jako autor uvedené diplomové práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této diplomové práce jsem neporušil autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhl nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a jsem si plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. Díl 4 Trestního zákoníku č. 40/2009 Sb.

.....



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH
TECHNOLOGIÍ

ÚSTAV ELEKTROENERGETIKY

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION
DEPARTMENT OF ELECTRICAL POWER ENGINEERING

NÁVRH KONCEPCE KOMPENZACE JALOVÉHO VÝKONU V PRŮMYSLOVÉ SÍTI

DESIGN OF REACTIVE POWER COMPENSATION IN DISTRIBUTION NETWORK

DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. JIŘÍ POPEK

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

doc. Ing. ILONA LÁZNIČKOVÁ, Ph.D.

BRNO 2012

ABSTRAKT

Tato práce se zabývá návrhem koncepce kompenzace jalového výkonu v průmyslové síti. Cílem je navrhnout kompenzační zařízení tak, aby účinník odebírané energie byl v mezích požadovaných distributorem elektrické energie. Kompenzace jalového výkonu se používá u velkoodběratelů elektrické energie.

Jalový výkon odebíraný spotřebiči zvyšuje proud, který teče distribuční sítí a tím i přenosové ztráty a úbytek napětí. Kompenzace jalového výkonu je prostředek pro snížení odebíraného proudu a ztrát v napájecí síti. Díky tomu je kompenzace jalového výkonu významným úsporným prostředkem v distribuci elektrické energie. Distributor vyžaduje spotřebu elektrické energie s účinníkem v rozmezí 0,95 až 1 induktivního charakteru. Jiné hodnoty účinníku jsou penalizovány.

KLÍČOVÁ SLOVA: jalový výkon, kompenzace jalového výkonu, kompenzace účinníku, kvalita elektrické energie

ABSTRACT

This thesis is about reactive power compensation in industrial network. Task is design reactive power compensation devices, so that the power factor, which is main indicator of power quality, was within the limits required by the distributor. This is applied to wholesale customers of electrical energy.

Reactive power consumed by appliances increased the current that flows through the network, transmission losses and voltage drop. Reactive power compensation is a measure reducing load current and ohmic losses in a supply line. Given that the compensation is one of the significant cost-saving measures in electric power distribution. Distributor requires electric power consumption with a lagging power factor in the range from 0,95 to 1. Other values of power factor are penalized.

KEY WORDS: reactive power, reactive power compensation, power-factor compensation, power quality

OBSAH

SEZNAM OBRÁZKŮ.....	9
SEZNAM TABULEK	10
SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK.....	11
1 ÚVOD	14
2 CÍLE PRÁCE	15
3 SOUHRN SOUČASNÉ LEGISLATIVY PROVOZU LDS.....	16
3.1 VŠEOBECNÉ PODMÍNKY PRO UŽÍVÁNÍ LDS.....	16
3.1.1 PŮSOBNOST ERÚ VE VZTAHU K PPLDS	16
3.1.2 FAKTURACE POPLATKŮ ZA SLUŽBY LDS	17
3.2 PLÁNOVACÍ A PŘIPOJOVACÍ PŘEDPISY PRO LDS.....	17
3.2.1 VŠEOBECNÉ POŽADAVKY NA PŘIPOJENÍ	17
3.2.2 POŽADAVKY NA VÝROBCE ELEKTRICKÉ ENERGIE	18
3.3 PROVOZNÍ PŘEDPISY PRO LDS	19
3.3.1 ODHAD POPTÁVKY	19
3.3.2 PROVOZNÍ PLÁNOVÁNÍ	19
3.3.3 MONITORING LDS	19
3.3.4 BEZPEČNOST ZAŘÍZENÍ LDS	20
3.4 OBCHODNÍ MĚŘENÍ	20
3.4.1 VŠEOBECNÉ POŽADAVKY	20
3.4.2 TECHNICKÉ POŽADAVKY	21
4 KVALITA ELEKTRICKÉ ENERGIE	22
4.1 ENERGETICKÉ RUŠENÍ.....	22
4.1.1 DRUHY SPOTŘEBIČŮ GENERUJÍCÍ HARMONICKÉ.....	23
4.1.2 HARMONICKÉ ZKRESLENÍ	25
4.2 VÝKONY V LINEÁRNÍM A NELINEÁRNÍM OBVODU	25
5 KOMPENZACE JALOVÉHO VÝKONU	28
5.1 PRINCIP KOMPENZACE	28
5.2 DRUHY KOMPENZACE	30
5.3 TYPY KOMPENZÁTORŮ JALOVÉHO VÝKONU.....	30
5.3.1 PROSTÉ KONDENZÁTORY	31
5.3.2 CHRÁNĚNÉ KOMPENZAČNÍ SEKCE	32
5.3.3 PASIVNÍ KOMPENZAČNÍ FILTRY	33
5.3.4 AKTIVNÍ FILTRY	33
5.4 ZPŮSOBY ŘÍZENÍ KOMPENZAČNÍHO VÝKONU	34
5.4.1 STUPŇOVITĚ SPÍNANÁ KOMPENZACE.....	34
5.4.2 PLYNULE REGULOVANÁ KOMPENZACE	35
6 CHARAKTERISTIKA SPOTŘEBIČŮ ELEKTRICKÉ ENERGIE	37
6.1 TRANSFORMÁTORY.....	37

6.2 ASYNCHRONNÍ ELEKTROMOTORY	37
6.3 STEJNOSMĚRNÉ REGULOVANÉ POHONY	38
6.3.1 POHON SE STEJNOSMĚRNÝM MOTOREM S CIZÍM BUZENÍM	38
6.3.2 POHON SE SÉRIOVÝM BUZENÍM	38
6.4 STŘÍDAVÉ REGULOVANÉ POHONY	38
6.4.1 POHONY S PROUDOVÝMI STŘÍDAČI.....	39
6.4.2 POHONY S NAPĚŤOVÝMI STŘÍDAČI	39
6.5 ELEKTROTEPELNÉ SPOTŘEBIČE	39
6.5.1 ELEKTROTEPELNÉ SPOTŘEBIČE S FÁZOVOU REGULACÍ VÝKONU	39
6.5.2 ELEKTROTEPELNÉ SPOTŘEBIČE S INDUKTOREM	40
6.5.3 ELEKTROTEPELNÉ SPOTŘEBIČE S ELEKTRICKÝM OBLOUKEM	40
6.6 ZDROJE SVĚTLA S INDUKČNÍMI A ELEKTRONICKÝMI PŘEDŘADNÍKY	40
7 NÁVRH KOMPENZACE JALOVÉHO VÝKONU V LDS	42
7.1 DISPOZICE VZNIKLÉ LDS	42
7.2 STANOVENÍ POTŘEBNÉHO KOMPENZAČNÍHO VÝKONU	43
7.2.1 VARIANTA KOMPENZACE JEDNOTLIVÝCH UŽIVATELŮ LDS	44
7.2.2 VARIANTA CENTRÁLNÍ KOMPENZACE NA ÚROVNI VYSOKÉHO NAPĚTÍ	46
7.3 INVESTIČNÍ POSOUZENÍ VARIANT	47
7.3.1 INVESTIČNÍ NÁKLADY UŽIVATELŮ LDS	47
7.3.2 INVESTIČNÍ NÁKLADY PROVOZOVATELE LDS	48
8 ZÁVĚR.....	50
POUŽITÁ LITERATURA	52
PRÁVNÍ PŘEDPISY V ENERGETICE	52
PŘÍLOHY	54
PŘÍLOHA A PŘEHLEDOVÉ SCHÉMA PŮVODNÍ SÍTĚ.....	54
PŘÍLOHA B PŘEHLEDOVÉ SCHÉMA VZNIKLÉ LDS.....	55

SEZNAM OBRÁZKŮ

Obr. 4.1: Spektrum generovaných harmonických spínaného zdroje [10]	23
Obr. 4.2: Spektrum generovaných harmonických kompaktní zářivky [10]	24
Obr. 4.3: Spektrum generovaných harmonických šestipulzního můstku [10]	24
Obr. 4.4: Spektrum generovaných harmonických 12pulzního můstku [10]	25
Obr. 4.5: Výkon v jednofázovém obvodu [7]	26
Obr. 4.6: Trojúhelník výkonů [7]	26
Obr. 4.7: Výkon v jednofázovém obvodu s obecnými průběhy napětí a proudu [10]	27
Obr. 4.8: Grafické vyjádření vztahů mezi výkony [10]	27
Obr. 5.1: Princip kompenzace jalového výkonu [1]	28
Obr. 5.2: Vliv kompenzace jalového výkonu [3]	29
Obr. 5.3: Schéma dynamické kompenzace jalového výkonu [3]	35

SEZNAM TABULEK

<i>Tab. 1: Cenová přírážka k činnému výkonu za nedodržení účinníku odběru [8]</i>	<i>43</i>
<i>Tab. 2: Potřeba kompenzačního výkonu pro středofrekvenční pece.....</i>	<i>44</i>
<i>Tab. 3: Potřeba kompenzačního výkonu pro ohřívací pece a kovací stolice</i>	<i>45</i>
<i>Tab. 4: Potřeba kompenzačního výkonu pro pohony lisů</i>	<i>45</i>
<i>Tab. 5: Složení kompenzačních rozváděčů RC1, RC2.....</i>	<i>47</i>
<i>Tab. 6: Složení kompenzačních rozváděčů RC3, RC4.....</i>	<i>47</i>
<i>Tab. 7: Složení kompenzačního rozváděče RC5.....</i>	<i>48</i>
<i>Tab. 8: Složení kompenzačních kobek na jedné sekci rozvodny.....</i>	<i>48</i>

SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK

C	kapacita	[F]
D	deformační výkon	[VA]
$\cos \varphi$	účinník před kompenzací	[-]
$\cos \varphi_k$	účinník po kompenzaci	[-]
$\cos \varphi_1$	účinník první harmonické	[-]
f	frekvence	[Hz]
f_n	jmenovitá frekvence	[Hz]
f_r	rezonanční frekvence	[Hz]
h	řád harmonické	[-]
h_r	řád harmonické při rezonanci	[-]
i_h	poměrný harmonický proud	[-]
I_h	harmonický proud	[A]
I_1	proud první harmonické	[A]
I_1	proud na začátku vedení	[A]
I_2	odebíraný proud	[A]
$\bar{I}$	fázor proudu před kompenzací	[A]
I	modul proudu před kompenzací	[A]
$\bar{I}_C$	proud kondenzátoru	[A]
$\bar{I}_k$	fázor proudu po kompenzaci	[A]
I_j	jalový proud před kompenzací	[A]
I_{jk}	jalový proud po kompenzaci	[A]
I_k	modul proudu po kompenzaci	[A]
k	přirozené číslo	[-]
k_k	koeficient kompenzace	[-]
k_p	stupeň kompenzace	[-]
L	indukčnost	[H]
N_{kov}	investiční náklady na kompenzaci kovárny	[Kč]
N_{lis}	investiční náklady na kompenzaci lisovny	[Kč]
N_{LDS}	investiční náklady na centrální kompenzaci	[Kč]
p	činitel ztlumení	[%]
p	počet pulzů měniče	[-]

p	okamžitý výkon	[-]
P	činný výkon	[W]
$\Delta p_{\%}$	procentní snížení ztrát výkon	[%]
ΔP	ztráty výkonu před kompenzací	[W]
ΔP_k	ztráty výkonu po kompenzaci	[W]
P_Z	ztráty v kondenzátoru	[W]
P_2	odebíraný výkon	[W]
P_{kov}	instalovaný výkon v kovárně	[W]
P_{lis}	instalovaný výkon v lisovně	[W]
P_{skl}	instalovaný výkon ve velkoskladech	[W]
Q	jakost cívky	[-]
Q	jalový výkon	[VAr]
Q_C	jalový výkon kondenzátoru	[VAr]
Q_{LC}	jalový výkon chráněné kompenzační sekce	[VAr]
R	elektrický odpor	[Ω]
S	zdánlivý výkon	[VA]
$tg \delta$	ztrátový činitel kondenzátoru	[-]
$tg \delta_h$	ztrátový činitel kondenzátoru pro harmonické	[-]
u_h	poměrné harmonické napětí	[-]
U_C	napětí na kondenzátoru	[V]
U_{Cn}	jmenovité napětí kondenzátoru	[V]
U_h	harmonické napětí	[V]
U_n	jmenovité napětí	[V]
U_1	napětí první harmonické	[V]
U_1	modul napětí na začátku vedení	[V]
U_2	modul napětí v místě odběru	[V]
$\bar{U}_1$	fázor napětí na začátku vedení	[V]
$\bar{U}_2$	fázor napětí v místě odběru	[V]
X_C	kapacitní reaktance	[Ω]
X_L	induktivní reaktance	[Ω]
X_{LC}	reaktance chráněné kompenzační sekce	[Ω]
$\bar{Z}$	impedance	[Ω]
β_{kov}	součinitel soudobosti chodu spotřebičů v kovárně	[-]

β_{lis}	součinitel soudobosti chodu spotřebičů v lisovně	[-]
β_{skl}	součinitel soudobosti chodu spotřebičů ve velkoskladech	[-]
λ	účinník	[-]

CFL	Compact fluorescent lamp
DS	Distribuční soustava
ERÚ	Energetický regulační úřad
ES	Elektrizační soustava
EZ	Energetický zákon
FVE	Fotovoltaická elektrárna
HDO	Hromadné dálkové ovládání
LDS	Lokální distribuční soustava
MPO	Ministerstvo průmyslu a obchodu
PCC	Point of Common Coupling
PPLDS	Pravidla provozování lokální distribuční soustavy
SMPS	Switch mode power supply
UPS	Uninterruptible Power Supply

1 ÚVOD

Spotřebiče, které potřebují ke své činnosti vytvořit magnetické pole, způsobují fázový posun mezi napětím napájecí sítě a proudem. Jalový proud induktivního charakteru odebíraný spotřebiči zvyšuje proud, který sítí protéká a tím i přenosové ztráty a úbytek napětí.

Kompenzace jalového výkonu je opatření ke snížení proudové zátěže a ohmických ztrát v napájecím vedení a to eliminací indukčního jalového výkonu pomocí vhodně zvolených prostředků. Snížením celkového zdánlivého proudu ve vedení dosáhneme odlehčení napájecího vedení o přenášený induktivní jalový výkon a tím pádem snížení jeho zatížení, úbytků napětí a prodloužení jeho životnosti.

Vzhledem k tomu, že kompenzace patří mezi významná úsporná opatření při rozvodu elektrické energie, distributor za opory legislativy vyžaduje odběr elektrické energie s induktivním účínkem v pásmu 0,95-1, nižší hodnoty znamenající vyšší odebíraný jalový výkon jsou penalizovány.

Na straně druhé však může nastat situace přebytku jalového kapacitního výkonu vlivem špatně řízeného kompenzačního zařízení. Způsobený přebytek kapacitního výkonu, jehož dodávka do sítě distributora je nežádoucí, je rovněž penalizována.

2 CÍLE PRÁCE

Cílem teoretické části práce je souhrn legislativy pro provoz LDS, popis problematiky kvality elektrické energie, způsobů kompenzace a kompenzačních prostředků jalového výkonu a charakteristika spotřebičů elektrické energie.

Cílem praktické části práce je navrhnout koncepci kompenzace jalového výkonu v lokální distribuční soustavě, porovnání technických řešení možných variant kompenzace a jejich investiční zhodnocení.

3 SOUHRN SOUČASNÉ LEGISLATIVY PROVOZU LDS

Činnost funkce každé LDS je řízená svými pravidly provozování lokální distribuční soustavy [11]. V těchto pravidlech jsou zveřejněny technické, plánovací, provozní a informační požadavky pro připojení uživatelů k LDS a pro její užívání. PPLDS vycházejí ze zákona č. 458/2000 Sb. [L1] a z navazujících vyhlášek MPO a ERÚ [L2][L3][L4][L5][L6][L7][L8].

Pravidla provozování lokální distribuční soustavy navazují na Pravidla provozování distribuční soustavy tak, aby společně zajistila průhledné a nediskriminační podmínky pro potřebný rozvoj i spolehlivý provoz elektrizační soustavy ČR a dodávky elektřiny v potřebné kvalitě. Dodržení požadavků PPLDS je jednou z podmínek pro připojení uživatele k LDS. Jejich účelem je zajistit, aby se provozovatel i každý uživatel LDS spravedlivě podíleli na udržování sítě v dobrých provozních podmínkách, byli schopni zabránit vzniku poruch nebo omezit jejich šíření dále do soustavy a byl tak zabezpečen stabilní provoz LDS.

Provozovatel LDS je povinen na vymezeném území dodávat elektrickou energii chráněným zákazníkům, připojit k LDS každého a umožnit distribuci elektřiny každému, kdo o to požádá a splňuje podmínky dané EZ, jeho prováděcími vyhláškami a PPLDS. Místo a způsob připojení k LDS se určí tak, aby nedošlo k přetížení nebo překročení parametrů žádného prvku sítě. PPLDS definují technické aspekty provozních vztahů mezi provozovatelem LDS a všemi dalšími uživateli připojenými k LDS. Ustanovení PPLDS jsou společná a závazná pro provozovatele a všechny uživatele LDS. Kromě PPLDS musí provozovatelé LDS plnit své závazky vyplývající z licence a z obecných právních předpisů.

3.1 Všeobecné podmínky pro užívání LDS

PPLDS je soubor veřejně dostupných dokumentů specifikujících zásady působnosti provozovatele a uživatelů LDS (společná část PPLDS). Pokud mají LDS místní specifické odlišnosti, pak je provozovatel LDS povinen zpracovat druhou část PPLDS formou doplňku, který tyto odlišnosti řeší. Provozovatel LDS zašle tento doplněk společně s havarijním plánem ERÚ ke schválení.

3.1.1 Působnost ERÚ ve vztahu k PPLDS

Energetický regulační úřad chrání zájmy spotřebitelů s cílem uspokojení všech přiměřených požadavků na dodávku elektrické energie. Dále ERÚ:

- rozhoduje případy, kdy nedojde k dohodě o uzavření smlouvy mezi jednotlivými držiteli licencí a jejich zákazníky,
- rozhoduje případy, kdy nedojde k dohodě o přístupu třetích stran,
- spolupracuje ve věcech regulace se zástupci odběratelů a konečných zákazníků.

Prováděcím právním předpisem stanoví ERÚ:

- kvalitu dodávek a služeb,
- podmínky připojení a dodávek pro chráněné zákazníky, které musí provozovatel LDS respektovat.

V průběhu působnosti PPLDS bude ERÚ shromažďovat a evidovat připomínky jednotlivých provozovatelů a uživatelů LDS k platnému znění PPLDS. Nejméně jednou ročně nebo při potřebě upravit stávající znění PPLDS, zajistí ERÚ svolání pracovní komise, která má za úkol:

- vyhodnotit dosavadní funkci společné části PPLDS,
- odstranit vzniklé nedostatky vytvořením nového znění společné části PPLDS,
- předložit nový návrh společné části PPLDS ke schválení a zveřejnění ERÚ.

3.1.2 Fakturace poplatků za služby LDS

Vyhláška [L7] ukládá provozovatelům LDS fakturovat zákazníkům připojených k jejich LDS poplatky za:

- rezervaci kapacity LDS (Kč/MW),
- použití LDS (Kč/MWh),
- systémové služby na úrovni PS.

3.2 Plánovací a připojovací předpisy pro LDS

Plánovací a připojovací předpisy pro LDS stanovují technická a návrhová kritéria a procedury, které má provozovatel LDS dodržovat při plánování výstavby, rozvoje a obnovy LDS a připojování uživatelů k LDS. Tyto předpisy se dále vztahují na všechny uživatele LDS při plánování výstavby, rozvoje a obnovy jejich soustav mající vliv na LDS.

3.2.1 Všeobecné požadavky na připojení

U odběrů ze sítí nízkého napětí lze ve většině případů rozhodnout o podmínkách připojení na základě následujících údajů:

- adresa odběrného místa,
- rezervovaný příkon, požadovaná hodnota hlavního jističe,
- charakter odběru (např. bytový, podnikatelský apod., jeho sezónnost),
- typ a odběr připojovaných spotřebičů (počet a výkon motorů, elektrické pece a topení, svářecí zařízení, řízené pohony),
- požadovaná kvalita zásobování (spolehlivost a maximální doba přerušení dodávky),
- datum, ke kterému je připojení požadováno,
- adresa pro zasílání korespondence (informace o přerušení nebo omezení dodávky elektrické energie).

U odběrů ze sítí nízkého napětí je odběratel povinen podat novou žádost provozovateli LDS o připojení k LDS při uvažované změně velikosti nebo charakteru odběru.

U dodávek o jiném než nízkém napětí předloží odběratel na požádání kromě uvedených údajů navíc ještě následující informace:

- 1) Pro všechny typy odběrů:
 - maximální požadovaný činný výkon,
 - maximální a minimální požadavky na jalový výkon, údaje o místní kompenzaci,
 - typy zátěží a jejich řízení, např. řízený usměrňovač nebo velký motorový pohon a jeho spouštění, indukční pece, kompenzační zařízení,
 - maximální zátěž pro každou fázi v době maximálního odběru,
 - maximální harmonické proudy, které budou protékat do LDS.
- 2) Pro kolísající odběry (svářecí automaty, elektrické pece apod.) ještě podrobné údaje o cyklických změnách a o pracovním cyklu připojovaného zařízení, činném a jalovém výkonu, zejména:

- rychlost změn činného a jalového výkonu (týká se poklesu i nárůstu),
- nejkratší časový interval kolísání činného a jalového výkonu,
- velikost největších skokových změn činného a jalového výkonu (týká se poklesu i nárůstu).

3.2.2 Požadavky na výrobce elektrické energie

Požadavky na elektrické parametry výroby elektrické energie, měřené na svorkách generátorové jednotky, stanoví provozovatel LDS při jednání o připojení výroby k LDS v závislosti na způsobu připojení. Výrobna musí být schopna dodávat svůj sjednaný činný výkon s frekvencí soustavy v rozmezí podle [15]. Činný výkon by neměly ovlivňovat změny napětí v povoleném provozním pásmu. Provozovatel LDS stanoví, zda je pro řízení napětí výroby požadován pracující automatický systém buzení s rychlou odezvou bez nestability v celém provozním pásmu výroby. To závisí na velikosti, typu výroby a sousedících částí LDS. Provozovatel LDS stanoví případné požadavky na koordinaci řízení napětí v uzlu LDS a stanoví pásmo pro jalový výkon výroby.

Výrobci elektrické energie se podle instalovaného výkonu a napěťové úrovně, do které pracují, dělí tří základních kategorií:

- 1) výrobce elektrické energie s výrobnou připojenou na vysoké napětí nebo nižší nebo s výkonem menším než 5 MW,
- 2) výrobce elektrické energie s výrobnou připojenou na vysoké napětí nebo vyšší nebo s výkonem 5 MW až 30 MW,
- 3) výrobce elektrické energie s instalovaným výkonem přesahující 30 MW.

Provozovatel LDS použije poskytnuté informace k vypracování modelu LDS a rozhodne o způsobu připojení a potřebné napěťové úrovni pro připojení. Před stanovením podmínek připojení jakékoli výroby k LDS si provozovatel LDS může od všech výrobců vyžádat tyto informace:

- 1) Údaje o výrobě (pro jednotlivé generátory):
 - jmenovité výstupní napětí,
 - jmenovitý zdánlivý výkon,
 - jmenovitý činný výkon,
 - maximální dodávaný činný výkon, případně požadavky na jalový výkon,
 - druh generátoru,
 - pohon generátoru,
 - očekávaný provozní režim výroby elektrické energie (např. trvalý, přerušovaný, pouze ve špičce),
 - příspěvek ke zkratovému proudu,
 - řízení napětí (typ regulátoru a možnost připojení do automatické sekundární regulace napětí),
 - údaje o transformátoru, do kterého je generátor vyveden,
 - požadavky pro krytí vlastní spotřeby nebo pohotovostní dodávky,
 - schopnost ostrovního provozu,
 - způsob vyvedení výkonu od generátoru po předávací místo.
- 2) Řešení místa připojení:
 - způsob synchronizace mezi provozovatelem LDS a uživatelem,

- potřebné údaje o řešení způsobu provozu uzlu té části soustavy výrobce, která je přímo připojena k LDS,
- způsob připojení a odpojení od LDS,
- údaje o síťových ochranách.

3.3 Provozní předpisy pro LDS

Provozní předpisy jsou souhrnem hlavních zásad, pravidel a povinností při řízení provozu LDS.

3.3.1 Odhad poptávky

Pro úspěšný rozvoj, provoz a řízení LDS je nutné, aby její uživatelé poskytovali provozovateli LDS informace o předpokládaném odebíraném a dodávaném výkonu (poptávce a nabídce). To platí, pokud si provozovatel LDS v doplňku k PPLDS nestanoví jinak, pro následující uživatele:

- výrobce elektrické energie s výrobnami připojenými k LDS o výkonu 1 MW a vyšším,
- odběratele LDS s rezervovaným příkonem 1 MW a vyšším.

Tam, kde se od uživatele vyžadují údaje o poptávce a nabídce, jde o požadavek na činný výkon v odběrném místě mezi LDS a uživatelem. Provozovatel LDS může v určitých případech požadovat údaje o jalovém výkonu, velikosti technického maxima, velikosti rezervovaného příkonu a množství požadované elektrické energie na čtvrtletí.

Cílem je:

- stanovit celkový odhad poptávky a odhad nabídky výkonu vyroben z údajů, které poskytnou uživatelé tak, aby umožnili provozovateli LDS provozovat a rozvíjet LDS,
- specifikovat požadované informace, které poskytnou uživatelé provozovateli LDS tak, aby mu umožnili splnit závazky, které pro něj vyplývají z PPDS.

3.3.2 Provozní plánování

Provozní plánování slouží ke koordinaci odstávek výroben a dalšího zařízení tak, aby nebyl narušen spolehlivý a efektivní provoz LDS. Provozního plánování se musí zúčastnit provozovatel LDS a následující uživatelé LDS:

- výrobcí připojení do LDS s registrovaným výkonem 1 MW nebo vyšším,
- odběratelé s vlastní výrobou elektrické energie tam, kde to provozovatel LDS uzná za vhodné.

3.3.3 Monitoring LDS

Provozovatel LDS je oprávněn systematicky nebo namátkově sledovat vliv uživatele na provoz LDS. Toto sledování se bude zpravidla týkat velikosti a průběhu činného a jalového výkonu, přenášeného odběrným místem. V případech, kdy uživatel dodává do LDS nebo odebírá z LDS činný a jalový výkon, který překračuje hodnoty sjednané pro odběrné místo, bude provozovatel LDS o tom uživatele informovat a podle potřeby také doloží výsledky sledování. Pokud uživatel překračuje dohodnuté hodnoty, je povinen neprodleně omezit přenos činného a jalového výkonu na rozsah dohodnutých hodnot.

V případech, kdy uživatel požaduje zvýšení činného a jalového výkonu, které nepřekračuje technickou kapacitu odběrného místa, musí dodržet hodnoty a parametry odběru/dodávky podle platných smluv o připojení a dopravě elektrické energie. Zvýšení hodnot a parametrů odběru/dodávky předpokládá uzavření nových smluv.

3.3.4 Bezpečnost zařízení LDS

Pro zajištění bezpečnosti zařízení LDS je provozovatel LDS a uživatel LDS v místě připojení povinen:

- uvádět do provozu jen taková zařízení, která odpovídají příslušným platným normám a předpisům,
- vést technickou dokumentaci pro výrobu, přepravu, montáž, provoz, údržbu a opravy zařízení. Dále technickou dokumentaci technologií, která musí obsahovat požadavky na zajištění bezpečnosti práce. Součástí technické dokumentace musí být zásady pro vykonávání kontrol, zkoušek a revizí,
- podrobovat zařízení po dobu jejich provozu pravidelným předepsaným kontrolám, zkouškám, revizím, údržbě a opravám,
- zaznamenávat provedené změny na zařízeních a v technologiích do jejich technické dokumentace a tyto změny oznamovat provozovateli LDS, pokud tyto změny ovlivňují údaje uvedené v žádosti o připojení,
- organizovat práci, stanovit a provádět pracovní postupy související s výstavbou, řízením, provozem a údržbou zařízení tak, aby byly dodržovány předpisy k zajištění bezpečnosti a ochrany zdraví při práci, předpisy požární ochrany a ochrany životního prostředí.

3.4 Obchodní měření

Úkolem obchodního měření je korektním způsobem získávat data o odebírané a dodávané elektrické energii. Takto pořízená data dále poskytovat oprávněným zákazníkům trhu s náležitou důvěrností. Naměřená data z obchodního měření slouží pro většinu používaných způsobů účtování na trhu s elektrickou energií [13].

3.4.1 Všeobecné požadavky

Měřicí bod je zpravidla fyzický bod sítě, ve kterém se snímá, měří a registruje elektrická energie. Podle možného směru toku energie se jedná o dodávající, nebo odběrný bod. Vytváří-li se u složitějších případů měření součty nebo rozdíly z naměřených hodnot v registračních přístrojích nebo pomocí výpočetní techniky, jsou přiřazovány tzv. virtuální měřicí body.

Měřicí místo je místem měření elektrické energie v zařízeních ES a odběrných místech konečných zákazníků. Představuje v praxi soubor technických prostředků a měřicích přístrojů připojených k jednomu měřicímu bodu.

Měřicí zařízení sloužící k měření, vyhodnocení a zúčtování obchodu s elektrickou energií jsou měřicí transformátory, elektroměry a registrační stanice včetně spojovacího vedení pro přenos naměřených hodnot.

Výjimečné postavení z přístrojů měřicího zařízení zaujímá elektroměr a měřicí transformátory proudu a napětí. Jedná se o tzv. *pracovní měřidla stanovená* a vztahují se na ně vyhlášky [L9][L10]. V praxi to znamená, že jako elektroměr a měřicí transformátor nesmí být

v obchodním měření použít takový přístroj, který nemá přidělenou značku schváleného typu, a který nebyl ověřen. Výrobci a koncoví zákazníci jsou povinni podle EZ neprodleně hlásit závady na měřicích zařízeních, včetně porušení zajištění proti neoprávněné manipulaci. Tato povinnost vyplývá z toho, že měřicí zařízení se nachází zpravidla v odběrném zařízení koncového zákazníka nebo výrobním zařízení výrobce a nemůže být z objektivních důvodů pod častější pravidelnou a přímou kontrolou provozovatele LDS. Za funkčnost a správnost měřicího zařízení je zodpovědný příslušný provozovatel LDS, což vyplývá z jeho povinnosti zajišťovat měření v LDS podle EZ.

Měřicí a zúčtovací interval:

Základním měřicím intervalem (měřicí periodou) je jedna čtvrt hodina. Používá se pro zjišťování hodnoty energie nebo střední hodnoty výkonu při zjišťování průběhu zatížení.

Značení směru toku energie:

Odebíraná energie v daném měřicím bodě je označena jako kladná (+), tj. od provozovatele LDS k uživateli sítě, dodávaná energie jako záporná (-), tj. od uživatele sítě k provozovateli LDS.

3.4.2 Technické požadavky

Vedle všeobecných požadavků musí měřicí zařízení splňovat i další minimální technické požadavky, které jsou popsány v [L6]. Druh měřicího zařízení, způsob jeho instalace a umístění jsou pro jednodušší případy obsaženy ve standardech provozovatele LDS. V zásadě platí, že měřicí zařízení se umísťuje do odběrného zařízení konečného zákazníka nebo do rozvodného zařízení výroby co nejbližší k místu rozhraní s provozovatelem LDS.

3.4.2.1 Druhy měření a měřicích zařízení

Základní součástí každého měřicího zařízení je elektroměr sloužící k měření elektrické činné a jalové energie. Měření je přímé, prochází-li elektroměrem veškerá měřená energie, nebo převodové, kde je elektroměr zapojen přes měřicí transformátory. U převodového měření v síti nízkého napětí se používají jen proudové měřicí transformátory. U měření v síti vysokého a velmi vysokého napětí se používají proudové i napěťové měřicí transformátory. Podle toho, na kterou stranu příslušného napájecího transformátoru jsou měřicí transformátory připojeny, mluvíme o tzv. primárním nebo sekundárním měření.

Pro měření množství elektrické energie a středních hodnot výkonu se používají následující způsoby měření [L6]:

- 1) typ A – průběhové měření elektrické energie s dálkovým přenosem údajů,
- 2) typ B – průběhové měření elektrické energie s odečtem pomocí ručního terminálu,
- 3) typ C – ostatní měření elektrické energie.

Při průběhovém měření je kontinuálně zaznamenávána hodnota energie nebo střední hodnota výkonu v měřicím intervalu. Měřicím přístrojem může být podle provedení měřicího zařízení buď samotný elektroměr, nebo externě připojený registrační přístroj. U měření typu C mohou být data odečtena ručně pomocí terminálu, nebo vypsáním příslušného dokladu.

4 KVALITA ELEKTRICKÉ ENERGIE

Kvalita elektrické energie je definována jejími charakteristikami v daném bodě ES, porovnávanými s mezními velikostmi referenčních technických parametrů. Jednotlivé charakteristiky napětí elektrické energie, popisující její kvalitu dodávané z veřejné DS vycházejí z normy [15]. Pro sítě nízkého a vysokého napětí to jsou následující charakteristiky:

- 1) kmitočet sítě,
- 2) velikost napájecího napětí,
- 3) odchylky napájecího napětí,
- 4) rychlé změny napětí,
 - velikost rychlých změn napětí,
 - míra vjemu flikru,
- 5) krátkodobé poklesy napájecího napětí,
- 6) krátkodobá přerušení napájecího napětí,
- 7) dlouhodobá přerušení napájecího napětí,
- 8) dočasná přepětí o síťovém kmitočtu mezi živými vodiči a zemí,
- 9) přechodná přepětí mezi živými vodiči a zemí,
- 10) nesymetrie napájecího napětí,
- 11) harmonická napětí,
- 12) mezipharmonická napětí,
- 13) úroveň napětí signálů v napájecím napětí.

Pro charakteristiky 1) až 4) a 10) až 13) platí pro odběrná místa z DS nebo LDS s napětíovou úrovní nízkého a vysokého napětí:

- zaručované hodnoty,
- měřicí intervaly,
- doby pozorování,
- mezní pravděpodobnosti splnění stanovených limitů stanovené v [15].

Pro charakteristiky 5) až 9) uvádí [15] pouze informativní hodnoty.

4.1 Energetické rušení

Zdrojem energetického rušení je každé elektrické zařízení, které svým provozem způsobuje [3]:

- zkreslení napájecího napětí,
- kolísání efektivní hodnoty napětí,
- nesymetrii trojfázové soustavy,
- impulsní rušení.

Zkreslení křivky napájecího napětí způsobují prostřednictvím impedance napájecí sítě zařízení generující do této sítě harmonické proudy. Harmonické proudy způsobují na frekvenčně závislé impedanci napájecí sítě pro každou harmonickou frekvenci různě velké úbytky napětí, které se superponují na základní sinusovou vlnu napětí, a tím ji zkreslují.

Kolísání efektivní hodnoty napětí dochází při změnách velikosti proudu protékajícího napájecí sítě, čímž se mění i velikost úbytku napětí na impedanci sítě. Protože činná složka impedance sítě je velmi nízká, má rozhodující podíl na velikosti úbytku napětí jalový proud.

Jednofázové spotřebiče nebo nesymetricky provozované trojfázové spotřebiče způsobují na impedanci sítě v každé fázi různé velké úbytky napětí, a tím dochází k nesymetrii velikostí fázových napětí. Ta v běžných průmyslových sítích nedosahuje hodnoty 10 % jmenovitého napětí. Nesymetrie v úhlech mezi jednotlivými vektory fázových napětí je v drtivé většině případů distribučních i průmyslových sítích zanedbatelná[3].

Jako zdroj impulzního rušení se projevují veškeré spínací prvky.

4.1.1 Druhy spotřebičů generujících harmonické

Z hlediska provozu statických kompenzačních prostředků a návrhu nových kompenzačních zařízení jsou velmi důležité úrovně harmonických proudů generované jednotlivými typy spotřebičů elektrické energie.

Harmonické proudy jsou generovány všemi nelineárními spotřebiči. Takové spotřebiče například jsou [10]:

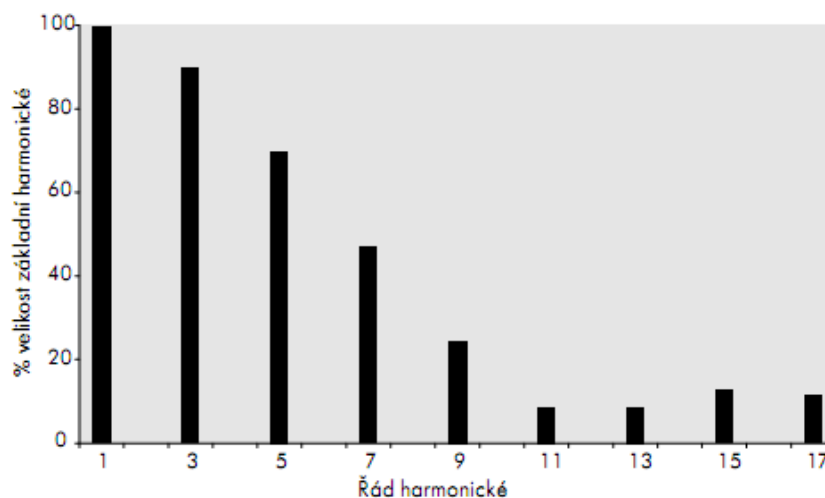
Jednofázové:

- spínané napájecí zdroje (SMPS),
- elektronické předřadníky kompaktních zářivek (CFL),
- malé UPS jednotky.

Trojfázové zátěže:

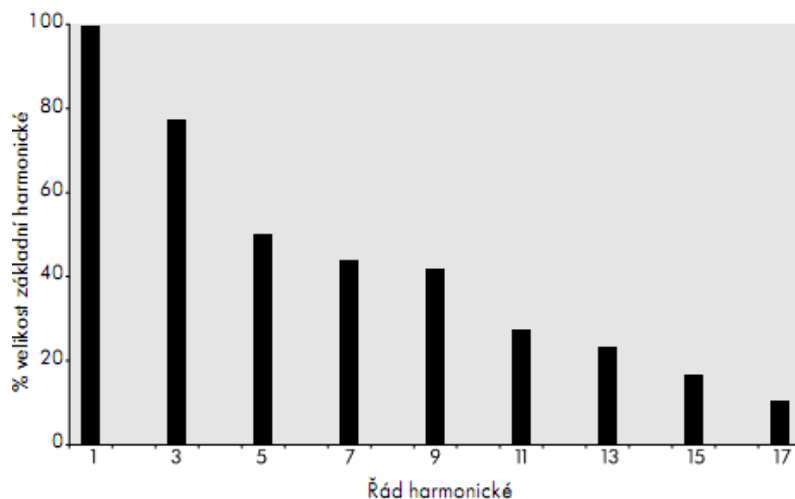
- elektrické regulované pohony,
- velké UPS jednotky.

Spínané napájecí zdroje používá většina moderních elektronických přístrojů. Klasický snižovací transformátor a usměrňovač je nahrazen řízeným usměrňovačem, který nabíjí kondenzátor a ten napájí stejnosměrnou zátěž. Výhodou takového zdroje je nízká hmotnost a cena. Nevýhodou je, že zdroj odebírá ze sítě pulsující proud, který obsahuje velké množství harmonických proudů. Spektrum generovaných harmonických je na Obr. 4.1. Jednofázové UPS jednotky vykazují velmi podobnou charakteristiku jako SMPS.



Obr. 4.1: Spektrum generovaných harmonických spínaného zdroje [10]

Kompaktní zářivky se nyní prodávají jako náhrada za žárovky s wolframovým vláknem. Miniaturní elektronický předřadník je umístěn v patci svítidla, do které je zasazena zářivková trubice. Spektrum harmonických těchto zářivek je na Obr. 4.2.



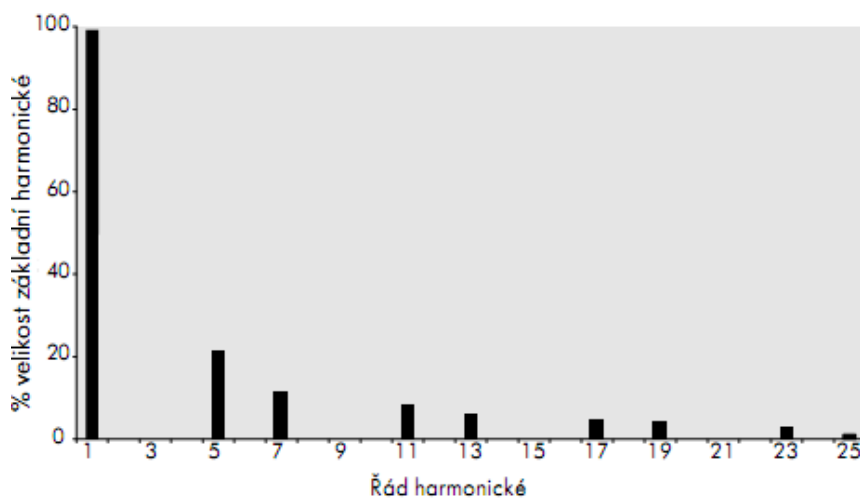
Obr. 4.2: Spektrum generovaných harmonických kompaktní zářivky [10]

U můstkového zapojení polovodičových měničů, které je nejčastějším zapojením používaným v řízených i neřízených usměrňovačích, vstupních měničích statických frekvenčních měničů a dalších aplikacích, se setkáváme s tzv. *charakteristickými harmonickými*, jejichž řád h má vazbu na počet pulzů měniče p [4]. Řády generovaných harmonických vypočteme podle [3]:

$$h = k \cdot p \pm 1, \quad [-; -, -] \quad (1)$$

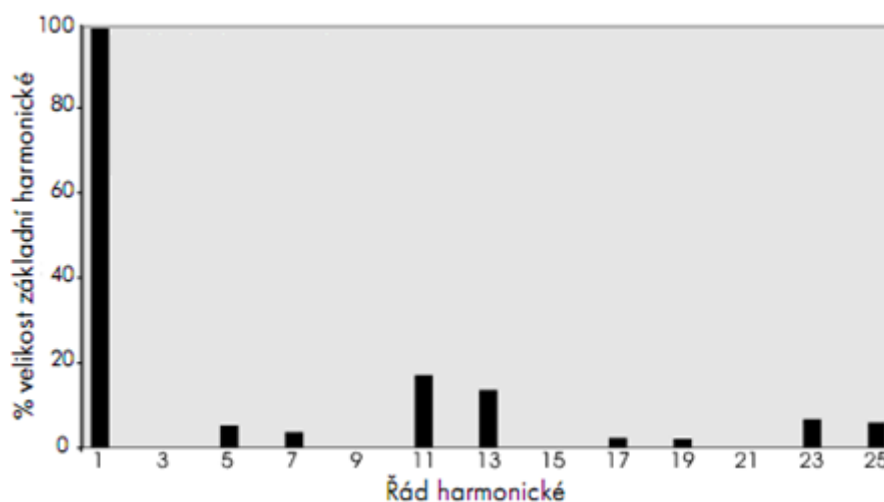
kde k je přirozené číslo

Spektrum generovaných harmonických šestipulzního můstku je na Obr. 4.3



Obr. 4.3: Spektrum generovaných harmonických šestipulzního můstku [10]

Velikost generovaných harmonických může být redukováno použitím 12pulzního můstku. Jedná se o dva šestipulzní můstky napájené z transformátorového vinutí zapojeného hvězda/trojúhelník s 30° fázovým posunem mezi těmito vinutími. Spektrum generovaných harmonických 12pulzního můstku je na Obr. 4.4.



Obr. 4.4: Spektrum generovaných harmonických 12pulzního můstku [10]

4.1.2 Harmonické zkreslení

Pro možnost posouzení velikosti harmonických napětí a proudu se zavádí jejich poměrné hodnoty. Ty jsou definovány jako poměr efektivní hodnoty h -té harmonické a efektivní hodnoty základní harmonické viz rovnice (2). Platí [6]:

$$u_h = \frac{U_h}{U_1}; i_h = \frac{I_h}{I_1} \quad [-; V, V]; [-; A, A] \quad (2)$$

Pro posouzení obsahu harmonických v síti se zavádí *činitel harmonických (THF)* a *celkové harmonické zkreslení (THD)*. Činitel harmonických je definován jako poměr efektivní hodnoty obsahu harmonických střídavé veličiny k efektivní hodnotě této veličiny. Celkové harmonické zkreslení je definováno jako poměr efektivní hodnoty obsahu harmonických k efektivní hodnotě základní harmonické. Podle normy [15] stačí uvažovat harmonické do řádu 40. Celkové harmonické zkreslení a činitel harmonických a pak můžeme vyjádřit podle [6]:

$$THD_U = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{40} U_h^2}}{U_1}; THD_I = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{40} I_h^2}}{I_1} \quad [-; V, V]; [-; A, A] \quad (3)$$

$$THF_U = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{40} U_h^2}}{U}; THF_I = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{40} I_h^2}}{I} \quad [-; V, V]; [-; A, A] \quad (4)$$

4.2 Výkony v lineárním a nelineárním obvodu

Pro jednofázový lineární obvod můžeme podle Obr. 4.5 a Obr. 4.6 definovat následující pojmy [7].

Zdánlivý výkon S (apparent power) je veličina definovaná jako součin efektivní hodnoty napětí a proudu:

$$S = U \cdot I = \sqrt{P^2 + Q^2} \quad [VA; V, A; W, VAR] \quad (5)$$

Činný výkon P (active power) je fyzikální veličina, která vyjadřuje množství elektrické energie přenesené za jednotku času. Okamžitý výkon je součin okamžité hodnoty napětí a proudu:

$$p = \sqrt{2} \cdot U \cdot \sin(\omega t) \cdot \sqrt{2} \cdot I \cdot \sin(\omega t - \varphi) \quad [\text{W}; \text{V}, \text{A}] \quad (6)$$

Po úpravě lze tento vztah upravit do tvaru:

$$p = U \cdot I \cdot \cos \varphi - U \cdot I \cdot \cos(2\omega t - \varphi) \quad [\text{W}; \text{V}, \text{A}] \quad (7)$$

Druhý člen výrazu představuje střídavou složku s dvojnásobným kmitočtem sítě, první člen je konstantní složka posunující střídavou složku nad vodorovnou osu viz Obr. 4.5. Činný výkon se určí jako ekvivalentní konstantní hodnota výkonu P , který za jednu periodu přenesl stejné množství energie jako okamžitý výkon p . Z této definice vyplývá, že činný výkon je střední hodnota průběhu okamžitého výkonu. Protože střídavá složka má střední hodnotu nulovou, je činný výkon definován podle:

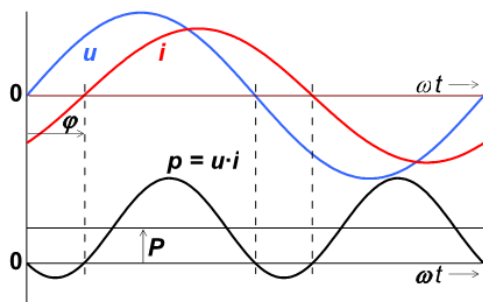
$$P = U \cdot I \cdot \cos \varphi \quad [\text{W}; \text{V}, \text{A}, -] \quad (8)$$

Jalový výkon Q (reactive power) reprezentuje střídavou složku okamžitého výkonu, tj. energii periodicky se přelévající mezi zdrojem a zátěží. Podle Obr. 4.6 můžeme psát:

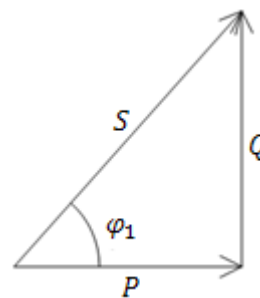
$$Q = U \cdot I \cdot \sin \varphi \quad [\text{VAR}; \text{V}, \text{A}, -] \quad (9)$$

Účinník λ (power factor) je používaný ukazatel při hodnocení kvality odběru elektrické energie. Je definován jako poměr činného a zdánlivého výkonu:

$$\lambda = \frac{P}{S} \quad [-; \text{W}, \text{VA}] \quad (10)$$



Obr. 4.5: Výkon v jednofázovém obvodu [7]



Obr. 4.6: Trojúhelník výkonů [7]

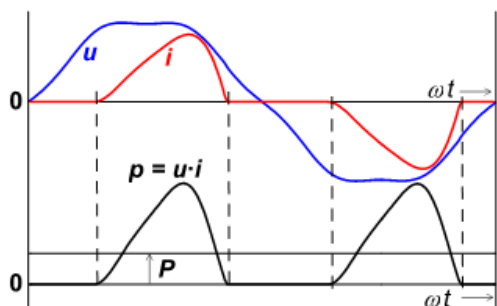
Ve zvláštním případě čistě sinusových průběhů napětí a proudu, a v trojfázových systémech navíc se symetrickou soustavou sinusových napájecích napětí a sinusových zatěžovacích proudů, je účinník roven $\cos \varphi$, tj. fázovému posunu průběhu proudu proti napětí.

Pro jednofázový obvod s obecnými průběhy napětí a proudu podle Obr. 4.7 je okamžitý činný výkon p tvořen řadou součinů, kde se každý člen řady složek napětí násobí každým členem z řady složek proudu. Pro vytvoření činného výkonu P mají význam složky, které mají nenulovou střední hodnotu. Je to součin stejnosměrných složek a část součinu složek napětí a proudu stejného řádu:

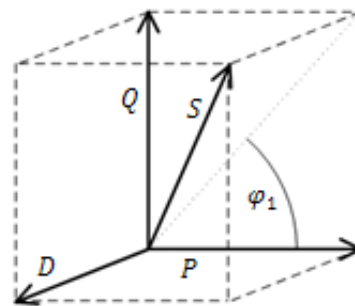
$$P = U_0 \cdot I_0 + \sum_{h=1}^{\infty} U_h \cdot I_h \cdot \cos \varphi_h \quad [\text{W}; \text{V}, \text{A}, -] \quad (11)$$

Zdánlivý výkon v tomto obvodu lze vyjádřit jako součin efektivních hodnot napětí a proudu, z nichž každá je tvořena efektivními hodnotami jednotlivých složek:

$$S = \sqrt{\sum_{h=0}^{\infty} U_h^2} \cdot \sqrt{\sum_{h=0}^{\infty} I_h^2} \quad [\text{VA}; \text{V}, \text{A}] \quad (12)$$



Obr. 4.7: Výkon v jednofázovém obvodu s obecnými průběhy napětí a proudu [10]



Obr. 4.8: Grafické vyjádření vztahů mezi výkony [10]

V mnoha případech je možné předpokládat, že napájecí síť je dostatečně tvrdá. Napětí lze považovat za téměř sinusové se zanedbatelným obsahem stejnosměrné složky i harmonických. Pak $U = U_1$ a výraz pro činný výkon (11) se zjednoduší:

$$P = U_1 \cdot I_1 \cdot \cos \varphi_1 \quad [\text{W}; \text{V}, \text{A}, -] \quad (13)$$

a pro účinník platí:

$$\lambda = \frac{P}{S} = \frac{U_1 \cdot I_1 \cdot \cos \varphi_1}{U_1 \cdot I} = \frac{I_1}{I} \cdot \cos \varphi_1 \quad [-; \text{A}, \text{A}, -] \quad (14)$$

Účinník je tvořen činitelem základní složky proudu a kosinem fázového posunu základní složky proudu proti napětí.

Zdánlivý výkon v tomto obvodu je možné vyjádřit jako:

$$S = \sqrt{(U_1 \cdot I_1 \cdot \cos \varphi_1)^2 + (U_1 \cdot I_1 \cdot \sin \varphi_1)^2 + U_1^2 \cdot \sum_{h=2}^{\infty} I_h^2} \quad [\text{VA}; \text{V}, \text{A}, -] \quad (15)$$

Výrazy pod odmocninou jsou rovny výkonům, a dostaneme:

$$S = \sqrt{P^2 + Q^2 + D^2} \quad [\text{VA}; \text{W}, \text{VAr}, \text{VA}] \quad (16)$$

kde D je tzv. deformační výkon, který je tvořen zdánlivým výkonem harmonických složek proudu.

Vztah mezi činným, jalovým, deformačním a zdánlivým výkonem je zobrazen na Obr. 4.8. Zde je zdánlivý výkon S znázorněn jako prostorová úhlopříčka kváдру o hranách P , Q a D .

5 KOMPENZACE JALOVÉHO VÝKONU

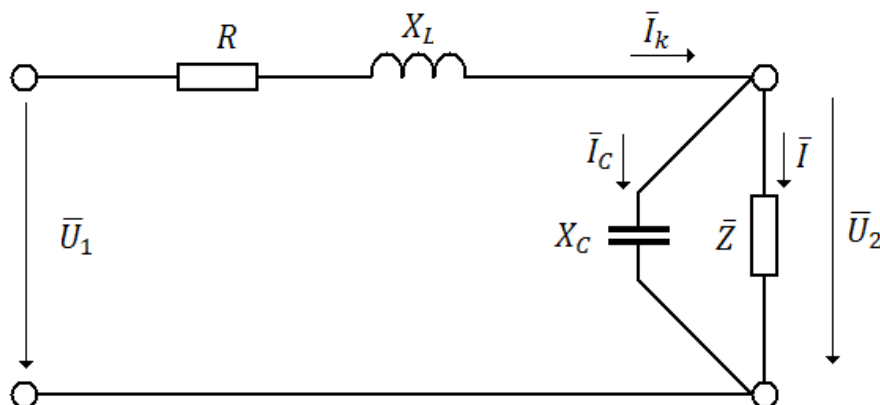
Návrh koncepce kompenzace jalového výkonu v průmyslové síti je velmi důležitou součástí projektové přípravy nové nebo rekonstruované stavby, případně i dodatečné instalace nových spotřebičů. Při projednávání podmínek dodávky elektrické energie pro připojení nového odběrného místa nebo i pro stávající průmyslové sítě, by měly být stanoveny požadavky na kompenzaci jalového výkonu mezi dodavatelem a odběratelem elektrické energie. A právě sjednané podmínky dodávky elektrické energie a způsob měření odběru elektrické energie mají vliv na návrh kompenzačních zařízení [3].

5.1 Princip kompenzace

Spotřebiče, které potřebují ke své činnosti vytvořit magnetické pole, způsobují fázový posun mezi napětím napájecí sítě a jeho proudem. Kompenzace jalového výkonu je opatření ke snížení proudové zátěže a ohmických ztrát v napájecím vedení a to eliminací indukčního jalového výkonu pomocí vhodně zvolených prostředků. Snížením celkového zdánlivého proudu ve vedení, dosáhneme odlehčení napájecího vedení o přenášený induktivní jalový výkon a tím snížení jeho zatížení, úbytků napětí a prodloužení jeho životnosti [9].

Vzhledem k tomu, že kompenzace patří mezi významná úsporná opatření při rozvodu elektrické energie, distributor elektrické energie vyžaduje odběr elektrické energie s induktivním účínkem v pásmu 0,95-1, nižší hodnoty znamenající vyšší odebíraný jalový výkon jsou penalizovány. Na straně druhé však může nastat situace přebytku kapacitního výkonu. Způsobený přebytkem kapacitního výkonu, jehož dodávka do sítě distributora je penalizována, je možné eliminovat např. pomocí dekompenzačních tlumivek.

Princip kompenzace je znázorněn na Obr. 5.1.



Obr. 5.1: Princip kompenzace jalového výkonu [1]

Po připojení paralelního kondenzátoru se celkový proud vedení změní na:

$$\bar{I}_k = \bar{I} + \bar{I}_C \quad [\text{A}; \text{A}, \text{A}] \quad (17)$$

Za předpokladu, že činný výkon zůstane konstantní podle [1]:

$$P_2 = \sqrt{3} \cdot U_2 \cdot I \cdot \cos \varphi = \sqrt{3} \cdot U_2 \cdot I_k \cdot \cos \varphi_k \quad [\text{W}; \text{V}, \text{A}, -] \quad (18)$$

změní se po připojení kondenzátoru fázový posuv z hodnoty φ na hodnotu φ_k . Poměr jalových složek proudů I_{jk} a I_j bude stejný jako tangenty příslušných úhlů. Tento poměr nazýváme koeficientem kompenzace [3].

$$k_k = \frac{I_{jk}}{I_j} \quad [-; A, A] \quad (19)$$

Stupeň kompenzace získáme odečtením koeficientu kompenzace od jedné [4]:

$$k_p = 1 - \frac{I_{jk}}{I_j} = \frac{I_j - I_{jk}}{I_j} = \frac{I_c}{I_j} \quad [-; A, A] \quad (20)$$

Proud v síti pak poklesne na hodnotu [1]:

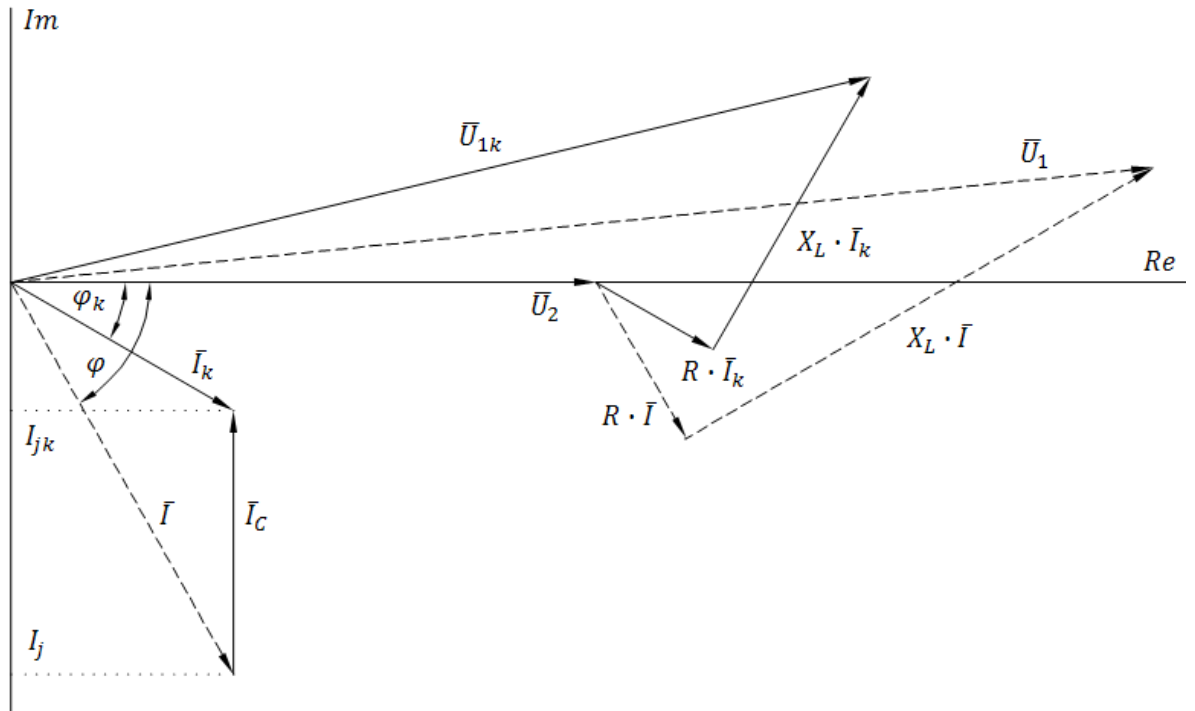
$$I_k = I \cdot \frac{\cos \varphi}{\cos \varphi_k} \quad [A; A, -, -] \quad (21)$$

Procentní snížení ztrát po kompenzaci [1]:

$$\Delta p_{\%} = \frac{\Delta P - \Delta P_k}{\Delta P} \cdot 100 = \frac{3 \cdot R \cdot I^2 - 3 \cdot R \cdot I^2 \cdot \frac{\cos^2 \varphi}{\cos^2 \varphi_k}}{3 \cdot R \cdot I^2} \cdot 100$$

$$\Delta p_{\%} = \left(1 - \frac{\cos^2 \varphi}{\cos^2 \varphi_k} \right) \cdot 100 \quad [\%; -, -] \quad (22)$$

Vliv kompenzace jalového výkonu je znázorněn na Obr. 5.2.



Obr. 5.2: Vliv kompenzace jalového výkonu [3]

Hlavním smyslem kompenzace jalového výkonu je snížení odebíraného zdánlivého výkonu a snížení proudu procházejícího napájecím vedením. Kompenzace tedy patří mezi významná

úsporná opatření, pomocí kterého se snižuje zatížení napájecího vedení, čímž se snižují ztráty a zvyšuje životnost vedení. Snižení odběru indukčního jalového výkonu se dosáhne vhodnou kombinací spotřebičů, které ze sítě odebírají indukční, jalový a kapacitní výkon. Nejpoužívanější metodou v sítích nízkého napětí je kompenzace pomocí paralelně připojených statických kondenzátorů, která je jedním z nejdůležitějších a ekonomicky nejvýhodnějších opatření [9].

5.2 Druhy kompenzace

Při provozu energetických zařízení dochází k neustálým změnám spotřeby činného i jalového výkonu. Pokud není stanoveno jinak, musí odběratel elektrické energie dodržovat účinník odběru první harmonické napětí a proudu v mezích 0,95-1 induktivního charakteru. Pro dodržení požadovaného účinníku je potřeba řídit kompenzační výkon. Dynamika změn odběru jalového výkonu je v praxi různá. Pohybuje se od velmi pomalých změn v provozech, kde je velké množství neregulovaných motorů s konstantním zatížením, až po velmi rychlé změny jalového výkonu vyvolané provozem polovodičových měničů [6].

Kompenzační zařízení rozlišujeme na *pevná* s neregulovatelným jalovým výkonem a *řízená* s regulovatelným jalovým výkonem.

Pevná kompenzační zařízení mají pevně daný jmenovitý výkon. Používají se pro individuální kompenzaci spotřebičů a lze je použít v případech, kdy je odběr jalového výkonu konstantní.

Řízená kompenzační zařízení se používají pro kompenzaci spotřebičů s proměnným odběrem jalového výkonu.

Podle místa připojení do sítě rozlišujeme kompenzaci [3]:

- *individuální*, kdy je kompenzační zařízení připojeno přímo na svorky spotřebiče nebo v jeho těsné blízkosti. Od jalového výkonu je odlehčena celá elektrická síť od zdroje až po spotřebič. Úspory ztrát jsou nejvyšší, ale využití kompenzátoru je závislé na provozu spotřebiče. Individuální kompenzace se používá např. pro kompenzaci magnetizačního proudu asynchronních motorů a transformátorů, zářivkových a výbojkových svítidel,
- *skupinovou*, kdy je kompenzační zařízení připojeno na přípojnících rozváděče vysokého nebo nízkého napětí pro skupinu spotřebičů. V tomto případě je odlehčen úsek vedení od tohoto rozváděče ke zdroji. Vzhledem k soudobosti chodu spotřebičů připojených k rozváděči vychází potřebný kompenzační výkon menší než v případě individuální kompenzace, ale je nutná jeho regulace,
- *centrální*, kdy je kompenzační zařízení připojeno na přípojnici vstupní trafostanice odběratele. Vzhledem k soudobosti chodu spotřebičů v celé síti opět klesá potřebný kompenzační výkon. Rovněž je nutná jeho regulace a většinou je třeba řešit kompenzaci na úrovni vysokého napětí, což představuje vyšší pořizovací náklady,
- *kombinovaná* kompenzace je logickou kombinací předchozích variant. Ve skutečnosti bývá poměrně dost rozšířená, především v rozsáhlých průmyslových sítích.

5.3 Typy kompenzátorů jalového výkonu

Typ použitého kompenzačního zařízení včetně jeho technických parametrů je vždy určitým technicko-ekonomickým kompromisem. Od kompenzačního zařízení se v první řadě požaduje kompenzace jalového výkonu odebíraného spotřebiči elektrické energie.

V praxi nacházejí uplatnění všechny typy kompenzačních zařízení díky dovolenému intervalu požadované hodnoty účinníku. Vhodným rozdělením kompenzačního výkonu k jednotlivým rozvodným zařízením na konkrétních napěťových hladinách lze docílit optimálního výsledku, tedy splnění všech požadavků na kompenzaci účinníku s minimálními investičními náklady [3].

5.3.1 Prosté kondenzátory

Kondenzátory jsou základním prvkem pro kompenzaci jalového výkonu. Současným standardem výroby válcových kondenzátorů je technologie MKP, která spočívá v pokovení polypropylenové fólie směsí Zn-Al (samoregenerační vrstvou) ve vakuu. Navinutý svitek je umístěn do hermeticky uzavřeného válcového hliníkového pouzdra s viskózní (olejovou, gelovou) nebo suchou inertní (plynovou) náplní. Úlohou impregnantu je izolovat elektrody kondenzátoru od vnějších vlivů a zabránit tak zejména korozi kovových částí [8].

Během tepelného či elektrického přetížení nebo na konci doby životnosti vznikají mezi elektrodami průrazy, které zapříčiní odpaření pokovených vrstev v místě poruchy. Tlak plynu, vzniklého působením vysokých teplot, toto již plynné pokovení během několika mikrosekund zcela odstraní z místa průrazu. V místě průrazu vznikne nevodivá oblast zbavená pokovení, která je dostatečně izolována a napěťově odolná pro všechny provozní požadavky kondenzátoru. Snížení kapacity kondenzátoru po regeneraci je na úrovni cca 100 pF, tedy tisícín jmenovité hodnoty kapacity kondenzátoru. Kondenzátor tak zůstává zcela funkční.

Na konci životnosti kondenzátoru nebo při opakovaných průrazech způsobovaných dlouhodobých přepětím nebo trvalým nadměrným tepelným zatížením se kondenzátor samočinně odpojí od napájecího napětí působením přetlakové pojistky. Odpařování elektrod při průrazech je doprovázeno vývinem plynu a tedy nárůstem tlaku v nádobě kondenzátoru. V případě, že dojde k překročení dovoleného přetlaku v nádobě, dojde k deformaci víčka nádoby a mechanickému přetržení přívodu ke svítkům[8].

Kvalitu kondenzátorů výrazně ovlivňují ztráty. Celkové ztráty kondenzátoru se skládají ze ztrát v dielektriku, vnitřních pojistek, vybíjecích odporů. Ztráty kondenzátoru jsou dány tangentou ztrátového úhlu $\tan \delta$, který závisí na technologii výroby a na teplotě. Ztrátový úhel udává poměr mezi ekvivalentním sériovým odporem a kapacitní reaktancí kondenzátoru při sinusovém napětí a kmitočtu. Pro neharmonický průběh napětí je třeba uvažovat ztráty od všech harmonických. Poté pro celkové ztráty kondenzátoru platí [6]:

$$P_Z = 2\pi \cdot C \cdot \sum_{h=1}^{\infty} h \cdot U_h^2 \cdot f_n \cdot \tan \delta_h \quad [\text{W}; \text{F}, -, \text{V}, \text{Hz}, -] \quad (23)$$

Významnou vlastností kondenzátorů je frekvenční závislost kapacitní reaktance X_C , která je dána vztahem [6]:

$$X_C = \frac{1}{2\pi \cdot f \cdot C} \quad [\Omega; -, \text{Hz}, \text{F}] \quad (24)$$

Se zvyšujícím se kmitočtem reaktance kondenzátoru klesá. Připojíme-li kondenzátor do sítě, kde budou i zdroje harmonických proudů, bude pro ně kondenzátor představovat nízkou impedanci. Celková efektivní hodnota proudu protékajícího kondenzátorem vlivem harmonických

vzroste a tento proud bude přetěžovat samotný kondenzátor, ale i část sítě mezi zdrojem harmonických.

Prosté kondenzátory lze použít pro kompenzaci jalového výkonu v sítích, kde podíl instalovaného výkonu nelineárních spotřebičů nepřesahuje 15 % výkonu napájecího transformátoru [3].

5.3.2 Chráněné kompenzační sekce

Přetěžování kondenzátorů harmonickými proudy lze zabránit předřazením ochranné tlumivky. Ochranné tlumivky tvoří společně s kondenzátorem sériový rezonanční obvod. Impedance tohoto obvodu je dána vztahem [6]:

$$\bar{Z} = R + j \cdot \left(2\pi \cdot f \cdot L + \frac{1}{2\pi \cdot f \cdot C} \right) \quad [\Omega; \Omega, \text{Hz}, \text{H}, \text{F}] \quad (25)$$

Rezonanční kmitočet obvodu je záměrně volen tak, aby nemohlo dojít k rezonanci na některé charakteristické harmonické a tím k přetížení kondenzátoru. Poměr rezonančního kmitočtu f_r a jmenovitého kmitočtu sítě f_n udává řád harmonické, při které dochází k rezonanci [3]:

$$h_r = \frac{f_r}{f_n} \quad [-; \text{Hz}, \text{Hz}] \quad (26)$$

Dále definujeme činitel zatlumení [8]:

$$p = \frac{X_L}{X_C} = \frac{1}{h_r^2} \quad [-; \Omega, \Omega] \quad (27)$$

Je nutné mít na paměti, že kondenzátor bude vystaven vyššímu napětí. Překročení napětí může vést k poškození nebo zničení kondenzátoru, proto musí být vybrány s ohledem na tuto skutečnost. Napětí na kondenzátoru bude mít velikost [8]:

$$U_C = \frac{U_n}{1 - p} \quad [\text{V}; \text{V}, -] \quad (28)$$

Kompenzační kondenzátory se obvykle optimalizují na kmitočet 50 Hz a napětí na kondenzátoru $U_{Cn} = 440 \text{ V}$, čímž se respektuje zvýšení napětí vlivem reaktance předřazených tlumivek. Při použití kondenzátorů s vyšším jmenovitým napětím musíme počítat s tím, že skutečný kompenzační výkon bude menší než instalovaný. Kompenzační výkon se totiž snižuje s druhou mocninou podílu jmenovitého napětí sítě a jmenovitého napětí kondenzátoru. Výkon kondenzátoru se vypočte podle [3]:

$$Q_C = \frac{U_{Cn}^2}{X_C} \quad [\text{VAr}; \text{V}, \Omega] \quad (29)$$

Reaktance kondenzátoru s příslušnou ochrannou tlumivkou je pro $f < f_r$ vždy nižší, než reaktance samotného kondenzátoru podle [8]:

$$X_{LC} = (1 - p) \cdot X_C \quad [\Omega; -, \Omega] \quad (30)$$

Zjednodušený výpočet skutečného kompenzačního výkonu chráněného kompenzačního článku s kondenzátorem a ochranou tlumivkou při znalosti jmenovitého kompenzačního výkonu

Q_C a jmenovitého napětí U_{Cn} instalovaného kondenzátoru, jmenovitého napětí sítě U_n a činitele zatlumení p provedeme podle vztahu [8]:

$$Q_{LC} = \frac{U_n^2}{(1-p) \cdot \left(\frac{U_{Cn}^2}{Q_C}\right)} \quad [\text{VAr}; \text{V}, -, \text{V}, \text{VAr}] \quad (31)$$

Prakticky jsou voleny ochranné tlumivky s činitelem zatlumení 7 % pro rezonanční kmitočet $f_r = 189 \text{ Hz}$ a tlumivky s činitelem zatlumení 14 % pro rezonanční kmitočet $f_r = 134 \text{ Hz}$ [3].

Použití chráněných kompenzačních sekcí je vhodné v průmyslových sítích, které napájejí spotřebiče generující harmonické proudy. Velikost harmonických proudů je na takové úrovni, že není nutno tyto proudy s ohledem na ostatní zařízení eliminovat, ale z důvodu spolehlivého provozu před nimi chránit kompenzační kondenzátory.

5.3.3 Pasivní kompenzační filtry

Pasivní kompenzační filtry se používají v případě nutnosti snížit úroveň harmonických proudů v síti. Opět se jedná o sériový rezonanční obvod RLC s impedancí podle rovnice (25). Kompenzační filtr se chová pro $f < f_r$ jako kondenzátor a kompenzuje jalový výkon. Pro kmitočty $f > f_r$ se chová filtr jako tlumivka a pro harmonickou, na kterou je naladěný, představuje velmi nízkou impedanci omezenou činným odporem tlumivky. Na rozdíl od chráněných kompenzačních sekcí, je rezonanční kmitočet kompenzačního filtru naladěný na kmitočet harmonické, který je nutné eliminovat. V praxi kompenzační filtry skládají z několika paralelních filtrů naladěných na jednotlivé harmonické. Obvykle se jedná o tzv. *charakteristické harmonické*, které jsou typické pro jednotlivé spotřebiče. Harmonický proud, který zatěžuje filtr při rezonanci, je přímo úměrný velikosti činitele jakosti tlumivky. Jakost tlumivky je definována podle [3]:

$$Q = \frac{X_L}{R} \quad [-; \Omega, \Omega] \quad (32)$$

Při návrhu kompenzačních filtrů je nutné počítat s přídavným proudovým namáháním od filtrovaných harmonických proudů. Kompenzační filtry jsou připojovány do sítí, ve kterých je nutné účelně eliminovat harmonické proudy generované spotřebiči, jejichž výkon je v porovnání s ostatními spotřebiči dominantní. V praxi je takové zařízení řešeno jako několik paralelních filtrů naladěných na jednotlivé charakteristické harmonické [3].

5.3.4 Aktivní filtry

Aktivní filtry jsou paralelně nebo sériově zapojené generátory řízené vhodným regulačním systémem tak, aby i v dynamických stavech byla zajištěna požadovaná kompenzace nežádoucích harmonických složek. Způsobem zapojení aktivního filtru do sítě lze filtrovat proud, napětí nebo obojí. Podle zapojení aktivních filtrů do sítě je dělíme na paralelní, sériové a kombinované [2].

5.3.4.1 Paralelní aktivní filtry

Paralelní aktivní filtr tvoří řízený generátor proudu zapojený paralelně k zátěži. Je schopen odstranit nežádoucí harmonické složky proudu tím, že generuje shodné složky opačného směru a zavádí je do sítě. Výsledný proud je zbaven zvolených harmonických. Tímto způsobem se filtruje proud odebíraný ze sítě, a tím se také upravují deformace napětí způsobené zátěží [3].

Paralelní aktivní filtry se používají především pro dynamickou filtraci harmonických, případně dynamickou kompenzaci jalového výkonu. Výkon, který by se měl u aktivního filtru udávat jako zdánlivý, je možno uživatelem rozdělit na část, která se spotřebuje na kompenzaci deformačního výkonu a na část pro kompenzaci jalového výkonu. Aktivní filtr je výhodné použít především na kompenzaci deformačního výkonu. Ve většině případu není nutno eliminovat harmonické v plném rozsahu, takže aktivní filtr může být dimenzován na menší výkon. Optimální dimenzování aktivního filtru výrazným způsobem ovlivní celkové pořizovací náklady [3].

5.3.4.2 Sériové aktivní filtry

Aktivní sériový filtr je zapojen mezi svorky sítě a svorky spotřebiče a je tvořen generátorem napětí. Tento typ filtru umožňuje upravit přiváděné napětí ke spotřebiči na požadovaný tvar. To znamená, že filtr má schopnost udržovat amplitudu napětí, kompenzovat poklesy i špičky napětí, odstraňovat harmonické, zajistit symetrické rozložení napětí [3].

V současné době se sériové aktivní filtry pod názvem *linkové kondicionéry* používají jako výkonový stabilizátor napětí pro veřejný rozvod elektrické energie. Linkový kondicionér je zařízení, které může zajistit základní parametry kvality elektrické energie a to eliminací některých rušivých vlivů v napájecí síti. Kondicionér zpracovává jen část výkonu nezbytně nutného k doplnění deficitu vzniklého úbytky na vedení nebo ke zklidnění odběru [5].

5.4 Způsoby řízení kompenzačního výkonu

Je nutné si uvědomit, že ne všechny typy kompenzačních zařízení zajistí v každém okamžiku účinný odběr v mezích požadovaných dodavatelem elektrické energie. Především pevně připojené kondenzátory pro individuální kompenzaci slouží pouze pro kompenzaci jalového výkonu naprázdno. Kromě případů individuální kompenzace je kompenzační výkon vždy regulován [3].

5.4.1 Stupňovitě spínaná kompenzace

Nejčastějším typem regulace na hladině nízkého napětí je regulace stupňovitá, při které se kompenzační výkon mění připínáním jednotlivých stupňů. U tohoto způsobu řízení kompenzačního výkonu je důležitý počet a velikost stupňů. Počet stupňů závisí na reálné velikosti jednoho stupně, celkovém kompenzačním výkonu a na žádané hodnotě vykompenzování. Obvykle je požadována hodnota $\cos \varphi_1 \geq 0,95$, čemuž odpovídá $\tan \varphi_1 \leq 0,33$. Kompenzační stupně jsou tvořeny prostými kondenzátory nebo chráněnými sekcemi [3].

Jednotlivé kompenzační stupně lze připínat stykači nebo polovodičovými spínači. Kontaktní spínání pomocí elektromechanických stykačů je nejrozšířenějším způsobem připojování kondenzátorových baterií v rozvaděcích se stupňovitě regulovaným kompenzačním výkonem. Při spínání prostých kondenzátorů se používají stykače s tzv. *odporovým spínáním* [8].

Bezkontaktní polovodivé spínače jsou tvořeny dvojicí antiparalelně zapojených tyristorů. Velkou výhodou těchto spínačů je tzv. *synchronní spínání*, tzn. připnutí kompenzačního stupně v nule napětí, čímž je omezen přechodný spínací děj. V tomto případě dosahuje hodnota proudu maximálně 1,6násobku ustálené hodnoty. Také vliv na napájecí síť je v místě připojení kompenzačního zařízení minimální. Tyristorové spínače jsou vhodné zejména do aplikací, kde jsou požadovány velmi rychlé změny jalového výkonu, které jsou již nad technické možnosti klasických stykačů.

Stupňovitě spínaná kompenzační zařízení se stávají stejně jako na hladinách nízkého napětí nejrozšířenějšími kompenzačními prostředky i pro hladiny 6 a 22 kV. Stupňovitě spínaná kompenzace v sítích vysokého napětí je alternativou k technicky dokonalejším, ale podstatně nákladnějším plynule regulovaným kompenzacím. Hlavními výhodami spínaných kompenzací vysokého napětí jsou [4]:

- nízká cena – asi 15 až 20 % ceny plynule regulovaného kompenzačního zařízení,
- nízké ztráty – u kompenzací bez filtračních nebo hradicích tlumivek méně než 0,1 % z instalovaného výkonu, u kompenzací s tlumivkami přibližně 0,5 % z instalovaného výkonu,
- malé nároky na údržbu.

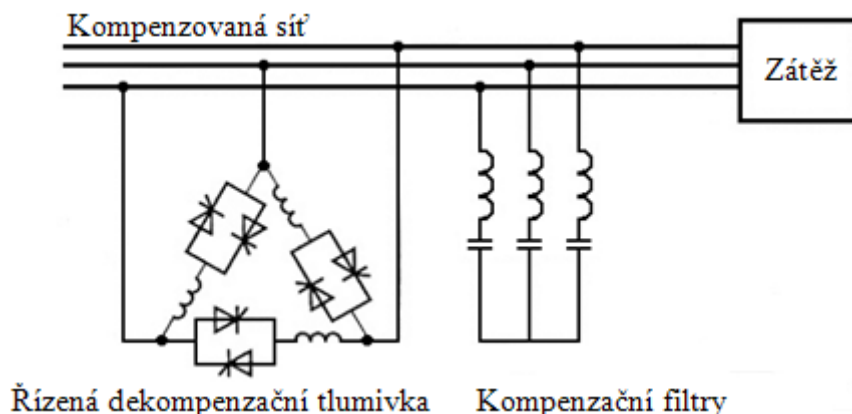
Při zařazování spínaných kompenzací do sítí vysokého napětí je ale nutné vzít v úvahu také jejich nevýhody, kterými jsou např. [4]:

- plynulá regulace výkonu není možná, proto může v síti krátkodobě docházet k překompenzování nebo k nedokompenzování výkonu a tomu odpovídajícím změnám napětí v síti; překompenzování také znamená nevyžádanou dodávku jalového výkonu do napájecí sítě a s tím spojené poplatky za tuto dodávku,
- stupňovitě spínané kompenzace většinou nejsou vhodné pro síť s velkými a rychlými změnami zatížení,
- v některých případech se mohou vyskytovat spínací přepětí, která ohrožují jednotlivé prvky kompenzačních zařízení, ale i paralelně připojené spotřebiče,
- jsou-li kompenzační stupně naladěny jako filtry, mění se filtrační účinek v závislosti na počtu sepnutých stupňů.

5.4.2 Plynule regulovaná kompenzace

Plynule řízená kompenzace se používá u nelineárních spotřebičů velkých výkonů, jejichž vliv na napájecí soustavu je způsobován především vysokou dynamikou změn spotřebovávaného činného a jalového a generováním harmonických. Pro tyto spotřebiče jsou nutná stejně rychlá kompenzační zařízení [3].

Z těchto zařízení jsou ekonomicky nejvýhodnější filtračně-kompenzační zařízení, jejichž výkon je regulován tzv. *dekompenzačním členem* viz Obr. 5.3. Takové kompenzační zařízení je tvořeno sadou kompenzačních filtrů konstantního výkonu a dekompenzační tlumivkou, jejíž výkon je regulován fázově řízeným spínačem napětí.



Obr. 5.3: Schéma dynamické kompenzace jalového výkonu [3]

Je-li potřeba kompenzačního výkonu maximální, zůstává dekompenzační tlumivka bez napětí a veškerý kompenzační výkon filtrů je dodáván do sítě. V případě, že se potřeba kompenzačního výkonu sníží, je kompenzační výkon filtrů dekompenzován řízenou tlumivkou. Tyto změny velikosti kompenzačního výkonu mohou být velmi rychlé. Takovéto kompenzační zařízení zajišťuje trvale neutrální hodnotu účinníku, eliminuje nežádoucí harmonické, nesymetrii sítě a flikr [3].

Dimenzování filtrů a jejich poměrné rozdělení závisí především na charakteru kompenzované nelineární zátěže. Správné navržení kompenzačního filtru plynule řízeného kompenzačního zařízení je velice důležité a má rozhodující vliv na funkčnost, spolehlivost a životnost celého kompenzačního zařízení.[3]

6 CHARAKTERISTIKA SPOTŘEBIČŮ ELEKTRICKÉ ENERGIE

Pro správný návrh kompenzace jalového výkonu potřebujeme znát charakter spotřebičů, které se vyskytují v síti [3].

6.1 Transformátory

Silové transformátory sloužící k napájení sítí odběratelů jsou elektrické stroje netočivé, jejichž impedanci lze opět popsat jejich náhradním schématem obsahujícím indukčnosti a odpory.

Významnou roli z hlediska bilance jalového výkonu hraje impedance, kterou protéká proud naprázdno. Vzhledem k induktivnímu charakteru této impedance je účinník odběru nezatíženého transformátoru velmi nízký, neboť proud naprázdno má čistě jalový charakter.

Spotřebu jalového výkonu transformátoru je možné kompenzovat v případě měření elektrické energie na primární straně transformátoru v rámci kompenzace ostatních spotřebičů z tohoto transformátoru napájených. V případě měření elektrické energie na straně nižšího napětí se připočítává k naměřenému odběru kromě transformačních ztrát činné energie také spotřeba energie jalové podle druhu a velikosti transformátoru. Tato jalová spotřeba se nepřipočítává, je-li ještě před hlavním jističem nebo vypínačem, připojen kompenzační kondenzátor o výkonu odpovídajícímu příkonu transformátoru naprázdno.

Kompenzační kondenzátor je nutné správným způsobem jistit, což je vzhledem k vysokému zkratovému výkonu v místě připojení možné pouze výkonovými pojistkami.

6.2 Asynchronní elektromotory

Asynchronní elektromotory jsou nejrozšířenější spotřebiče elektrické energie. V průmyslových sítích zaujímají přibližně 70 % celkového instalovaného výkonu. Dominantní zastoupení mají v těchto 70 % asynchronní elektromotory s kotvou nakrátko. Elektromotor je indukčním točivým strojem. Vektor proudu protékajícího statorem se skládá ze složky činné a složky jalové, jejíž velikost závisí zejména na jalových složkách impedance statoru a rotoru a jalové složce tzv. hlavní impedance charakterizující magnetický obvod elektromotoru.

Účinník odběru elektrické energie asynchronního motoru se při běžném provozu pohybuje mezi dvěma hodnotami. Při chodu naprázdno se projevuje pouze statorová a hlavní impedance. Při provozním zatížení se projevují impedance statorová a rotorová.

Při jmenovitém zatížení asynchronního motoru se jeho účinník odběru pohybuje v rozmezí 0,6 až 0,9 podle velikosti výkonu motoru a počtu pólů. Účinník při jmenovitém zatížení roste s klesajícím počtem pólů a stejně tak roste se zvyšujícím se jmenovitým výkonem elektromotoru. Účinník elektromotoru při chodu s nižším zatížením než jmenovitým, je vždy horší, než v případě chodu se jmenovitým zatížením. Individuální kompenzace elektromotoru má své ekonomické, ale i technické opodstatnění u výkonu elektromotorů řádově od několika desítek kilowatů. Obecně platí, že kompenzační výkon kondenzátoru by neměl překročit 30 % hodnoty činného výkonu elektromotoru.

V případě kompenzace elektromotorů na vysoké napětí, je kompenzační kondenzátor připínám ke svorkám stroje stykačem. Kondenzátor se připíná s určitým časovým zpožděním po

zapnutí elektromotoru a odpíná současně s odepnutím elektromotoru od napětí. Tím se zabrání nebezpečným rezonančním jevům při rozběhu a při vypnutí elektromotoru.

6.3 Stejnosemné regulované pohony

6.3.1 Pohon se stejnosmým motorem s cizím buzením

Tento stejnosmý pohon je velmi snadno řiditelný při obou smyslech otáčení ve všech pracovních režimech, při nichž je schopen vyvinout vždy maximální moment. Stejnosemý elektromotor je napájen z řízeného polovodičového usměřovače, obvykle v můstkovém zapojení. Řízený usměřovač odebírá v každém okamžiku zdánlivý výkon daný složkou činnou odpovídající mechanickému výkonu stroje včetně ztrát a složkou jalovou danou fázovým posuvem proudu za napětím odpovídajícímu principu fázového řízení usměřovače.

Pro účinník odběru na základní harmonické platí, že $\cos \varphi_1 = \cos \alpha$. Při malém úhlu řízení v době, kdy je na výstupu řízeného usměřovače maximální stejnosmý napětí a napájený elektromotor má tedy maximální otáčky, je účinník odběru tohoto řízeného usměřovače z napájecí sítě blízký jedné. Naproti tomu při regulaci otáček elektromotoru k nízkým hodnotám vzrůstá úhel řízení a tím klesá účinník odběru i pod hodnoty 0,1. Lze tedy říci, že během regulace otáček se mění účinník odběru reálného stejnosmého regulovaného pohonu od minimálních hodnot až po hodnoty kolem 0,9.

Při skokových změnách řídicího úhlu vyvolaných potřebou velmi rychlých změn usměrněného napětí dochází také k velmi rychlým změnám spotřebovávaného jalového výkonu. Ty je zapotřebí vykompenzovat s minimálními časovými prodlevami. To v praxi znamená instalaci minimálně stejně rychlého kompenzačního zařízení s dostatečně vysokým kompenzačním výkonem. Provoz řízených usměřovačů je kromě dynamických změn v odběru jalového výkonu doprovázen také generováním harmonických složek proudu do napájecí sítě.

6.3.2 Pohon se sériovým buzením

Tento typ stejnosmých regulovaných pohonů našel své uplatnění díky výhodným mechanickým charakteristikám zejména v elektrické trakci. Řízení otáček tohoto motoru se provádí pulzním měničem pracujícím jako měnič stejnosmého napětí.

Stejnosemná síť, na kterou jsou pulzní měniče připojeny, bývá zpravidla napájena měniči osazenými neřízenými nebo řízenými usměřovači, které mají řešenou kompenzaci jalového výkonu podle typu a velikosti usměřovače.

6.4 Střídavé regulované pohony

Střídavé regulované pohony v posledních letech prakticky z nových aplikací vytlačily pohony stejnosmý. Stalo se tak díky rozvoji technologie výkonových transistorů a mikroprocesorů. Výhody střídavých pohonů jsou hlavně v možnosti použít v pohonu jednoduché asynchronní motory místo složitějších a dražších motorů stejnosmých. Asynchronnímu motoru je předřazen měnič kmitočtu a regulace otáček je prováděna změnou kmitočtu napájecího napětí motoru.

Měniče kmitočtu se podle způsobu akumulace energie ve stejnosmém meziobvodu dělí na proudové a napětové. Oba typy měničů však z pohledu vlivu na napájecí síť představují nelineární zátěž.

6.4.1 Pohony s proudovými střídači

Proudový střídač používaný pro napájení asynchronního motoru se v nejjednodušším případě, vzhledem k napájecí síti chová jako řízený šestipulzní usměrňovač. Odebíraný proud není sinusový a navíc jeho 1. harmonická vykazuje fázový posun vůči napájecímu napětí.

Odebíraný jalový výkon se mění v závislosti na změně otáček. Poměr jalového a činného výkonu, který reprezentuje $\cos \varphi_1$ je po určitý rozsah otáček téměř konstantní. V druhé polovině rozsahu regulovaných otáček se začíná tento poměr tedy i $\cos \varphi_1$ více měnit. Z tohoto vyplývají nároky na kompenzaci jalového výkonu. Pro dostatečné vykompenzování postačí kompenzátor se stupňovou regulací. Při návrhu kompenzace je nutno brát ohled na obsah harmonických v proudu, který odebírá proudový střídač ze sítě.

6.4.2 Pohony s napětovými střídači

Na rozdíl od proudového střídače se měnič kmitočtu s napětovým meziobvodem chová vůči síti jako neřízený šestipulzní usměrňovač.

První harmonická proudu neřízeného šestipulzního usměrňovače je vždy téměř ve fázi s 1. harmonickou napájecího napětí. Pak $\cos \varphi_1 \geq 0,95$ v celém rozsahu regulace otáček a výkonů. U proudu se mění pouze jeho efektivní hodnota a obsah harmonických. Měnič s napětovým meziobvodem je typickým spotřebičem, který pracuje s dobrým $\cos \varphi_1$, ale se špatným λ . Kompenzovat vlastní statický měnič kmitočtu není tedy nutné. Pokud by bylo nutné kompenzovat deformační výkon způsobený harmonickými, nelze použít pasivní kompenzační filtry z důvodu překompenzování na základní harmonické. Jediný způsob filtrace harmonických u tohoto typu měniče je použití paralelního aktivního filtru.

6.5 Elektrotepelné spotřebiče

6.5.1 Elektrotepelné spotřebiče s fázovou regulací výkonu

Odporové topné materiály s vysokou tepelnou zatížitelností jsou v současné době základem pro výrobu topných článků. Jejich velké uplatnění je například u tavicích sklářských pecí, ale i pecí ve strojírenské výrobě. Tepelný výkon těchto článků není možné díky jejich tepelně-mechanickým vlastnostem regulovat pulzně. Tedy jeden časový interval připnout na článek plné napětí a v dalším intervalu toto plné napětí odepnout. Změny přiloženého napětí na tento typ topných článků musí být plynulé, což lze zajistit buď regulačním transformátorem, nebo fázově řízeným spínačem napětí. Technicky i ekonomicky jednodušší je použití fázově řízeného tyristorového spínače, který je tvořen dvojicí antiparalelně zapojených tyristorů v každé fázi.

Podle velikosti úhlu řízení se zvyšuje nebo snižuje efektivní hodnota napětí na topném článku a tím i jeho příkon.

Fázově řízený spínač napětí spotřebovává při své činnosti tzv. řídicí jalový výkon měnící se s úhlem řízení s parametry impedance z něj napájené. Je nutné si uvědomit, že v tomto případě i řízení výkonu čistě odporové zátěže je doprovázeno spotřebou jalového výkonu, kterou je nutno vhodným způsobem kompenzovat. Toto řízení je samozřejmě doprovázeno i generováním harmonických.

6.5.2 Elektrotepelné spotřebiče s induktorem

V metalurgických provozech jsou využívány k tavení kovů elektrické indukční pece pracující se síťovým nebo vyšším kmitočtem (500 až 700 Hz). V obou případech tvoří induktor, který obklopuje kelímek s taveným kovem, společně s připojenou kondenzátorovou baterií rezonanční LC obvod. Tento obvod je napájený přímo z pecního odbočkového transformátoru nebo v případě středofrekvenčních pecí ze střídače. Při postupné změně skupenství natavovaného kovu dochází ke změně velikosti indukčnosti induktoru a tím rozladování rezonančního LC obvodu, změně odebíraného jalového výkonu a u pecí pracujících se síťovým kmitočtem také ke změně symetrie trojfázového systému.

V elektrickém obvodu obou typů indukčních tavicích pecí figurují dvě stupňovitě spínané kondenzátorové baterie. Jedna kompenzující změnu indukčnosti při tavení, jedna zajišťující symetrii odběru.

Jsou-li v případě pecí se síťovým kmitočtem obě kondenzátorové baterie a jejich spínací prvky v technicky dobrém stavu, není pro kompenzaci těchto pecí zapotřebí žádného dalšího kompenzačního zařízení. Střídač středofrekvenčních pecí je obvykle napájen řízeným usměrňovačem, jehož vlastnosti z hlediska potřeby jalového výkonu jsou téměř identické jako řízených usměrňovačů napájející stejnosměrné regulované pohony. Změny spotřebovávaného jalového výkonu však v tomto případě nejsou dynamické a obvykle pro vykompenzování plně vyhoví stupňovitě spínaná chráněná kompenzace.

6.5.3 Elektrotepelné spotřebiče s elektrickým obloukem

Typickým představitelem těchto spotřebičů jsou elektrické obloukové pece a z nich zejména pece střídavé. Díky svým vysokým jednotkovým výkonům bývají zpravidla dominantním spotřebičem v průmyslové síti a podstatně ovlivňují jeho výkonovou bilanci.

Elektrický oblouk je těchto pecích zdrojem tepla a hoří mezi elektrodami a vsázkou taveného kovu. Jeho impedance, která má převážně ohmický charakter je díky soustavným změnám délky oblouku a změnám ionizace prostředí v peci velmi nestabilní. Mění se od nekonečně vysoké impedance při přerušení oblouku až po nulovou impedanci například při zkratu v peci vzniklého sesuvem vsázky ve fázi natavování.

Prudké změny proudu, který má činnou i jalovou složku způsobují na impedancích napájecí sítě dynamicky se měnící úbytky napětí. Kmitočet těchto změn je v rozmezí 2 až 15 Hz a právě kolísání napětí s tímto kmitočtem vyvolává pro lidský organismus velmi nepříjemný flickr efekt. Eliminovat tyto změny napájecího napětí a ztráty způsobené přenosem jalového výkonu je možné pouze vhodně navrženou a správně provozovanou kompenzací.

Podobným způsobem se chovají také další spotřebiče využívající elektrický oblouk. Jsou to například transformátorové svářečky, různé bodové svářečky případně svářecí automaty. Pro kompenzaci jalového výkonu a eliminaci dalších typů energetického rušení, které je provozem těchto zařízení způsobováno je nutné použít speciální kompenzační zařízení.

6.6 Zdroje světla s indukčními a elektronickými předřadníky

Účinník odběru svítidla s indukčním předřadníkem je 0,37 až 0,5 a z tohoto důvodu jsou svítidla vybavována přímo od výrobce kompenzačním kondenzátorem zajišťujícím účinník nad úroveň 0,95. Kromě speciálních případů týkajících se rozsáhlých osvětlovacích soustav s těmito zdroji světla, je kompenzace svítidel pomocí vestavěných kompenzačních kondenzátorů

dostatečná. V případě velkého počtu svítidel je zapotřebí, zejména s ohledem na vyšší úrovně třetí harmonické v napájecím napětí, použít svítidla bez kompenzačních kondenzátorů a kompenzaci účinníku provést jiným způsobem.

Odběr zářivky s elektronickým předřadníkem se vyznačuje velmi dobrým účínkem na základní harmonické, obvykle s hodnotami nad 0,97, ale také vysokým zkreslením křivky proudu, které dosahuje až 180 % základní harmonické. V důsledku toho je účinník odběru pod hodnotou 0,5.

Tento impulzní charakter odběru lze eliminovat různými způsoby, přičemž nejrozšířenějším je použití elektronických předřadníků s aktivním filtrem. Doplnění aktivním filtrem zvýší cenu elektronického předřadníku přibližně o 30 %, ale účinník u svítidel vybavených tímto předřadníkem spolehlivě převyšuje hodnotu 0,95. Lze tedy říci, že s ohledem na kompenzaci jalového výkonu není nutno věnovat svídlům obsahujícím zářivky s elektronickým předřadníkem zvláštní pozornost. Při osazení velkého počtu těchto zdrojů světla do sítí, v nichž jsou instalovány kompenzační kondenzátory pro kompenzaci jalového odběru ostatních spotřebičů, je však nutno brát v úvahu možnost vzniku rezonancí a přetěžování původních kompenzačních zařízení, eventuálně i dalších částí průmyslových sítí.

7 NÁVRH KOMPENZACE JALOVÉHO VÝKONU V LDS

Navrhovaná lokální distribuční soustava vznikla privatizací vstupní transformační stanice rozsáhlého strojírenského podniku, který se skládal ze tří provozů a jedné vysunuté transformační stanice pro pomocné provozy. Přehledové schéma podniku je uvedeno v Příloze B. Společný napájecí bod (PCC) je na primární straně vstupní transformační stanice. Z ní je výkon vyveden do kobkové rozvodny RH 22 kV, která je podélným spínačem rozdělena na dvě sekce. Z každé sekce je vyveden kabelový vývod do podružných rozvodů jednotlivých provozů. Vysunutá transformační stanice je napájena pouze jedním vývodem. V jednotlivých provozech je instalováno množství spotřebičů různého charakteru např. asynchronní elektromotory o výkonech 1,1 kW až 250 kW, nízkofrekvenční tavicí pece a odporové žíhací pece. Veškerá kompenzace jalového výkonu je umístěna v hlavních rozvodnách nízkého napětí 0,4 kV jednotlivých provozů, která byla realizována jako stupňovitě spínaná nehrazená s kompenzačním výkonem 650 kVAr.

7.1 Dispozice vzniklé LDS

Vstupní venkovní transformační stanice RH 110 kV a kobková rozvodna RH 22 kV je majetkem provozovatele vzniklé LDS. Přehledové schéma vzniklé LDS je zobrazeno v Příloze B.

V dispozici původního provozu I. je nyní zakázková kovárna. Došlo ke kompletní rekonstrukci kobkové rozvodny RH.I 22 kV na skříňovou s podélným rozdělením přípojníc a výměně kabelových přívodů z hlavní rozvodny RH 22 kV. Byly instalovány nové pecní transformátory TR 22.1 a TR 22.2 s převodem 22/0,5 kV o výkonu 1250 kVA pro napájení středofrekvenčních pecí SFP1 a SFP2. Dále byly instalovány transformátory TR 22.3 a TR 22.4 s převodem 22/0,4 kV o výkonu 2000 kVA pro napájení ostatních spotřebičů. Celkový instalovaný výkon je cca 5 MW. Hlavními spotřebiči v provozu kovárny jsou dvě středofrekvenční pece o jednotkovém výkonu 1 MW, dvě kovací stolice řízené frekvenčními měniči o jednotkovém výkonu 220 kW a čtyři odporové ohřívací pece s fázovou regulací o jednotkovém výkonu 500 kW.

V dispozici původního provozu II. je nyní lisovna transformátorových plechů. Byla opravena původní kobková rozvodna RH.II 22 kV. Ponechány původní kabelové přívody z hlavní rozvodny RH 22 kV, které i nadále vyhovují svou zatížitelností i zkratovou odolností. Byly instalovány nové transformátory TR 22.5 a TR 22.6 s převodem 22/0,4 kV o výkonu 1000 kVA pro napájení spotřebičů v lisovně. Celkový instalovaný výkon je cca 2 MW. Hlavními spotřebiči v provozu lisovny jsou dvě navíječky a odvíječky plechů s řízením otáček o jednotkovém výkonu 150 kW, deset lisů s jednotkovým výkonem 60 kW a další pomocné provozy.

V dispozici původního provozu III. je nyní lokální zdroj – fotovoltaická elektrárna s výkonem 1,6 MWp. Instalován nový skříňový rozváděč s podélným rozdělením přípojníc. Pro vyvedení výkonu byly instalovány čtyři centralizované střídače a transformátory TR 22.7 a TR 22.8 s převodem 22/0,4 kV o výkonu 800 kVA. Ponechány původní kabelové vývody z rozvodny RH 22 kV. Napájení vlastní spotřeby elektrárny zajištěno kabelem 0,4 kV z rozváděče vlastní spotřeby RH 22 kV a kabelem 0,4 kV pro nouzové napájení z rozváděče RH.IV 0,4 kV ve velkoskladech.

V dispozici původních pomocných provozů napájených z vysunuté transformační stanice jsou nyní vybudovány velkosklady. Bylo nutné vyměnit napájecí kabel z hlavní rozvodny

RH 22 kV a napájecí transformátor za TR 22.9 s převodem 22/0,4 kV o výkonu 1000 kVA. Do rozváděče nízkého napětí RH.IV 0,4 kV přiveden kabel 0,4 kV pro nouzové napájení z rozváděče RH.II 0,4 kV v lisovně. Celkový instalovaný výkon cca 700 kW, z toho osvětlení 150 kW, výpočetní technika 350 kW a klimatizační zařízení 200 kW.

7.2 Stanovení potřebného kompenzačního výkonu

Při návrhu kompenzačního výkonu potřebného pro splnění podmínek daných distributorem elektrické energie budeme uvažovat dvě varianty kompenzace jalového výkonu.

První variantou je kompenzace jalového výkonu na úrovni nízkého napětí u každého uživatele LDS zvlášť. Druhou variantou je centrální kompenzace na úrovni vysokého napětí v hlavní rozvodně RH 22 kV provozovatelem LDS, který následně tuto službu zpoplatní uživatelům LDS. Při tomto způsobu řešení kompenzace jalového výkonu platí uživatel LDS provozovateli LDS za odebíraný jalový výkon podobně jako distributorovi elektrické energie v případě nedodržení požadovaného účinníku odběru. Procentuální přírážky k platbě činného výkonu při nedodržení předepsaného účinníku jsou uvedeny v Tab. 1. Při překompenzování odběru je nevyžádaná dodávka jalové energie zpoplatněna částkou 400 Kč za MVA_{rh} [8].

Tab. 1: Cenová přírážka k činnému výkonu za nedodržení účinníku odběru [8]

$tg \varphi_1$ [-] (kW/kVar)	$\cos \varphi_1$ [-]	Přírážka [%]	$tg \varphi_1$ [-] (kW/kVar)	$\cos \varphi_1$ [-]	Přírážka [%]
0,311-0,346	0,95	-	0,978-1,007	0,71	35,58
0,347-0,379	0,94	1,12	1,008-1,034	0,70	37,59
0,380-0,410	0,93	2,26	1,035-1,063	0,69	39,66
0,411-0,440	0,92	3,43	1,064-1,092	0,68	41,8
0,441-0,470	0,91	4,63	1,093-1,123	0,67	53,99
0,471-0,498	0,90	5,85	1,124-1,153	0,66	46,25
0,499-0,526	0,89	7,1	1,154-1,185	0,65	48,58
0,527-0,553	0,88	8,37	1,186-1,216	0,64	50,99
0,554-0,580	0,87	9,68	1,217-1,249	0,63	53,47
0,581-0,606	0,86	11,02	1,250-1,281	0,62	56,03
0,607-0,632	0,85	12,38	1,282-1,316	0,61	58,67
0,633-0,659	0,84	13,79	1,317-1,350	0,60	61,4
0,660-0,685	0,83	15,22	1,351-1,386	0,59	64,23
0,686-0,710	0,82	16,69	1,387-1,423	0,58	67,15
0,711-0,736	0,81	18,19	1,424-1,460	0,57	70,18
0,737-0,763	0,80	19,74	1,461-1,494	0,56	73,31
0,764-0,789	0,79	21,32	1,495-1,532	0,55	76,56
0,790-0,815	0,78	22,94	1,533-1,579	0,54	79,982
0,816-0,841	0,77	24,61	1,580-1,620	0,53	83,42
0,842-0,868	0,76	26,32	1,621-1,663	0,52	87,05
0,869-0,895	0,75	28,07	1,664-1,709	0,51	90,82
0,896-0,922	0,74	29,87	1,710-1,755	0,50	94,7
0,923-0,949	0,73	31,72	Vyšší než 1,755	Nižší než 0,5	100
0,950-0,977	0,72	33,63			

7.2.1 Varianta kompenzace jednotlivých uživatelů LDS

Pro správné navržení kompenzace jednotlivých odběrů je nutné znát především charakter provozovaných spotřebičů a jejich soudobost. Pokud bychom počítali s celkovým instalovaným výkonem, mohlo by dojít k předimenzování kompenzačního zařízení. To by mělo za následek nejen větší pořizovací náklady, ale i nevyžádaný přetok jalového výkonu do sítě.

7.2.1.1 Kompenzace provozu kovárny

Při návrhu kompenzačního výkonu v provozu kovárny musíme vzít v úvahu dominantní postavení středofrekvenčních pecí SFP1 a SFP2. Ty vzhledem ke svému výkonu a vysoké spotřebě jalového výkonu při regulaci činného výkonu vyžadují individuální kompenzační zařízení RC1 a RC2. Pro kompenzaci zbývajících spotřebičů napájených z rozvodny RH.I 0,4 kV použijeme kompenzační zařízení RC3 a RC4, jejichž kompenzační výkon určíme podle potřeb spotřebičů uvedených v Tab. 3. Při návrhu uvažuje střídavý chod pecí z důvodů manipulací s materiálem, takže pro výpočet kompenzačního výkonu uvažujeme jednu pec. V úvahu není potřeba brát kovací stolice řízené frekvenčními měniči s napěťovým meziobvodem, které pracují s $\cos \varphi_1$ lepším než 0,95.

Středofrekvenční pece SFP1 a SFP2 pracují se čtyřstupňovou regulací činného výkonu. Odpovídající odebíraný činný výkon P , jalový výkon Q , účinník odběru $\cos \varphi_1$ a potřebný kompenzační výkon Q_k je uveden v Tab. 2.

Tab. 2: Potřeba kompenzačního výkonu pro středofrekvenční pece

Stupeň regulace	P [kW]	Q [kVar]	$\cos \varphi_1$ [–]	Q_k [kVar]
1	460	735	0,53	584
2	550	590	0,68	410
3	1000	450	0,91	122
4	1200	300	0,97	0

Kompenzační výkon jednotlivých stupňů vypočteme podle vztahu [8]:

$$Q_k = P \cdot (tg(\arccos \varphi_1) - tg(\arccos \varphi_{1k})) \quad [\text{VAr}; \text{W}, -, -] \quad (33)$$

Dosazením hodnot pro první regulační stupeň dostaneme potřebný výkon kompenzačního zařízení:

$$Q_k = 460 \cdot (1,5978 - 0,3286) = 584 \text{ kVar}$$

Vypočtený výkon zaokrouhlíme na 600 kVar. Zvolíme stupňovitě spínané hrazené kompenzační zařízení na sekundární straně pecního transformátoru. Rozváděče RC1 a RC2 jsou složeny z deseti sekcí po 60 kVar. Každá sekce je složena ze dvou kondenzátorů se jmenovitým výkonem $Q_{Cn} = 34 \text{ kVar}$. Kondenzátory jsou zahrazeny ochrannými tlumivkami s činitelem zatlumení $p = 7 \%$. Jednotlivé sekce jsou spínány stykači a jištěny pojistkovými odpínači. S ohledem na požadovaný kompenzační výkon při regulaci činného výkonu pece vyhovuje rozdělení sekcí do šesti stupňů v poměru 1:1:2:2:2:2. První a druhý stupeň má tedy 60 kVar, třetí až šestý stupeň má 120 kVar.

Ohřívací pece s fázovou regulací výkonu pracují s $\cos \varphi_1$ v rozmezí 0,4 až 0,85 v závislosti na velikosti regulovaného výkonu. Kompenzační výkon vypočteme stejným způsobem jako v předchozím případě. Odebíraný činný výkon P , jalový výkon Q , účinník odběru $\cos \varphi_1$ a potřebný kompenzační výkon Q_k je uveden v Tab. 3.

Tab. 3: Potřeba kompenzačního výkonu pro ohřívací pece a kovací stolice

Ohřívací pece	P [kW]	$\cos \varphi_1$ [–]	Q [kVAr]	Q_k [kVAr]
	250	0,4	573	491
	500	0,85	310	146
Kovací stolice	220	0,95-0,98	65	0

Zvolíme opět stupňovitě spínané hrazené kompenzační zařízení o celkovém výkonu 490 kVAr. Rozváděče RC3 a RC4 jsou složeny z deseti sekcí po 49 kVAr. Každá sekce je složena ze dvou kondenzátorů se jmenovitým výkonem $Q_{cn} = 27,5$ kVAr. Kondenzátory jsou zahrazeny ochrannými tlumivkami s činitelem zatlumení $p = 7\%$. Jednotlivé sekce jsou spínány stykači a jištěny pojistkovými odpínači. Opět vyhovuje rozdělení sekcí do šesti stupňů v poměru 1:1:2:2:2:2. První a druhý stupeň má tedy 49 kVAr, třetí až šestý stupeň má 98 kVAr.

Schémata kompenzačních rozváděčů jsou nakreslena v Příloze B.

7.2.1.2 Kompenzace provozu lisovny

Při návrhu kompenzačního výkonu v provozu lisovny uvažujeme současný chod všech instalovaných lisů, které při zatížení pracují s účínkem $\cos \varphi_1 = 0,88$. Pohony navíječek plechů řízené frekvenčními měniči s napětovým meziobvodem nemusíme uvažovat. Vypočtený kompenzační výkon je uveden v Tab. 4.

Tab. 4: Potřeba kompenzačního výkonu pro pohony lisů

Pohony lisů	P [kW]	$\cos \varphi_1$ [–]	Q [kVAr]	Q_k [kVAr]
	600	0,88	324	127
Navíječky plechů	150	0,95-0,98	45	0

V tomto provozu by mohlo být použito nehrazené kompenzační zařízení, ale z důvodu propojení lisovny s velkosklady, je nutné opět použít stupňovitě spínané hrazené kompenzační zařízení. Rozváděč RC5 je složen z šesti stupňů v poměru spínaných výkonů 1:1:1:1:2:2. První až čtvrtý stupeň obsahuje kondenzátor se jmenovitým výkonem $Q_{cn} = 22,5$ kVAr. Pátý a šestý stupeň je složen z dvojice těchto kondenzátorů. Kondenzátory jsou zahrazeny ochrannými tlumivkami s činitelem zatlumení $p = 7\%$. Jednotlivé sekce jsou spínány stykači a jištěny pojistkovými odpínači. První až čtvrtý stupeň má tedy 20 kVAr, pátý a šestý stupeň má 40 kVAr.

Schéma kompenzačního rozváděče je nakresleno v Příloze B.

7.2.1.3 Kompenzace velkoskladů

Velkosklady se svým složením spotřebičů nepotřebují žádné kompenzační zařízení. Instalované spotřebiče, ale generují nezanedbatelnou úroveň harmonických proudů, které tečou dále do sítě. Z tohoto důvodu musí být v lisovně instalována hrazená kompenzační zařízení, aby nedošlo k přetížení kompenzačních kondenzátorů harmonickými proudy.

7.2.1.4 Kompenzace fotovoltaické elektrárny

Kompenzace jalového výkonu FVE v LDS je nutné v případě, pokud dochází k přetoku činného výkonu z LDS do distribuční soustavy. K přetoku výkonu dochází v případě, kdy je výkon FVE vyšší než spotřeba v LDS. Pro výrobu elektrické energie z fotovoltaických elektráren je charakteristické, že nemůžeme předem znát:

- velikost dodávaného výkonu,
- čas dodávky,
- průběh dodávaného výkonu.

Z těchto důvodů je nutné určit, zda v libovolném okamžiku nepřevýší výroba FVE spotřebu LDS. Spotřebu výkonu jednotlivých provozů v LDS stanovíme z instalovaného výkonu a součinitele soudobosti β , který je charakteristický pro daný provoz.

Spotřeba výkonu v kovárně:

$$P_{kov} = P_{inst} \cdot \beta_{kov} = 5 \cdot 0,55 = 2,75 \text{ MW}$$

Spotřeba výkonu v lisovně:

$$P_{lis} = P_{inst} \cdot \beta_{lis} = 2 \cdot 0,45 = 0,95 \text{ MW}$$

Spotřeba výkonu ve velkoskladech:

$$P_{skl} = P_{inst} \cdot \beta_{skl} = 0,7 \cdot 0,23 = 0,21 \text{ MW}$$

Celkový spotřebovávaný výkon:

$$P_c = P_{kov} + P_{lis} + P_{skl} = 2,75 + 0,95 + 0,21 = 3,91 \text{ MW}$$

Protože provoz velkoskladů není nepřetržitý, je celková spotřeba činného výkonu v LDS vždy alespoň 3,7 MW. Špičkový výkon FVE je 1,6 MW, tudíž se veškerá produkce energie z FVE spotřebuje v LDS a nedochází k přetoku činného výkonu do distribuční soustavy.

Kvalita elektrické energie dodávaná fotovoltaickou elektrárnou s centralizovanými střídači je co do úrovně generovaných harmonických, symetrie a kolísání napětí pod mezemi stanovených normou ČSN EN 50160.

Z výše uvedených důvodů není nutné použít žádné kompenzační zařízení.

7.2.2 Varianta centrální kompenzace na úrovni vysokého napětí

V případě centrální kompenzace v hlavní rozvodně RH 22 kV se instaluje kompenzační zařízení pokrývající celkovou spotřebu jalového výkonu v síti. Kompenzační zařízení je nutné umístit na obě sekce rozvodny z důvodu druhého stupně zabezpečení dodávky energie spotřebitelům. Kompenzační zařízení instalovaná na úrovni vysokého napětí se skládají z menšího počtu stupňů než zařízení na úrovni nízkého napětí. Je to dáno především vysokými investičními náklady na jistící prvky kompenzačních stupňů.

Potřebný kompenzační výkon v LDS je dán součtem kompenzačních výkonů jednotlivých spotřebitelů:

$$Q_{LDS} = Q_{kovárna} + Q_{lisovna} = 2 \cdot 604 + 2 \cdot 490 + 160 = 2,348 \text{ MVar}$$

Vypočtený výkon zaokrouhlíme na 2,4 MVar a rozdělíme do dvou stupňů s výkony 0,8 MVar a 1,6 MVar. Každý stupeň je zahrazen reaktorem s činitelem zatlumení $p = 7\%$. Stupně jsou spínány a jistěny vypínači.

Schéma kompenzačních stupňů je zakresleno v Příloze B podobě dodatečných kobek C1 až C4 v hlavní rozvodně RH 22 kV.

7.3 Investiční posouzení variant

Pro navržené varianty kompenzace jalového výkonu v LDS provedeme souhrn investičních nákladů.

7.3.1 Investiční náklady uživatelů LDS

První varianta počítá s kompenzací jalového výkonu jednotlivých odběrů. Každý uživatel LDS si na své náklady pořídí kompenzační zařízení a dále platí provozovateli LDS pouze za odběr činného výkonu. Po vykompenzování jalového výkonu platí uživatelé LDS provozovateli LDS pouze za odebíraný činný výkon částku cca 2,25 Kč/kWh.

Náklady na kompenzaci odběru kovárny jsou dány součtem nákladů na kompenzační rozváděče RC1 až RC4. Cena kompenzačních rozváděčů je určena cenou jejich komponent, jejichž výčet je uveden v Tab. 5 a Tab. 6.

Tab. 5: Složení kompenzačních rozváděčů RC1, RC2

Položka	Počet [ks]
Skříň rozváděče	3
Regulátor jalového výkonu	1
Pojistkový odpínač 1250 A	1
Pojistky 1250 A	3
Pojistkový odpínač 125 A	10
Pojistky 125 A	30
Stykač $I_n = 70$ A	10
Kondenzátor $Q_{Cn} = 34$ kVar, $U_{Cn} = 550$ V	20
Tlumivka $L = 0,99$ mH	10
Dokumentace, montáž	
Celkové náklady na rozváděč: $N_{RC1,RC2} = 282\,500$ Kč	

Tab. 6: Složení kompenzačních rozváděčů RC3, RC4

Položka	Počet [ks]
Skříň rozváděče	3
Regulátor jalového výkonu	1
Pojistkový odpínač 1250 A	1
Pojistky 1250 A	3
Pojistkový odpínač 125 A	10
Pojistky 125 A	30
Stykač $I_n = 70$	10
Kondenzátor $Q_{Cn} = 27,5$ kVar, $U_{Cn} = 440$ V	20
Tlumivka $L = 0,78$ mH	10
Dokumentace, montáž	
Celkové náklady na rozváděč: $N_{RC3,RC4} = 222\,000$ Kč	

Celkové náklady na kompenzaci odběru kovárny:

$$N_{kov} = 2 \cdot N_{RC1,RC2} + 2 \cdot N_{RC3,RC4} = 2 \cdot 282\,500 + 2 \cdot 222\,000 = 1\,009\,000 \text{ Kč}$$

Náklady na kompenzaci odběru lisovny představují náklady na kompenzační rozváděč RC5. Cena tohoto rozváděče je určena cenou jeho komponent, jejichž výčet je uveden v Tab. 7.

Tab. 7: Složení kompenzačního rozváděče RC5

Položka	Počet [ks]
Skříň rozváděče	1
Regulátor jalového výkonu	1
Pojistkový odpínač 400 A	1
Pojistky 400 A	3
Pojistkový odpínač 100 A	2
Pojistky 100 A	6
Pojistkový odpínač 50 A	4
Pojistky 50 A	12
Stykač $I_n = 58 \text{ A}$	2
Stykač $I_n = 29 \text{ A}$	4
Kondenzátor $Q_{Cn} = 22,5 \text{ kVAr}$, $U_{Cn} = 440 \text{ V}$	8
Tlumivka $L = 1,92 \text{ mH}$	4
Tlumivka $L = 0,96 \text{ mH}$	4
Dokumentace, montáž	
Celkové náklady na rozváděč: $N_{RC5} = 92\,500 \text{ Kč}$	

Celkové náklady na kompenzaci odběru lisovny:

$$N_{lis} = N_{RC5} = 92\,500 \text{ Kč}$$

7.3.2 Investiční náklady provozovatele LDS

Druhá varianta počítá s centrální kompenzací v hlavní rozvodně RH 22 kV provozovatele LDS, který za tuto službu účtuje přírážku k platbě činného výkonu podle účinníku odebírané energie. Náklady na kompenzační zařízení jedné sekce rozvodny je dáno složením kompenzačních kobek, které je uvedeno v Tab. 8.

Největší náklady na instalaci kompenzačního zařízení jsou spojeny s rozšířením hlavní rozvody a výbavou kobek. Náklady na rozšíření jedné sekce rozvodny včetně výbavy jsou cca 1 000 000 Kč. Náklady na kompenzační stupeň 0,8 MVar jsou cca 250 000 Kč a náklady na stupeň 1,6 MVar jsou cca 310 000 Kč.

Tab. 8: Složení kompenzačních kobek na jedné sekci rozvodny

Položka	Počet [ks]
Rozšíření kobek včetně vypínačů, měření, ochran	2
Hrazený kompenzační stupeň $Q_C = 0,8 \text{ MVar}$, $p = 7 \%$	1
Hrazený kompenzační stupeň $Q_C = 1,6 \text{ MVar}$, $p = 7 \%$	1
Dokumentace, montáž	
Celkové náklady na sekci rozvodny: $N_{sekce} = 1\,560\,000 \text{ Kč}$	

Celkové náklady na kompenzační zařízení provozovatele LDS jsou:

$$N_{LDS} = 2 \cdot N_{sekc} = 2 \cdot 1\,560\,000 = 3\,120\,000 \text{ Kč}$$

Jednotliví uživatelé LDS platí provozovateli LDS za odběr jalového výkonu procentuální přírážku k platbě činného výkonu. Velikost přírážky se stanoví podle naměřených hodnot činné a jalové energie. Z naměřených hodnot se v daném časovém pásmu stanoví průměrná hodnota účinníku. Podle Tab. 1 se pak určí procentní přírážka k ceně elektrické energie.

Při našem návrhu budeme uvažovat s odhadnutými účinníky jednotlivých odběrů, které jsou charakteristické pro dané provozy.

Podle spotřeb jalového výkonu dominantních spotřebičů provozu kovárny, které je popsány v Tab. 2 a Tab. 3, odhadneme hodnotu průměrného účinníku $\cos \varphi_{1kov} = 0,8$. Této hodnotě odpovídá rozsah $tg \varphi_{1kov} = 0,737 - 0,763$. Tomu odpovídá přírážka 19,74 % k platbě činné energie.

V provozu lisovny je spotřeba jalového výkonu dána Tab. 4. Z uvedených hodnot odhadneme hodnotu průměrného účinníku $\cos \varphi_{1lis} = 0,92$. Této hodnotě odpovídá rozsah $tg \varphi_{1kov} = 0,411 - 0,440$. Tomu odpovídá přírážka 3,43 % k platbě činné energie.

8 ZÁVĚR

Tato práce je rozdělena na dvě hlavní části. Teoretická část práce se zabývá souhrnem pravidel pro provoz lokálních distribučních soustav, rušivými vlivy na kvalitu elektrické energie a možnostmi kompenzace jalového výkonu.

V pravidlech provozu LDS jsou stanoveny podmínky chodu LDS, které jsou závazné pro provozovatele i pro uživatele LDS. Provozovatel LDS je povinen připojit k LDS každého, kdo splňuje podmínky dané EZ, jeho vyhláškami a PPLDS. Uživatel LDS je především povinen poskytovat veškeré informace o jeho odběru tak, aby byl zajištěn spolehlivý a bezpečný chod LDS.

Kvalita elektrické energie je jednoznačně definována jejími parametry v odběrném bodě. Vliv na tyto parametry mají především nelineární spotřebiče generující harmonické proudy a poruchové stavy v síti.

Kompenzace jalového výkonu může být realizována různými způsoby. Ve většině případů se jedná o stupňovitě spínaná hrazená kompenzační zařízení pro individuální nebo skupinovou kompenzaci.

Praktická část práce se zabývá návrhem koncepce kompenzace jalového výkonu v konkrétní lokální distribuční soustavě. Tato soustava je složena z provozovatele LDS, který disponuje lokálním zdrojem elektrické energie v podobě fotovoltaické elektrárny a třemi velkoodběrateli s různými charakterystikami odběrů. Největším odběratelem je zakázková kovárna s instalovaným výkonem cca 5 MW. Významnými spotřebiči jsou středofrekvenční pece, kovací stolice a ohřívací pece. Druhým odběratelem je lisovna transformátorových plechů s instalovaným výkonem 2 MW v podobě navíječek plechů a lisů. Třetím odběratelem jsou velkosklady s instalovaným výkonem 0,7 MW v podobě osvětlení, výpočetní techniky a klimatizace.

Pro danou LDS byly navrženy dvě varianty kompenzace jalového výkonu. První variantou je vykompenzování odběru jednotlivých odběratelů na vlastní náklady. Druhou variantou je centrální kompenzace ve vstupní transformační stanici provozovatelem LDS, který následně účtuje odběratelům poplatky za odběr jalového výkonu.

V první variantě byla v kovárně navržena individuální kompenzace středofrekvenčních pecí a skupinová kompenzace zbývajících spotřebičů. Parametry těchto kompenzačních zařízení jsou popsány v kapitole 7.2.1.1 a celkové investiční náklady jsou $N_{kov} = 1\,009\,000$ Kč. V provozu lisovny byla navržena skupinová kompenzace popsána v kapitole 7.2.1.2 s investičními náklady $N_{lis} = 92\,500$ Kč. Všechny kompenzační zařízení jsou stupňovitě spínaná hrazená tlumivkami s činitelem zatlumení $p = 7\%$. V provozu velkoskladů není nutné žádné kompenzační zařízení s ohledem na instalované spotřebiče. Také u fotovoltaické elektrárny není nutná žádná kompenzace, neboť nedochází k přetoku činného výkonu do distribuční sítě.

V druhé variantě byla navržena centrální kompenzace v hlavní rozvodně RH 22 kV. Kompenzační zařízení je složeno ze dvou hrazených stupňů s činitelem zatlumení $p = 7\%$ o celkovém výkonu 2,4 MVar. Z důvodů druhého stupně zabezpečení dodávek energie odběratelům je nutné instalovat kompenzační zařízení na obě sekce rozvodny. Celkové investiční náklady na centrální kompenzační zařízení jsou $N_{LDS} = 3\,120\,000$ Kč. Při této variantě kompenzace platí odběratelé přírážku za odběr jalového výkonu přírážku stanovenou podle průměrného účinníku odběru. Pro provoz kovárny jsme stanovili průměrný účinník na hodnotu 0,8.

Pro tuto hodnotu odpovídá přírážka 19,74 % k platbě za činnou energii. Pro provoz lisovny jsme stanovili průměrný účinník na hodnotu 0,92. Pro tuto hodnotu odpovídá přírážka 3,43 % k platbě za činnou energii.

Především pro majitele kovárny představuje uvedená přírážka neúměrné zvýšení nákladů na provoz, avšak provozovatel LDS může odběratelům nabídnout takové podmínky, které jsou z dlouhodobého hlediska výhodné pro obě strany.

POUŽITÁ LITERATURA

- [1] BLAŽEK, Vladimír ; SKALA, Petr . *Distribuce elektrické energie*. Brno : VUT, 138 s.
- [2] BRANDŠTETTER, Pavel. *Aktivní výkonové filtry*. Ostrava : VŠB-TUO, 2005. 18 s.
- [3] HOLOUBEK, Jiří ; KORENC, Vladimír. *Kompensace jalového výkonu v praxi*. Praha : IN-EL, 1999. 127 s. ISBN 80-86230-07-4.
- [4] HOLOUBEK, Jiří ; PAWLAS, Jaroslav. Stupňovitě spínaná kompenzační zařízení vn . *Elektro* [online]. 2004, 05, [cit. 2011-12-03]. Dostupný z WWW: <http://www.odbornecasopisy.cz/index.php?id_document=25835>.
- [5] KORENC, Vladimír ; MATOUŠEK, Zdeněk. *Linkový kondicionér a jeho praktické užití*. Elektro 2000, 9 s.
- [6] KŮS, Václav. *Nízkofrekvenční rušení*. Plzeň : Západočeská univerzita, 2003. 195 s. ISBN 80-7082-976-1.
- [7] ŽÁČEK, Jaroslav. Účinník v teorii a praxi . *Elektro* [online]. 2004, 12, [cit. 2011-12-12]. Dostupný z WWW: <http://www.odbornecasopisy.cz/index.php?id_document=26065>.
- [8] *Česká energetika* [online]. 2006 [cit. 2011-11-26]. Kompensace jalového výkonu. Dostupné z WWW: <http://www.ceskaenergetika.cz/kompensace_jaloveho_vykonu/>.
- [9] *ELSTOM spol s.r.o.* [online]. 2011 [cit. 2011-11-06]. Kompensace. Dostupné z WWW: <<http://www.elstom.eu/kompensace>>.
- [10] *Měď portal* [online]. 2007 [cit. 2011-11-26]. Kvalita elektrické energie. Dostupné z WWW: <<http://www.medportal.cz/elektricke-vedeni/kvalita-elektricke-energie>>.
- [11] *Pravidla provozování lokální distribuční soustavy : Společná část* [online]. Praha : Energetický regulační úřad, 2003, [cit. 2011-10-03]. Dostupné z WWW: <<http://eru.cz>>.
- [12] *Pravidla provozování lokální distribuční soustavy : Kvalita elektřiny v LDS, způsoby jejího zjišťování a hodnocení* [online]. Praha : Energetický regulační úřad, 2003 [cit. 2011-10-03]. Dostupné z WWW: <<http://eru.cz>>.
- [13] *Pravidla provozování lokální distribuční soustavy : Obchodní měření* [online]. Praha : Energetický regulační úřad, 2003 [cit. 2011-10-04]. Dostupné z WWW: <<http://eru.cz>>.
- [14] *Pravidla provozování distribuční soustavy : Pravidla pro paralelní provoz zdrojů se sítí* [online]. Praha : Energetický regulační úřad, 2003 [cit. 2011-05-06]. Dostupné z WWW: <<http://eru.cz>>.
- [15] ČSN EN 50160: 2000 Charakteristiky napětí elektrické energie dodávané z veřejné distribuční sítě

Právní předpisy v energetice

- [L1] Zákon č. 458/2000 Sb. o podmínkách podnikání a výkonu státní správy v energetických odvětvích (Energetický zákon)
- [L2] Vyhláška MPO č. 18/2002 Sb. o podmínkách připojení a dopravy elektřiny v elektrizační soustavě
- [L3] Vyhláška ERÚ č. 306 o kvalitě dodávek elektřiny a souvisejících služeb v elektroenergetice
- [L4] Vyhláška MPO č. 220 o dispečerském řádu elektrizační soustavy České republiky

- [L5] Vyhláška MPO č. 219 o postupu v případě hrozícího nebo stávajícího stavu nouze v elektroenergetice
- [L6] Vyhláška MPO č. 218 o podrobnostech měření elektřiny a předávání technických údajů
- [L7] Vyhláška ERÚ č. 373, kterou se stanoví pravidla trhu s elektrickou energií
- [L8] Vyhláška ERÚ č. 197, kterou se stanoví podmínky připojení a dodávek elektrické energie pro chráněné zákazníky
- [L9] Zákon o metrologii, zákon č. 505/1990 Sb. a jeho novela č. 119/2000 Sb.
- [L10] Vyhláška MPO č. 263/2000 Sb., kterou se stanoví měřidla k povinnému ověřování a měřidla podléhající schválení typu

PŘÍLOHY

Příloha A Přehledové schéma původní sítě

Příloha B Přehledové schéma vzniklé LDS