

**ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI  
FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ**

**KATEDRA ELEKTROMECHANIKY A VÝKONOVÉ ELEKTRONIKY**

**BAKALÁŘSKÁ PRÁCE**

**Stanovení možností MVE Kořensko pro kompenzaci  
vývodu do sítě 22kV**

**vedoucí práce: Doc. Ing. Karel Noháč, Ph.D.  
autor: Ladislav Ponert**

**2012**

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI  
Fakulta elektrotechnická  
Akademický rok: 2011/2012

**ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE**  
(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Ladislav PONERT**  
Osobní číslo: **E11B0471P**  
Studijní program: **B2612 Elektrotechnika a informatika**  
Studijní obor: **Elektrotechnika a energetika**  
Název tématu: **Stanovení možností MVE Kořensko pro kompenzaci vývodu do sítě 22 kV**  
Zadávající katedra: **Katedra elektromechaniky a výkonové elektroniky**

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

Proveďte technickou analýzu možností kompenzačního provozu MVE Kořensko pro vývod do sítě 22 kV.

1. Popište teoretické podmínky kompenzace v sítích vn v ČR.
2. Vypočtete velikosti potřebné kapacity nutné pro kompenzaci místní sítě 22 kV, do které pracuje MVE Kořensko.
3. Doplňte respektování příspěvku asynchronních generátorů a pomocných pohonů.
4. Navrhněte minimálně dva vhodné způsoby zapojení kompenzace včetně příslušných výpočtů.
5. Navržené varianty kompenzace porovnejte a navrhněte nejvhodnější možnost pro dané zapojení.

Rozsah grafických prací: **podle doporučení vedoucího**

Rozsah pracovní zprávy: **20 - 30 stran**

Forma zpracování bakalářské práce: **tištěná/elektronická**


Seznam odborné literatury:

1. Mertlová J., Schejbal K.: Elektroenergetika 2
2. Škorpil J., Kasárník M.: Obnovitelné zdroje energie 1. - Vodní elektrárny

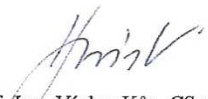
Vedoucí bakalářské práce: **Doc. Ing. Karel Noháč, Ph.D.**  
Katedra elektroenergetiky a ekologie

Datum zadání bakalářské práce: **17. října 2011**

Termín odevzdání bakalářské práce: **3. června 2012**

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



  
Prof. Ing. Václav Kůs, CSc.  
vedoucí katedry

V Plzni dne 17. října 2011

## **Anotace**

Předmětem bakalářské práce je technické stanovení možností MVE Kořensko pro kompenzaci vývodu do sítě 22 kV.

Cílem práce je vypočítat velikost potřebné kapacity nutné pro kompenzaci místní sítě 22 kV do které pracuje MVE Kořensko. Dále navrhnout minimálně dva vhodné způsoby zapojení kompenzace včetně příslušných výpočtů. Navržené varianty kompenzace porovnat a navrhnout nejvhodnější možnost pro dané zapojení.

## **Klíčová slova**

Kompenzace, kompenzace generátoru, kompenzace motoru, parametry výroby, jalový výkon, asynchronní motor, asynchronní generátor, transformátor, účinník, kondenzátor, turbína.

# **Specifying of MVE Kořensko Possibilities for Compensating of 22 kV Network**

## **Abstract**

The subject of this bachelor thesis is the determination of the technical options for reactive compensating MVE (small hydroelectric power plant) Kořensko outlet into a network of 22 kV.

The objective is to calculate the size of the necessary capacity required to compensate the local 22 kV power grid linked to the MVE Kořensko, to design at least two suitable ways of connection the reactive compensation, including the appropriate calculations and to compare the proposed compensation options in order to choose the most suitable one.

## **Key words**

Compensation, generator, motor compensation, production parameters, reactive power, asynchronous motor, induction generator, transformer, power factor, capacitor, turbine.

## **Prohlášení**

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

Prohlašuji, že jsem tuto bakalářskou práci vypracoval samostatně, s použitím odborné literatury a pramenů uvedených v seznamu, který je součástí této bakalářské práce.

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

V Plzni dne 7.6.2012

.....

Jméno a příjmení

## **Poděkování**

Tímto bych rád poděkoval vedoucímu bakalářské práce Doc. Ing. Karlu Noháčovi, Ph.D. a konzultantovi Ing. Aleši Cinkovi za cenné profesionální rady, připomínky a metodické vedení práce.

V neposlední řadě mi je milou povinností poděkovat rodičům, kteří mě jak morálně, tak finančně během celého studia podporovali, a všem vyučujícím, kteří se na mém vzdělání na ZČU podíleli.

## Obsah

SEZNAM V PRÁCI POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK .....	11
1 ÚVOD .....	12
2 TEORETICKÉ PODMÍNKY KOMPENZACE V SÍŤÍCH VN V ČR .....	13
2.1 Požadavky na provozní parametry výroby .....	13
2.2 Vznik jalového výkonu .....	14
2.3 Spotřebiče jalového výkonu .....	16
2.3.1 Asynchronní motory .....	16
2.3.2 Asynchronní generátory .....	17
2.3.3 Transformátory .....	17
2.3.4 Střídavé elektrické obloukové pece, pánvové pece, indukční pece .....	17
2.3.5 Výkonové polovodičové měniče .....	18
2.3.6 Ostatní spotřebiče jalového výkonu .....	18
2.3.7 Venkovní a kabelová vedení .....	18
2.4 Důsledky odběru výkonu se špatným účínkem .....	18
2.5 Způsoby zlepšování účínku .....	19
2.6 Matematický model kompenzace .....	20
2.7 Rozdělení kompenzace z hlediska připojení do sítě .....	22
2.7.1 Individuální kompenzace .....	22
2.7.2 Skupinová kompenzace .....	22
2.7.3 Centrální kompenzace .....	22
2.7.4 Kombinovaná kompenzace .....	22
2.8 Technické prostředky pro kompenzaci jalového výkonu .....	23
2.8.1 Rotační kompenzační zařízení .....	23
2.8.2 Statické kompenzátory .....	25
2.8.2.1 Prosté kondenzátory .....	25
2.8.2.2 Chráněné kompenzační sekce .....	27
2.8.2.3 Kompenzační filtry .....	28
2.9 Způsoby řízení kompenzačního výkonu .....	30
2.9.1 Stupňovité řízení kompenzátory .....	30
2.9.1.1 Kontaktní .....	30
2.9.1.2 Bezkontaktní .....	31
2.9.2 Plynule řízené-pasivní .....	31
2.9.3 Plynule řízené-aktivní .....	33



2.9.3.1	Paralelní aktivní filtr.....	33
2.9.3.2	Sériový aktivní filtr.....	34
2.9.3.3	Kombinované aktivní filtry.....	35
2.9.4	Kombinované.....	35
2.10	Vliv kompenzačních zařízení na napájecí síť.....	36
3	VÝPOČET POTŘEBNÉ KAPACITY NUTNÉ PRO KOMPENZACI MVE KOŘENSKO.....	37
3.1	Generátory MVE Kořensko.....	37
3.1.1	Rotor.....	38
3.1.2	Chlazení.....	39
3.1.3	Výpočet výkonu kondenzátoru.....	39
3.2	Generátor MVE (JETE) Kořensko.....	39
3.2.1	Asynchronní generátor.....	39
3.2.1.1	Stator.....	40
3.2.1.2	Vinutí statoru.....	40
3.2.1.3	Rotor.....	40
3.2.1.4	Vinutí rotoru.....	41
3.2.1.5	Chlazení stroje.....	42
3.2.2	Výpočet výkonu kondenzátoru.....	42
3.3	Pomocné pohony.....	42
3.3.1	Čerpací agregát regulátoru.....	42
3.3.1.1	Výpočet výkonu kondenzátoru.....	43
3.3.2	Čerpadlové soustrojí chladící vody.....	43
3.3.2.1	Výpočet výkonu kondenzátoru.....	44
3.3.3	Čerpadlové soustrojí převodovky.....	44
3.3.3.1	Výpočet výkonu kondenzátoru.....	45
3.3.4	Čerpadlové soustrojí odlučovače.....	45
3.3.4.1	Výpočet výkonu kondenzátoru.....	45
3.3.5	Čerpadlové soustrojí hydraulického obvodu.....	46
3.3.5.1	Výpočet výkonu kondenzátoru.....	46
3.3.6	Čerpací agregát RZK.....	46
3.3.6.1	Výpočet výkonu kondenzátoru.....	47
3.3.7	Kompresorová soustrojí.....	47
3.3.7.1	Výpočet výkonu kondenzátoru.....	47
3.4	Výpočet celkového výkonu kondenzátoru.....	48
4	PŘÍSPĚVKY ASYNCHRONNÍCH GENERÁTORŮ A POMOCNÝCH POHONŮ.....	49

4.1	Generátory.....	49
4.2	Peltonova turbína .....	49
4.3	Pomocné pohony.....	49
4.4	Transformátor.....	49
5	NÁVRH VHODNÝCH ZPŮSOBŮ ZAPOJENÍ KOMPENZACE .....	50
5.1	Původní způsob kompenzace .....	50
5.2	Individuální .....	50
5.3	Centrální s transformátorem.....	50
5.4	Centrální bez transformátoru.....	51
6	POROVNÁNÍ NAVRŽENÝCH VARIANT KOMPENZACE .....	51
6.1	Individuální .....	51
6.2	Centrální s transformátorem.....	51
6.3	Centrální bez transformátoru.....	52
7	ZÁVĚR.....	53
	SEZNAM POUŽITÉ A CITOVANÉ LITERATURY.....	54
	PŘÍLOHY .....	55

## Seznam v práci použitých symbolů a zkratk

U [V]	elektrické napětí
I [A]	elektrický proud
P [W]	činný výkon
Q [Var]	jalový výkon
S [VA]	zdánlivý výkon
$\cos\varphi$ [-]	účinník 1. harmonické
$\lambda$ [-]	správný účinník
$\alpha$ [°]	řídící úhel tranzistoru
R [ $\Omega$ ]	činný odpor
X [ $\Omega$ ]	reaktance
Z [ $\Omega$ ]	impedance
Y [S]	admitance
C [F]	kapacita
$\omega$ [rad/s]	úhlová frekvence
$\text{tg}\delta$ [-]	ztrátový úhel kondenzátoru
L [H]	indukčnost
N [-]	počet stupňů kompenzátoru
m [kg]	hmotnost
otáčky [ot.min <sup>-1</sup> ]	otáčky za minutu
J [kg.m <sup>2</sup> ]	moment setrvačnosti
t [°C]	teplota
Q [m <sup>3</sup> s <sup>-1</sup> ]	průtok
d [m]	délka
MVE	malá vodní elektrárna
JETE	jaderná elektrárna Temelín
OK	oběžné kolo
ČAR	čerpací agregát regulátoru
PV	prosáklá voda
ČARZK	čerpací agregát rychlozávěrné klapky
RZK	rychlozávěrná klapka
VLT	řeka Vltava

## 1 Úvod

V dnešní době se stále více dostává do popředí zájmu kompenzace jalového výkonu, protože ceny energií se neustále zvyšují. Ochrana klimatu a energie patří k nejvíce diskutovaným otázkám současné politiky. Elektřina, jako jedna z forem energie, je pro nás nepostradatelná a tím pádem se stává ústředním tématem politických diskusí. Elektrická energie je vyráběna v elektrárnách (např. tepelných, plynových atd.) z uhlí, ropy, plynu. Tyto suroviny při spalování uvolňují obrovské množství oxidu uhličitého (CO<sub>2</sub>), který negativně ovlivňuje klima naší Země.

Při výrobě elektrické energie z primárních zdrojů, dále pak při jejím přenosu a odběrem spotřebitelem, dochází v jednotlivých procesech ke ztrátám. Tyto ztráty tvoří z celkových ztrát jen malou část proudově závislé ztráty elektřiny v přenosových a rozvodných sítích provozovatelů a rozvodných sítích odběratelů, ale konečná absolutní hodnota těchto ztrát se pohybuje řádově v miliardách kilowatthodin. Provozem běžných spotřebičů v sítích vzniká indukční jalový výkon, který tvoří část proudově závislých ztrát. Těmto ztrátám lze zabránit kompenzací. [ 7 ]

## 2 Teoretické podmínky kompenzace v sítích VN v ČR

### 2.1 Požadavky na provozní parametry výroby

Pravidla pro paralelní provoz zdrojů ze sítí provozovatele distribuční soustavy (PDS) schválená energetickým regulačním úřadem pro rok 2009 požadují pro zdroje s výkonem nad 400 kW připojované do sítí VN vybavení těchto zdrojů nástroji pro řízení jalového výkonu.

Požadavky:

1. Udržování pevné hodnoty za daného účinníku  $\cos \varphi$
2. Udržování hodnoty účinníku  $\cos \varphi = f(P)$
3. Udržování zadané hodnoty jalového výkonu (odběr/dodávka) v rámci provozního diagramu stroje (PQ diagramu)
4. Udržování napětí v předávacím místě (na výstupu generátoru, za blokovým transformátorem nebo v pilotním uzlu DS) v rámci omezení daných PQ diagramem stroje.

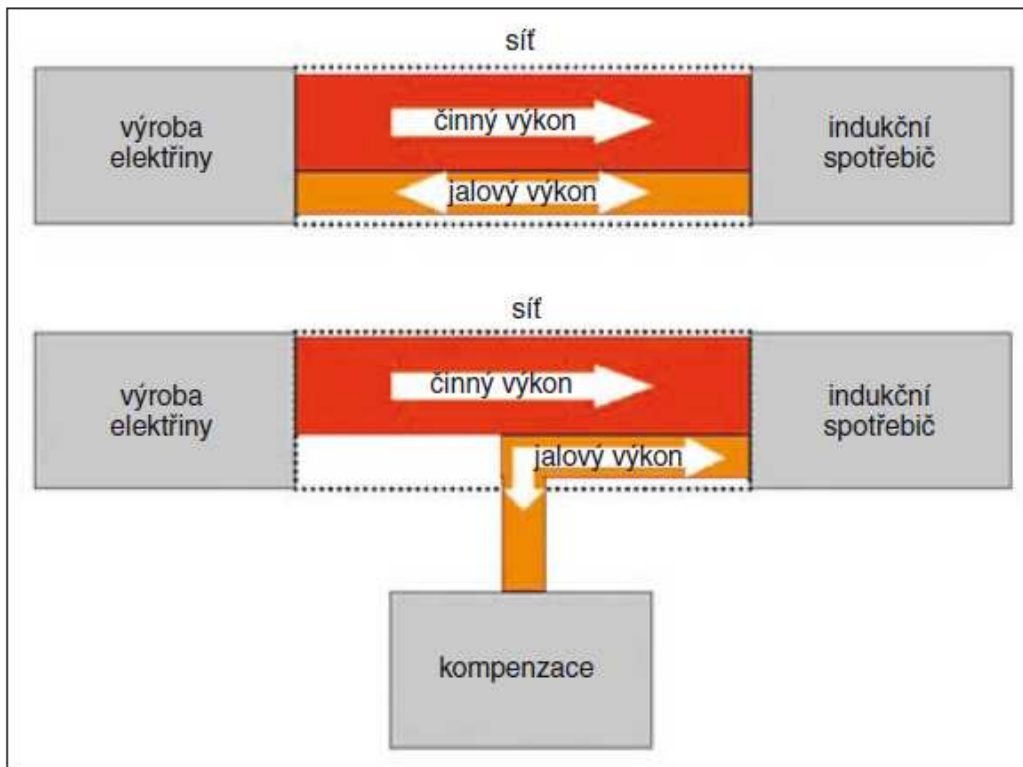
Zdroj musí být schopen dodávat jmenovitý činný výkon v rozmezí účinníku  $\cos \varphi = 0,85$  až 1 (dodávka jalového výkonu) a účinníku  $\cos \varphi = 1$  až 0,95 (odběr jalového výkonu) při dovoleném rozsahu napětí na svorkách generátoru  $\pm 5\%$  jmenovitého napětí a při kmitočtu v rozmezí 48,5 až 50 Hz.

Uvedený základní požadovaný regulační rozsah jalového výkonu může být modifikován, tedy zúžen nebo rozšířen. Důvodem případné modifikace může být např. odlišná (nižší/vyšší) potřeba regulačního jalového výkonu v dané lokalitě DS nebo zvláštní technologické důvody (výrobní s asynchronními generátory, fotovoltaiky, větrné elektrárny). Taková modifikace předpokládá uzavření zvláštní dohody mezi provozovatelem výrobní a PDS.

U fotovoltaických elektráren se předpokládá jako postačující nižší rozsah účinníku, od 0,95 -1 pro dodávku jalového výkonu a 1 – 0,95 pro odběr jalového výkonu. Při silně kolísajícím výkonu pohonu (např. u některých typů větrných elektráren) musí být kompenzace jalového výkonu automaticky a dostatečně rychle regulována. Takovéto zařízení nesmí negativně ovlivňovat úroveň signálu HDO. [ 2 ] [ 5 ]

## 2.2 Vznik jalového výkonu

Elektrické spotřebiče odebírají ze sítě výkon. Výkon je dán obecně součinem proudu a napětí. Tento odebraný výkon je dále ve spotřebiči přeměněn na užitečný výkon, který je označován jako činný výkon  $P$  ( $P = U \cdot I$  ( $U, I \dots$  efektivní hodnoty)). Elektrické spotřebiče pracují na indukčním principu, jsou-li připojeny na střídavý, resp. třífázový proud, odebírají ze sítě navíc výkon, který potřebují k vytvoření magnetického pole, jenž je poté vrácen zpět do sítě. Tento „neužitečný“ jalový výkon  $Q$  tak pendluje mezi zdrojem (generátorem) a spotřebičem sem a tam (obr. 2.1) [ 7 ]

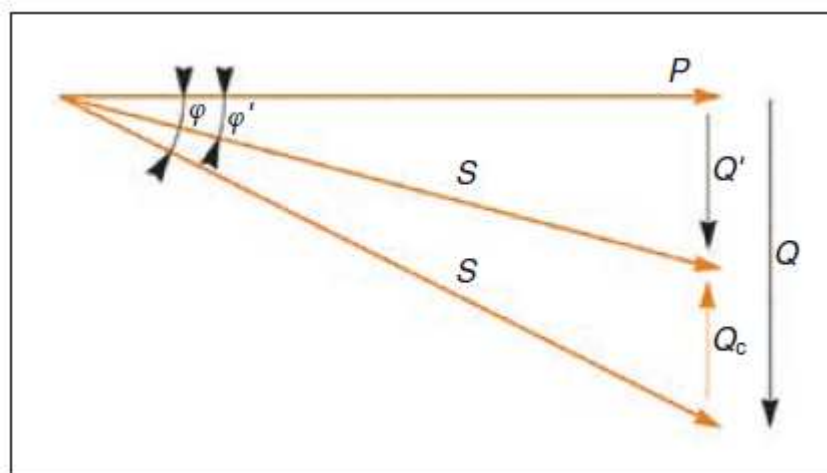


Obr. 2.1 Síť bez kompenzace (horní část) a s kompenzací (dolní část) jalového výkonu. [ 7 ]

a dodatečně k činnému výkonu  $P$  zatěžuje generátory, transformátory, přenosová vedení vn a vvn i všechny elektrické rozvodné soustavy v sítích nn. Vektorový součet činného a jalového výkonu se nazývá zdánlivý výkon a označuje se velkým písmenem  $S$ . mezi vektorem napětí a proudu leží úhel fázového posuvu  $\varphi$ . Jalový výkon se vypočítá jako součin napětí, proudu a sinu úhlu fázového posuvu ( $Q = U \cdot I \cdot \sin \varphi$ ), činný výkon jako součin napětí, proudu a cosinu úhlu fázového posuvu ( $P = U \cdot I \cdot \cos \varphi$ ). Hodnota  $\cos \varphi$  je označována jako účinník. Zvětšuje-li se úhel fázového posuvu  $\varphi$ , zvětšuje se také jalový výkon. [ 7 ]

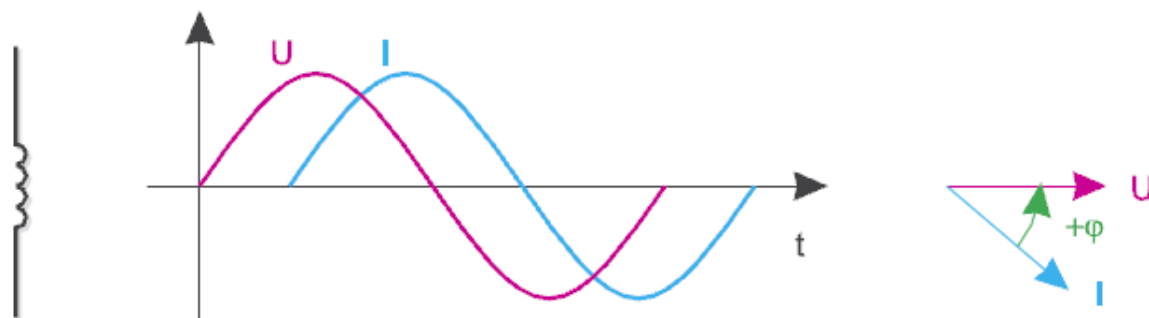
Pozn. – pod pojmem účinník rozumíme tzv. klasický účinník (definovaný jako kosinus fázového posuvu mezi 1. harmonickou napětí a proudem) a ne tzv. správný účinník  $\lambda$ , který uvažuje i ostatní newattové výkony trojfázové soustavy zatěžované nesouměrně nesinusovými proudy, tj. výkon deformační (způsobený zkreslením proudu harmonickými), výkon pulzační (způsobený zpětnou složkou proudu 1. harmonické) a výkon skrytý (způsobený nulovou složkou proudu 1. harmonické). [ 8 ]

Spotřebiče v energetických rozvodných sítích mají zpravidla indukční charakter. Snížení indukčního jalového výkonu lze dosáhnout paralelním připojením kondenzátorů k indukčnímu spotřebiči. Díky tomu je vracející se jalový výkon, který byl použit k vytvoření magnetického pole, „uskladněn“ v kondenzátoru a pendluje již jen mezi kondenzátorem a indukčním spotřebičem. Výkon kondenzátoru má kapacitní charakter a je směřován proti indukčnímu výkonu spotřebiče. Účinník se při požadované, ale neúplné kompenzaci indukčního jalového výkonu změní z  $\cos \varphi$  na  $\cos \varphi'$  (obr. 2.2). [ 7 ]

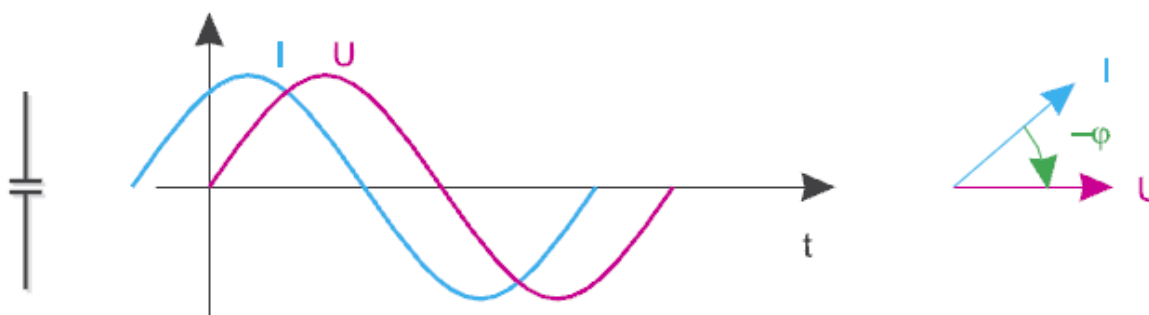


Obr. 2.2 Vektorový diagram činného výkonu P, jalového výkonu Q a zdánlivého výkonu S. [ 7 ]

Chování jednotlivých prvků elektrizační soustavy stejně jako spotřebičů elektrické energie je možné popsat jejich impedancí, která v sobě zahrnuje nejen složku činnou (ohmickou), ale i složku jalovou (induktivní nebo kapacitní). [ 4 ]



Obr. 2.3 Posuv napětí a proudu induktivních spotřebičů. [ 3 ]



Obr. 2.4 Posuv napětí a proudu kapacitních spotřebičů. [ 3 ]

## 2.3 Spotřebiče jalového výkonu

### 2.3.1 Asynchronní motory

Asynchronní motory jsou jedním z rozhodujících spotřebičů jalového induktivního výkonu potřebného k vytvoření točivého magnetického pole statoru a pokrytí rozptylového magnetického toku. Štítkový údaj účinníku se vztahuje ke jmenovitému zatížení, hodnota závisí na konstrukci motoru (např. kroužkové motory nebo pomaloběžné mají horší účinník oproti motorům s kotvou nakrátko nebo rychloběžným). Podstatné je zvětšení odebíraného jalového výkonu a zhoršení účinníku s klesajícím zatížením motoru, zvláště při chodu naprázdno (60 – 70 % příkonu motoru při plném zatížení). [ 8 ]

Celkový odebíraný jalový výkon  $Q$  je tvořen z jalového výkonu při chodu naprázdno  $Q_0$  a z proměnného jalového výkonu  $Q_z$ , který se zvětšuje se čtvercem poměrného zatížení motoru, tj.  $Q = Q_0 + Q_z \cdot (P/P_N)^2$ , kde  $P_N$  je jmen. výkon motoru. [ 8 ]



### 2.3.2 Asynchronní generátory

Asynchronní generátory odebírají z rozvodné sítě značný jalový indukční výkon pro vytvoření magnetického pole. [ 8 ]

### 2.3.3 Transformátory

Celkový odebíraný jalový výkon  $Q$  je tvořen z jalového výkonu při chodu na prázdko  $Q_0$ , který je asi 1 – 3,5 % jmenovitého výkonu transformátoru a z proměnného jalového výkonu pro pokrytí rozptylového magnetického toku, který se zvětšuje se čtvercem zatížení transformátoru, tj.  $Q = Q_0 + u_K \cdot (I/I_N)^2 \cdot S_N$ , kde  $S_N$  ( $I_N$ ) je jmenovitý výkon (proud) transformátoru. [ 8 ]

Hodnota účinnosti při chodu transformátoru naprázdno je velmi malá,  $\cos \varphi_0 = 0,1 - 0,2$ , tj. čistě jalové zatížení. Proto se vyžaduje kompenzace jalového proudu naprázdno transformátorů středo – a velkoodběratelů s měřením jalové energie na sekundární straně transformátoru. [ 8 ]

Při průměrném zatížení 70 % se celkový jalový výkon transformátoru pohybuje 4 – 6 % jmenovitého výkonu transformátoru. [ 8 ]

### 2.3.4 Střídavé elektrické obloukové pece, pánvové pece, indukční pece

Tato zařízení jsou jedna z nejproblematictějších z hlediska jejich zpětných vlivů na síť. Kromě odběrů výkonů s nízkými hodnotami účinnosti vykazují velkou proměnlivost odebíraného výkonu, která způsobuje kolísání napětí (blikání, flicker), generování vyšších harmonických proudů a nesymetrii odběru.

Stabilní hoření a dosažení požadovaného výkonu na oblouku je podmíněno účinností mezi  $\cos \varphi_0 = 0,7 - 0,86$ .

Symetrizaci odběru jednofázových pecí lze řešit vhodným přidáním tlumivek, kondenzátorů na svorky pece tak, aby tvořili třífázový spotřebič zapojený do trojúhelníku.

[ 8 ]

### 2.3.5 Výkonové polovodičové měniče

Jedná se o řízené a neřízené usměrňovače, měniče frekvence se stejnosměrným meziobvodem (napětiovým nebo proudovým), přímé měniče frekvence, fázově řízené střídavé spínače apod.

Různé typy měničů se z hlediska odběru jalového výkonu liší, např. řízený polovodičový usměrňovač pro řízení ss motorů pracuje s účinníkem  $\cos\varphi = 0,5$  i horším, avšak střídač s neřízeným usměrňovačem na vstupu a ss napětiovým meziobvodem s šířkovou pulzní regulací napětí pro řízení otáček asynchronního motoru může pracovat s účinníkem  $\cos\varphi = 0,95$  apod. Pro řízený polovodičový usměrňovač pro regulaci ss motorů platí, že účinník se zhoršuje s hloubkou regulace otáček a nepřímo s velikostí ss napětí naprázdno  $U_{d0}$  při úhlu řízení tyristorů  $\alpha = 0$ . [ 8 ]

### 2.3.6 Ostatní spotřebiče jalového výkonu

Jedná se zejména o výbojková a zářivková svítidla, svařovací transformátory navíc s rychle se měnícím odebíraným jalovým výkonem (svařovací lisy, bodovky), reaktory pro omezení zkratových proudů apod. [ 8 ]

### 2.3.7 Venkovní a kabelová vedení

Vedení spotřebují poměrně málo jalové energie, a to vlivem své indukčnosti a kapacity. U venkovních vedení (pod 200 km) převládá indukční složka a kapacitní je zanedbána. U kabelových vedení převládá naopak vliv kapacity (kapacita roste čím větší je průřez žil). Tato vlastnost kabelových sítí může vest při nesprávně provozovaných kompenzačních zařízeních (tj. trvale překompenzovaných) k nebezpečnému nárůstu kapacitního výkonu hlavně v sítích VN. [ 8 ]

## 2.4 Důsledky odběru výkonu se špatným účinníkem

Následkem špatného účinníku je v elektrizační soustavě nutný přenos činného a jalového výkonu (obecně i výkonu deformačního, pulzačního a skrytého), tj. tzv. zdánlivého výkonu, který je větší než potřebný výkon činný. [ 8 ]

**Tento zdánlivý výkon ve svém důsledku způsobuje:**

- **zvýšení nákladů na prvky elektrizační soustavy**, tj. vedení, transformátory, elektrické rozvodny apod. musí být dimenzovány na velikost zdánlivého proudu, který je  $1/\cos \varphi$  krát větší než proud činný [ 8 ]
- **snížení využití generátorů** – jalový induktivní proud odběru zeslabuje buzení generátoru a je třeba zvýšit budící proud, tím dochází ke zvětšení tepelných ztrát v rotoru a budiči a ke zvýšení zkratového proudu při poruše. Opačná situace vzniká při překompenzování v odlehčené síti, neboť značně odbuzený stroj by mohl vypadnout ze synchronismu a způsobit zvýšení horní přípustné hodnoty napětí; proto je nutné pracovat s induktivním účinníkem  $\cos \varphi = 0,95$  až  $0,98$ . [ 8 ]
- **zvýšení tepelných ztrát** v ohmických odporech prvků el. soustavy, které jsou závislé na druhé mocnině zdánlivého proudu, tj. rostou s druhou mocninou převrácené hodnoty účinníku (např. při  $\cos \varphi = 0,7$  jsou dvakrát větší než při  $\cos \varphi = 1$ ) [ 8 ]
- **zvětšení úbytku napětí v síti** způsobený zdánlivým proudem  $I$  s fázovým posuvem  $\varphi$  na impedanci sítě, tj. na činném odporu  $R$  a reaktanci  $X$  je  $\Delta U = RI \cos \varphi + XI \sin \varphi$  [ 8 ]
- **zhoršení zkratových poměrů v síti** způsobené zvýšením buzení generátorů, tj. dochází ke zvětšení nárazového zkratového proudu a nesymetrické ss složky a v důsledku toho ke zhoršení vypínacích podmínek a namáhání vypínačů. [ 8 ]

## 2.5 Způsoby zlepšování účinníku

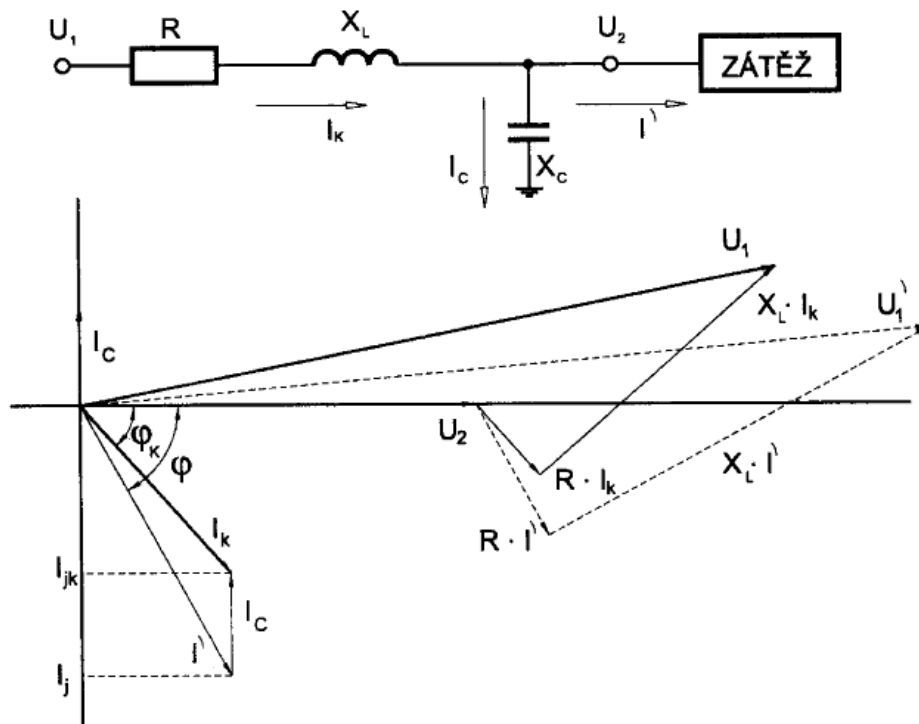
Zlepšování účinníku, tzn. zmenšení jalového induktivního odběru, lze provést dvojitým způsobem:

- **správným návrhem a provozováním zdrojů, přenosové soustavy a spotřebičů**, tzn. správné dimenzování transformátorů, správná volba jmen. napětí, využití synchronních motorů a zejména správné dimenzování asynchronních motorů a omezení jejich chodu naprázdno, odstranění nevhodných regulačních pohonů.

- **použitím kompenzačních zařízení**, které jsou zdrojem jalového kapacitního výkonu. [ 8 ]

## 2.6 Matematický model kompenzace

Jako matematický model kompenzace jalového výkonu použijeme střídavou síť s paralelním kondenzátorem. Na tomto zapojení a k němu příslušnému fázorovému diagramu je jasně vidět, že po připojení kondenzátoru dojde ke změně fázoru proudu (z  $I'$  na velikost  $I_K$ ). [ 4 ]



Obr. 2.5 Střídavá síť s paralelním kondenzátorem [ 4 ]

Celkový proud vedení se potom změní na

$$\bar{I}_K = \bar{I}' + \bar{I}_C$$

Za předpokladu, že činný výkon zůstane konstantní, se změní po připojení kondenzátoru fázový posuv z hodnoty  $\varphi$  na hodnotu  $\varphi_K$  a poměr jalových složek proudů  $I_{JK}$  a  $I_j$  bude stejný jako tangenty příslušných úhlů. [ 4 ]

$$\frac{I_{JK}}{I_j} = \frac{\operatorname{tg} \varphi_K}{\operatorname{tg} \varphi} = k$$

kde k budeme nazývat koeficientem kompenzace.

Tzv. stupeň kompenzace obdržíme, odečteme-li koeficient kompenzace od jedné.

$$k_p = 1 - k = \frac{I_j - I_{JK}}{I_j} = \frac{I_C}{I_j} = \frac{\operatorname{tg} \varphi - \operatorname{tg} \varphi_K}{\operatorname{tg} \varphi}$$

Výkon kondenzátoru potřebný ke změně fázového posuvu z hodnoty  $\varphi$  na hodnotu  $\varphi_K$ :

$$Q_C = U \cdot I_C = U_2 \cdot \omega \cdot C = P \cdot (\operatorname{tg} \varphi - \operatorname{tg} \varphi_K)$$

Ztráty ušetřené kompenzací:

$$\Delta P_{u\check{s}} = \Delta P - \Delta P_K = \frac{R}{U_S^2} * [(P^2 + Q^2) - P^2 + (Q - Q_C)^2] = \frac{R}{U_S^2} * [Q_C * (2Q - Q_C)]$$

Snížení ztrát v procentech ztrát původních v důsledku vykompenzování odběru s původním účinníkem  $\cos \varphi$  na  $\cos \varphi_K$ , čili ztráty ušetřené kompenzací lze také vypočítat jako:

$$\Delta P_{u\check{s}\%} = (\Delta P - \Delta P_K) * \frac{100}{\Delta P} = \left( \frac{1}{\cos^2 \varphi} - \frac{1}{\cos^2 \varphi_K} \right) * \cos^2 \varphi * 100 = 100 * \left( 1 - \frac{\cos^2 \varphi}{\cos^2 \varphi_K} \right)$$

A stejně tak i procentní snížení velikosti úbytku napětí oproti stavu před kompenzací:

$$\Delta U_{\%} = 100 * \left( 1 - \frac{\cos \varphi}{\cos \varphi_K} \right) \quad [4] [9] [10]$$

## **2.7 Rozdělení kompenzace z hlediska připojení do sítě**

### **2.7.1 Individuální kompenzace**

Kompenzační zařízení je v tomto případě připojeno na svorky spotřebiče nebo v jeho těsné blízkosti. Od jalového výkonu je odlehčena celá elektrizační soustava od zdroje až po spotřebič. Úspory ztrát jsou nejvyšší, avšak využití kompenzačního prostředku je závislé na provozu kompenzovaného zařízení. Používá se např. pro kompenzaci magnetizačního proudu asynchronního motoru a transformátorů, kompenzace zářivkových a výbojkových svítidel.

[ 4 ]

### **2.7.2 Skupinová kompenzace**

Kompenzační zařízení je připojeno na přípojnicích rozvaděče pro skupinu spotřebičů. Např. je to kompenzace na hlavních rozvaděčích vn/nn v rozvodech průmyslových podniků. V tomto případě je odlehčen úsek vedení od tohoto rozvaděče ke zdroji. Vzhledem k soudobosti spotřebičů vychází kompenzační výkon menší a je nutná jeho regulace. [ 4 ]

### **2.7.3 Centrální kompenzace**

Centrální, pokud je kompenzace připojena na přípojnice vstupní trafostanice podniku. Vzhledem k soudobosti chodu spotřebičů opět klesá potřebný kompenzační výkon. Rovněž je nutná regulace a většinou je třeba řešit kompenzaci na úrovni vysokého napětí, což představuje vyšší náklady. [ 4 ]

### **2.7.4 Kombinovaná kompenzace**

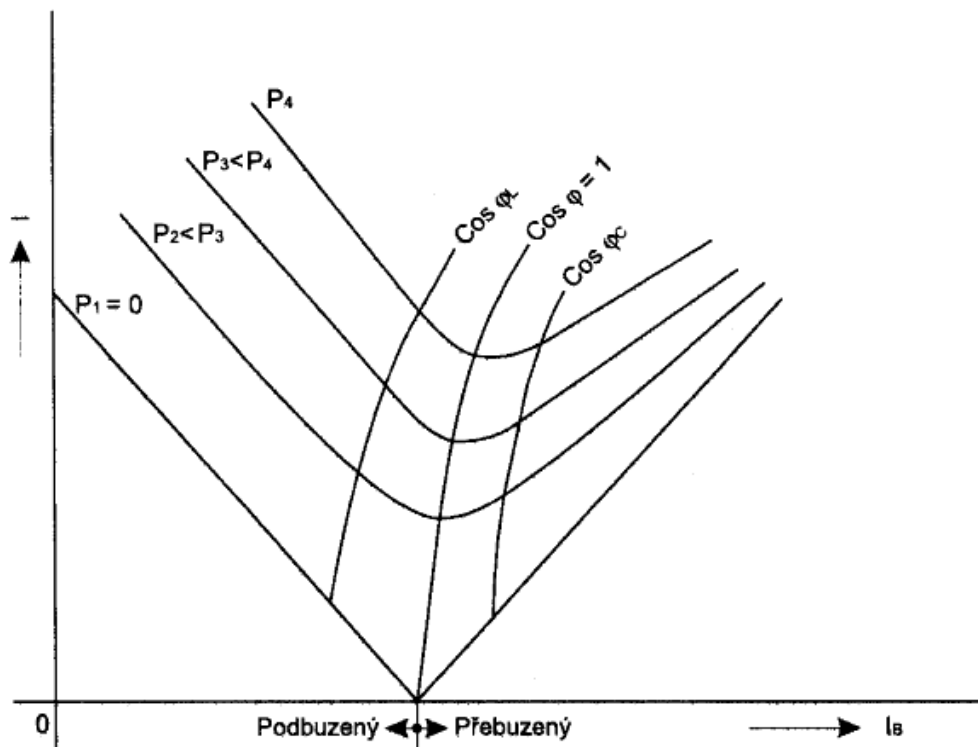
Kombinovaná kompenzace je logickou kombinací předchozích variant. Ve skutečnosti bývá poměrně dost rozšířená, zejména v rozsáhlých průmyslových sítích. [ 4 ]

## 2.8 Technické prostředky pro kompenzaci jalového výkonu

### 2.8.1 Rotační kompenzační zařízení

Mezi rotační kompenzační zařízení patří synchronní kompenzátory a synchronní motory. Synchronní elektrický stroj se vyznačuje zejména tím, že se mu magnetizační energie dodává samostatným budícím vinutím napájeným ze zdroje stejnosměrného proudu.

Synchronní elektromotory se používají v aplikacích, kde lze očekávat poměrně stabilní zátěžný moment, tedy např. pro pohony čerpadel, kompresorů, ventilátorů, rotačních pecí apod.. Měníme-li velikost budícího proudu při stálém napájecím napětí o stálém kmitočtu, je za předpokladu konstantního zátěžného momentu stálý i činný výkon motoru. Změnou velikosti budícího proudu ale můžeme měnit účinník odběru motoru, a to jak v oblasti induktivní, tak i v oblasti kapacitní. Závislost proudu satoru na budícím proudu při stálém výkonu má tvar tzv. V – křivek [ 4 ]



Obr. 2.6 V-křivky synchronního stroje [ 4 ]

K dosažení stálého účinníku při různém zatížení je třeba vhodným způsobem řídit budící proud. Regulátory, jimiž se synchronní motory často osazují, mohou zajistit chod motoru i při změnách činného zatížení buď s konstantním účinníkem, nebo konstantním jalovým výkonem. [ 4 ]

Těchto vlastností synchronních motorů lze velmi účelně využít ke kompenzaci jalového výkonu paralelně připojených spotřebičů. V případě, že je to ekonomicky zdůvodnitelné jsou pro kompenzaci jalového výkonu používány synchronní kompenzátory. Jsou to vlastně synchronní motory pracující naprázdno, tedy s minimálním činným výkonem a relativně s velkým rozsahem regulace jalového výkonu. [ 4 ]

Synchronní stroje sloužící ke kompenzaci jalového výkonu jsou převážně konstruovány pro hladiny vysokého napětí – obvykle pro síť 6 kV. Přestože budící soupravy synchronních strojů tvoří moderní a velmi rychlé řízené usměrňovače, je i ve spojení s rychlými regulátory jalového výkonu odezva na potřebu změny jalového výkonu zatížena jistým zpožděním. Synchronní stroje jsou tedy zcela nevhodné ke kompenzaci spotřebičů, jejichž spotřeba jalového výkonu se dynamicky mění, jako např. u obloukových pecí, dynamicky řízených reverzačních stejnosměrných pohonů apod.. v těchto případech dochází v době, než synchronní stroj díky zpoždění zvýší svůj kompenzační výkon, k nedokompenzování, zatímco ještě po jistou dobu, kdy již potřeba kompenzačního výkonu pominula, dále tento výkon dodává. To má negativní dopad na výsledné kolísání napětí, které na změnách jalového výkonu závisí. [ 4 ]

Vzhledem k vysokým jednotkovým výkonům synchronních strojů (přibližně od 1 do 15 Mvar) a pomalejší regulaci jalového výkonu oproti jiným kompenzačním zařízením se tyto stroje využívají jako centrální kompenzace velkých průmyslových sítí. Připojují se k přípojnícím podružným průmyslových rozvodů 6 kV nebo přes samostatný transformátor 22/6 kV k přípojnícím hlavním rozvodům. [ 4 ]

Kompenzace jalového výkonu pomocí synchronních strojů je v poslední době v útlumu. Provoz synchronních strojů je spojen se spotřebou činné energie, vyššími nároky na údržbu zařízení a v neposlední řadě vyššími nároky na obestavěný prostor a jeho vybavenost oproti kompenzačním zařízením statickým. [ 4 ]



## 2.8.2 Statické kompenzátory

Na rozdíl od rotačních kompenzátorů nejsou statické kompenzátory závislé na dodávce činné energie. V klasickém pojetí jsou tvořeny pasivními kompenzačními prvky, jako jsou výkonové kondenzátory. V pojetí novém to jsou tzv. aktivní filtry. [ 4 ]

### 2.8.2.1 Prosté kondenzátory

Jedním z mnoha typu výkonových kondenzátorů je kondenzátor určený pro zlepšení účinnosti elektrických zařízení na střídavý proud. Je to kondenzátor, jehož použití vyžaduje zabezpečení zejména těchto tří hlavních požadavků:

1. tepelná stabilita při vysokém jalovém výkonu,
2. odolnost proti přepětí,
3. spolehlivost a bezpečnost provozu.

Existují další typy výkonových kondenzátorů, jako vazební, impulsní, rázové, odrušovací, komutační a jiné. U nich se sleduje např. též odolnost proti velkým impulsním proudům, vlastní indukčnost, napěťová stabilita atd.. Zaměřím se na základní vlastnosti výkonových kondenzátorů určených pro kompenzaci jalového výkonu, z nichž hlavní je jalový výkon kondenzátoru při různých způsobech zapojení.

Po připojení na napětí má jednofázový kondenzátor jalový výkon  $Q_C$  podle vztahu:

$$Q_C = U^2 \cdot \omega \cdot C$$

kde

$\omega$ ...úhlová rychlost (pro 50 Hz to je hodnota  $100 \cdot \pi$ ),

$C$ ...kapacita kondenzátoru,

Dále víme, že

$$Q_C = U \cdot I$$

A z toho pak

$$Q_C = \frac{I^2}{\omega \cdot C}$$

kde  $U, I$  efektivní hodnoty napětí a proudu.

Pro trojfázový kondenzátor zapojený do trojúhelníka platí

$$Q_C = U^2 \cdot \omega \cdot 3 \cdot C_D$$

dále

$$Q_C = \sqrt{3} \cdot U \cdot I$$

a z toho pak

$$Q_C = \frac{I^2}{\omega \cdot C_D}$$

Analogicky pro zapojení kondenzátorů do hvězdy platí

$$Q_C = U^2 \cdot \omega \cdot 3 \cdot C_Y$$

dále

$$Q_C = \sqrt{3} \cdot U \cdot I$$

a z toho pak

$$Q_C = \frac{3 \cdot I^2}{\omega \cdot C_Y}$$

Podmínkou pro platnost předchozích výrazů je symetrie trojfázového zapojení, tj. stejné hodnoty všech kondenzátorů. [ 4 ]

Kvalitu kondenzátoru výrazně ovlivňují ztráty. Ztráty sestávají z několika komponent, např. ztráty dielektrika, vnitřních pojistek, vyvíjecích odporů, spojů atd.. Ztráty jsou reprezentovány tangentou ztrátového úhlu kondenzátoru  $\text{tg } \delta$ . Ten udává poměr mezi ekvivalentním sériovým odporem a kapacitní reaktancí kondenzátoru při specifikovaném sinusovém napětí a kmitočtu. Celkové ztráty kondenzátoru můžeme stanovit z rovnice:

$$P_Z = Q_C \cdot \text{tg } \delta$$

Pokud vycházíme ze sinusového průběhu napětí. Tangenta ztrátového úhlu je rozdílná pro různé technologie výroby. Tangenta ztrátového úhlu rovněž závisí na teplotě, a to tak, že roste nejenom s rostoucí teplotou, ale i s teplotou klesající pod 0° C.

Pro neharmonický průběh je třeba uvažovat ztráty pocházející od všech harmonických. Potom pro celkové ztráty kondenzátoru platí:

$$P_S = \sum_{n=1}^{\infty} n \cdot Q_n \cdot \text{tg } \delta_n = 2 \cdot \pi \cdot C \cdot \sum_{n=1}^{\infty} n \cdot U_n^2 \cdot f_n \cdot \text{tg } \delta$$

kde

$n$ ... řád harmonické,

$U_n$  ... napětí harmonické,

$f_n$ ... kmitočet harmonické.

Velký vliv na životnost kondenzátoru má provozní teplota. Nadměrná teplota zrychluje elektrochemickou degradaci dielektrika. Velmi rychlé změny teploty mohou vyvolat degradaci částečnými výboji v dielektriku. Kde není možné zajistit vhodné podmínky chlazení, musí být použity kondenzátory speciální nebo s vyšším jmenovitým napětím.

Další významnou vlastností kondenzátorů je frekvenční závislost jejich impedance. Kapacitní reaktance  $X_C$ , která je jalovou složkou impedance, je dána vztahem:

$$X_C = \frac{1}{\omega * C}$$

kde opět,  $\omega = 2 \cdot \pi \cdot f$ .

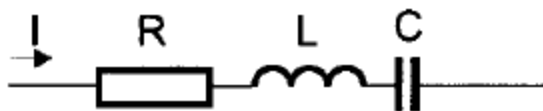
Z toho vyplývá, že se zvyšujícím se kmitočtem reaktance klesá. Připojíme-li tedy kondenzátor do sítě, kde budou kromě zdrojů proudu základního kmitočtu i zdroje harmonických, bude pro ně tento kondenzátor představovat velmi nízkou impedanci. Celková efektivní hodnota proudu protékajícího kondenzátorem vlivem harmonických vzroste a tento proud bude přetěžovat jednak samotný kondenzátor, ale i části sítě mezi zdrojem harmonických a kondenzátorem. [ 4 ]

Prosté kondenzátory lze použít pro kompenzaci jalového výkonu v sítích nízkého i vysokého napětí s malými úrovněmi energetického rušení, tj. v sítích, kde podíl instalovaného výkonu nelineárních spotřebičů nepřesahuje 10 až 15 % výkonu napájecího transformátoru.

[ 4 ]

### 2.8.2.2 Chráněné kompenzační sekce

Základní zapojení kompenzačního obvodu lze redukovat na velmi jednoduchý sériový článek RLC.



Obr. 2.7 Jednoduchý sériový RLC článek [ 4 ]

Činitel ztlumení  $p$  se udává buď v poměrných číslech [ - ], nebo v procentech [ % ]. Je lhostejné, zda kompenzační kondenzátory jsou ve spojení Y nebo D, je však výhodné veškeré

úvahy provádět ve vztahu k napětí fázovému, a tedy počítat s fázovými reaktancemi kondenzátoru ( $X_{cn}$ ), fázovými reaktancemi tlumivek (jedna cívka  $X_{ln}$ ) a fázovým napětím  $U_{fn}$  pro běžné veřejné sítě je  $U_{fn} = 400 \cdot \sqrt{3} = 231 \text{ V}$ . [ 4 ]

Reaktance kompenzačního článku (kondenzátor s příslušnou ochrannou tlumivkou) je při  $f < f_r$ , vždy nižší než výchozí reaktance kondenzátoru. Kompenzační kondenzátory se u nás obvykle optimalizují na kmitočet  $f_n = 50\text{Hz}$  a napětí  $U_{cn} = 440\text{V}$ , čímž se respektuje i zvýšení napětí vlivem reaktance předřazených tlumivek nebo sítě. [ 4 ]

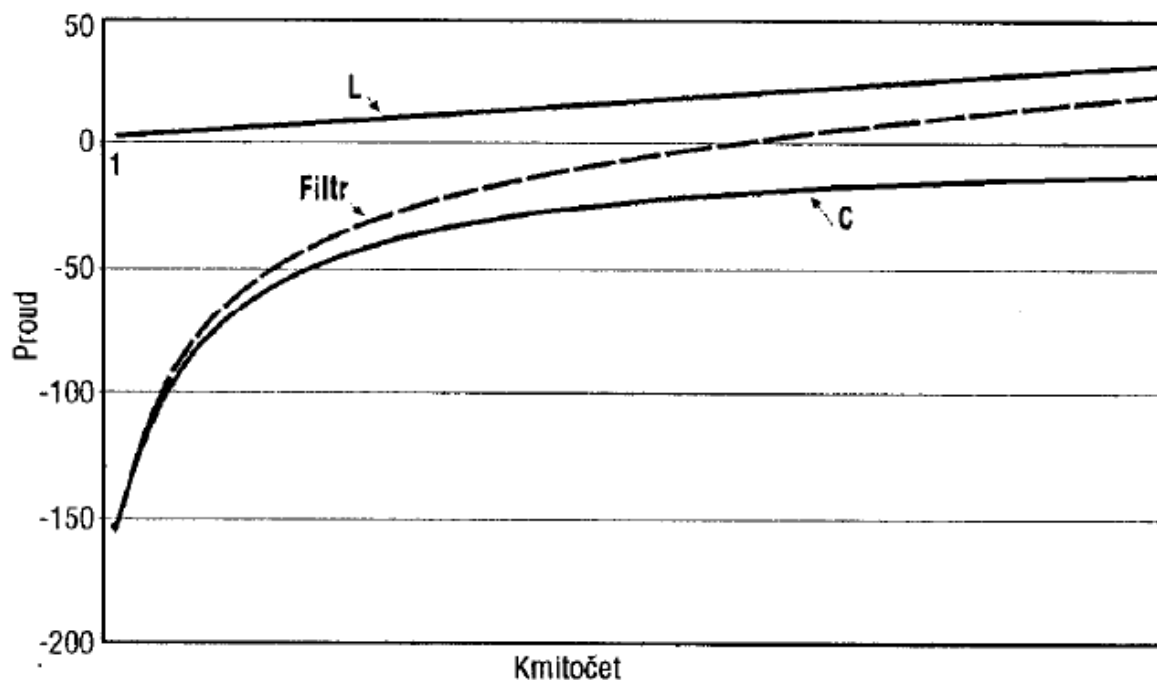
### 2.8.2.3 Kompenzační filtry

Pro potřeby filtrace harmonických proudů a současně pro kompenzaci účinníku se užívají výkonové sériové LC filtry. Takovýto kompenzační filtr tvoří sériový rezonanční obvod RLC (obr.2.5).

Tlumivka  $L$  a kondenzátor  $C$  jsou čistě reaktivní části, zatím co ohmická, a tím i ztrátová složka představuje sériový odpor  $R$ . impedance tohoto obvodu je dána vztahem:

$$Z = R + j \left( \omega * L - \frac{1}{\omega * C} \right)$$

[ 4 ]



Obr. 2.8 Kmitočtové charakteristiky L, C a LC filtru [ 4 ]

Typická kmitočtová charakteristika reaktance tlumivky  $X_L = \omega \cdot L$ , kondenzátoru  $X_C = 1/(\omega \cdot C)$  a výsledného sériového LC obvodu  $X_L + X_C$ , kde průsečík s osou kmitočtu je rezonanční kmitočet filtru, jsou znázorněny na obr. 7. Z něho je zřejmé, že kompenzační filtr se chová pro kmitočty menší než  $\omega_r$  jako kondenzátor (má kapacitní charakter), např. pro 1. Harmonickou kompenzuje jalový výkon. Pro harmonickou, na kterou je naladěn, představuje v ideálním případě zkrat a pro kmitočty větší než  $\omega_r$  se chová kompenzační filtr jako tlumivka (má induktivní charakter). [ 4 ]

Při návrhu kompenzačních filtrů je nutno počítat s proudovým namáháním nejenom od 1. Harmonické, na které se filtr chová jako kompenzátor, ale i s proudem harmonické, na kterou je filtr naladěn.

Kompenzační filtry jsou připojovány do sítí, v nichž 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 harmonické. [ 4 ]

## 2.9 Způsoby řízení kompenzačního výkonu

### 2.9.1 Stupňovité řízení kompenzátory

U stupňovitého řízení výkonů je důležitou otázkou volba počtu a velikostí stupňů. Tato otázka platí jak pro kompenzátory kontaktní, tak pro bezkontaktní na hladinách nízkého a vysokého napětí. Volba počtu stupňů závisí na reálné velikosti jednoho stupně, celkovém potřebném kompenzačním výkonu a na žádané hodnotě vykompenzování, obvykle  $\cos\varphi_0 \geq 0,95$ , nebo-li  $\text{tg}\leq 0,33$ . Pak musí být v ideálním případě a pro stupně se stejným kompenzačním výkonem, splněn vztah:

$$\frac{Q_L - N * Q_{C1}}{P} \leq \text{tg}\varphi_0$$

kde

$Q_L$  jalový induktivní výkon zátěže při činném výkonu  $P$ ,

$Q_{C1}$  jalový výkon jednoho kompenzačního stupně,

$N$  počet stupňů.

Z předchozí nerovnosti je možno určit vztah pro počet stupňů kompenzátoru

$N$ :

$$N \geq \frac{Q_L - P * \text{tg}\varphi_0}{Q_{C1}}$$

[ 4 ]

#### 2.9.1.1 Kontaktní

Regulované kontaktní kompenzátory pracují na principu přímého připínání kondenzátorů, nebo chráněných kompenzačních sekcí, popř. jejich skupin na kompenzovanou síť podle povelů regulátoru jalového výkonu.

Kontaktní kompenzátory s prostými výkonovými kondenzátory se běžně používají v sítích, kde se nevyskytují harmonické složky proudu a kde nejsou kladeny vysoké nároky na rychlost kompenzace. [ 4 ]

Při použití klasických stykačů je jejich velkým nedostatkem možnost vzniku přechodových jevů při nedefinovaném kontaktním připnutí kondenzátoru na síť. Velké proudové rázy mohou dosahovat až třicetnásobku hodnot jmenovitých proudů.

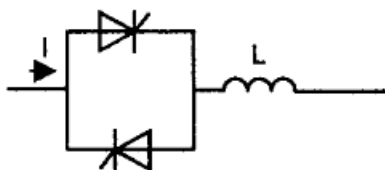
Další velkou nevýhodou kontaktních kompenzátorů způsobenou nesynchronním spínáním je vznik rušivých jevů při sepnutí jako zpětný vliv na napájecí síť. Často způsobují impulsní rušení citlivých elektronických zařízení, měřicí a regulační techniky, elektronických vah, výpočetní techniky atd. Tyto nevýhody jsou částečně eliminovány předřazením ochranných tlumivek a zejména použitím moderních spínacích kontaktních prvků. [ 4 ]

### 2.9.1.2 Bezkontaktní

Tam, kde jsou kladeny vyšší nároky na rychlost změny jalového výkonu, je možno použít místo stykačů bezkontaktní spínače. Současně je nutno použít rychlejší regulátor jalového výkonu. Kondenzátorům se zde zpravidla předřazují ochranné tlumivky. Rychlost regulace závisí na algoritmu, který požívá regulátor jalového výkonu. V praxi je výhodné použít podobný regulační proces jako pro kondenzátory kontaktní. Připínání a odepínání jednotlivých stupňů kompenzátoru je pak podobné, pouze se děje podstatně rychleji. [ 4 ]

### 2.9.2 Plynule řízené-pasivní

Plynulé řízení jalového proudu je možné uskutečnit řízením proudu procházejícího tlumivkou. Použije-li se fázově řízený tyristorový spínač v antiparalelním zapojení, získáme základní zapojení výkonového obvodu.

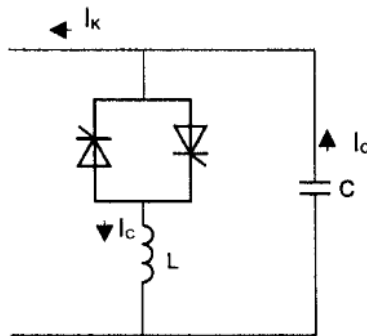


Obr. 2.9 Fázové řízení proudu při indukční zátěži [ 4 ]

Tento jednofázový obvod umožňuje měnit čistě indukční proud od nulové hodnoty až do plné hodnoty dané impedancí tlumivky L.

Chceme-li řídit kapacitní proud, nelze použít fázově řízený spínač a tlumivku pouze nahradit kondenzátorem. Problémem jsou přechodové jevy. [ 4 ]

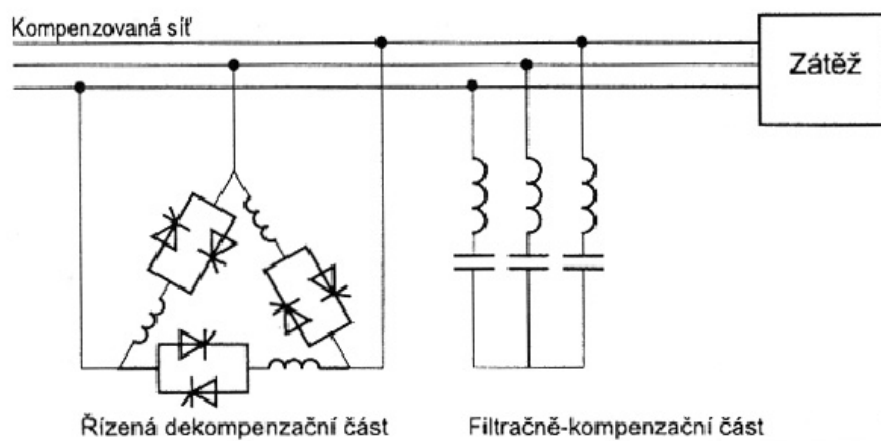
Řešení je však prosté, stačí když se paralelně k původnímu obvodu spínače a tlumivky připojí kondenzátor, jak znázorňuje obrázek.



Obr. 2.10 Zapojení plynule řízeného kompenzátoru [ 4 ]

Je-li nyní  $I_C > I_L$  potom výsledný kompenzační proud je  $I_K = I_C - I_L$  a má charakter kompenzačního proudu měnícího se v rozmezí  $0 \leq I_K \leq I_L$ .

Principiální zapojení výkonového obvodu trojfázového kompenzátoru s plynule řízeným kompenzačním výkonem na principu dekompenzace je na obr. 2.11. Ze znalosti produkce harmonických proudů dekompenzačního členu je možné řešit zapojení kondenzátorové baterie jako soustavu LC filtrů. [ 4 ]



Obr. 2.11 Princip zapojení plynule řízeného kompenzátoru s dekompenzačním členem [ 4 ]



Ty filtrují komponenty harmonických vlastního kompenzátoru a současně i soustavu, kterou kompenzují. Vhodné je použít v každé fázi kompenzační filtr na 5., 7. a dále na 11. a 13. harmonickou. Dimenzování filtrů a jejich poměrné rozdělení závisí zejména na charakteru kompenzované nelineární zátěže. [ 4 ]

Správné naddimenzování kompenzačního filtru u plynule řízeného kompenzátoru je velice důležité a má rozhodující vliv na funkčnost, spolehlivost a životnost celého kompenzátoru. [ 4 ]

Plynule řízené pasivní kompenzátory se používají tam, kde dochází k velmi rychlé změně kompenzačního výkonu, např. u bodových svářecích automatů, řízených pohonů, u odstředivek v cukrovarech, na vysokém napětí u pohonů válcovacích tratí nebo elektrických obloukových pecí atd. [ 4 ]

Díky moderním aktivním filtrům ztrácejí tyto kompenzátory poslední dobou pro oblast nízkého napětí praktický význam. [ 4 ]

### **2.9.3 Plynule řízené-aktivní**

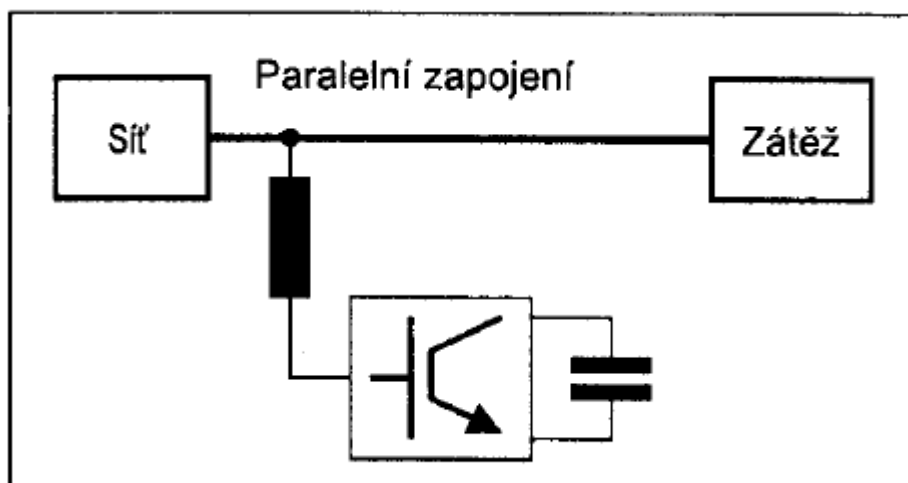
Aktivní filtr lze chápat jako paralelně nebo sériově zapojené generátory řízené vhodným regulačním systémem tak, aby i v dynamických stavech byla zajištěna požadovaná kompenzace nevhodných harmonických složek. Způsobem zapojení aktivního filtru do sítě pak lze vylepšit proud, napětí nebo obojí. Podle těchto požadavků lze aktivní filtry dělit na paralelní (derivační), sériové a kombinované. [ 4 ]

#### **2.9.3.1 Paralelní aktivní filtr**

Paralelní aktivní filtr tvoří řízený generátor proudu zapojený paralelně k zátěži. Je schopen odstranit nežádoucí harmonické proudy tím způsobem, že generuje shodné složky opačného směru a zavádí je do sítě. Výsledný proud je potom zbaven zvolených harmonických. Tímto způsobem se filtruje proud odebíraný ze sítě, a tím se také upravují deformace napětí způsobené zátěží. Takto je možné v každém okamžiku uskutečnit selektivní kompenzaci podle okamžitého výskytu harmonických složek bez nebezpečí, že dojde k nežádoucí rezonanci. [ 4 ]

Generováním jalové složky 1. harmonické proudu je paralelní aktivní filtr schopen provádět velmi rychlou kompenzaci jalového proudu, popřípadě pomocí sousledných a nesousledných složek upravovat nesymetrickou zátěž na symetrickou. Pomocí řídicích algoritmů lze tyto vlastnosti libovolně kombinovat. [ 4 ]

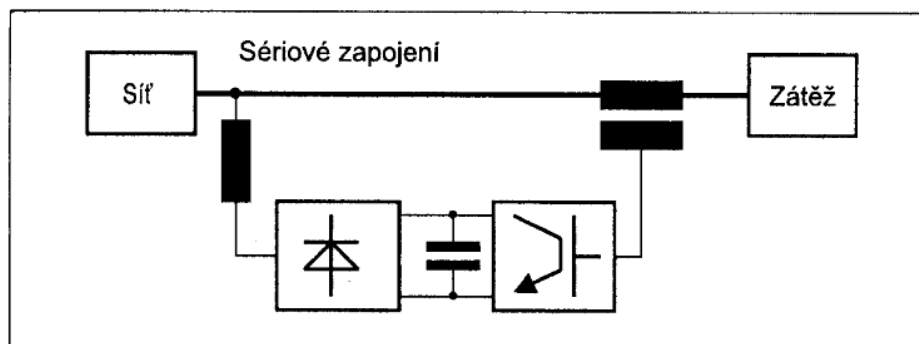
Generátor proudu či napětí může být tvořen můstkovým zapojením polovodičových spínačů (velké IGBT). Jedná se o shodné zapojení s můstkem střídače pro regulovaný pohon, tzn. že ve třífázovém provedení obsahuje šest spínačů a zdroj proudu či napětí. V praxi se však osvědčil typ s napěťovým zdrojem tvořený kondenzátory. Vhodným spínáním tranzistorů můstku lze dosáhnout požadovaného tvaru proudu tekoucího do filtru. Tento proud však obsahuje velké množství harmonických v oblasti spínací frekvence (jednotky až desítky kHz). Proto je nutné zařadit mezi vývody aktivního filtru a napájecí síť pasivní filtr pracující jako dolní propust. Schématické zapojení a jeho připojení do sítě s nelineární zátěží je na obrázku 2.12. [ 4 ]



Obr. 2.12 Paralelní aktivní filtr a jeho připojení do sítě [ 4 ]

### 2.9.3.2 Sériový aktivní filtr

Aktivní sériový filtr je zapojen mezi svorky sítě a svorky spotřebiče a je tvořen generátorem napětí. Tento filtr umožňuje upravit přiváděné napětí na požadovaný tvar. Schématické zapojení a jeho připojení do sítě s nelineární zátěží je na obrázku 2.13. [ 4 ]



Obr. 2.13 Sériový aktivní filtr a jeho připojení do sítě [ 4 ]

Podobně jako upravuje paralelně zapojený filtr proud, je zde upravováno napětí. To znamená, že filtr má schopnost udržovat amplitudu napětí, kompenzovat poklesy i špičky, odstraňovat harmonické, zajišťovat symetrické rozložení napětí, ale také dodávat energii při výpadku napájecího napětí (za podmínky, že je filtr napájen nezávislým zdrojem). [ 4 ]

Z popsaných vlastností obou způsobů zapojení je zřejmé, že derivační filtry upravují vlastnosti sítě směrem od zátěži ke zdroji (vyrovnávají rušivé účinky zátěže). Sériové filtry upravují síť směrem od napájecí strany ke spotřebiči-dodávají zátěži kvalitnější napětí.[ 4 ]

### 2.9.3.3 Kombinované aktivní filtry

Oba způsoby je možné zkombinovat v jeden celek, čímž vznikne systém zajišťující jak vhodné napětí v místě připojení filtru, tak i definovaný odebíraný průběh proudu. [ 4 ]

### 2.9.4 Kombinované

Předchozí uvedené principy kompenzátorů jalového výkonu je samozřejmě možné vhodným zapojením vzájemně kombinovat. V praxi se používá kombinace plynule řízeného pasivního kompenzátoru a stupňového bezkontaktního kompenzátoru. Tato sestava byla dříve u nás vyráběna pod označením PLYCOS+SYNCOS. [ 4 ]

V současné době se nabízí kombinace kompenzátoru stupňového a aktivního filtru. Díky vlastnostem aktivního filtru by bylo možné použít kompenzátor pomalejší kontaktní s chráněnými sekcemi a výkon aktivního filtru použít hlavně pro vykompenzování deformačního výkonu. [ 4 ]

## 2.10 Vliv kompenzačních zařízení na napájecí síť

Vlivem kapacitního charakteru hlavně venkovních sítí VVN a kabelových sítí VN dochází na některém rezonančním kmitočtu ke změně původně indukčního charakteru impedance elektrické sítě základní harmonické na kapacitní. Protože se v síti vyskytují soustředěné kapacity v podobě nehrazených kondenzátorových baterií dochází k rezonanci i v sítích NN, tlumení rezonančního obvodu je menší než u sítí bez soustředěných kapacit a rezonance se většinou posunuje k nižším kmitočtům. [ 8 ]

Harmonické proudy dále zatěžují transformátor, nadřazenou síť a vlastní nehrazené kompenzační zařízení, které bývá dimenzováno na zatížení pouze základní harmonické a může proto dojít k jeho zničení. Dále dochází v uzlu harmonické v okolí rezonančního kmitočtu ke zvýšení harmonických napětí a následně k rušení připojených spotřebičů. Rezonanční kmitočet se bude měnit v závislosti na počtu připnutých kompenzačních stupňů.

Nebezpečnému proudovému přetížení kompenzačních zařízení je nutno předcházet vhodnou konfigurací sítě, například nepřipustit překompenzování a kompenzaci při nízkém činném zatížení. [ 8 ]

Rezonance jsou účinně tlumeny některými spotřebiči, jako jsou žárovky, odpory a hlavně asynchronní motory. Dalším účinným prostředkem pro omezení rezonancí je zatlumení tj. předřazení tlumivky před kondenzátorovou baterií, a to takové velikosti, aby rezonanční kmitočet obvodu byl nižší než rezonanční kmitočet odpovídající reaktanci napájecí sítě a současně mimo některý budící kmitočet.

Jedním z mnoha vlivů jsou také přechodové jevy vznikající při spínání a vypínání kondenzátorových baterií a takzvané samobuzení. [ 8 ]

### **3 Výpočet potřebné kapacity nutné pro kompenzaci MVE Kořensko**

Rozvodna 6 kV je základním článkem elektrárny. Je do ní vyveden výkon obou soustrojí MVE i soustrojí MVE (JETE) a jejich celkový výkon je vyváděn přes transformátor 6/22 kV do místní sítě. Z rozvodny je odebírána energie pro vlastní spotřebu elektrárny do hlavního rozvaděče. Na sběrnici rozvodny je připojen systém kompenzace účinníku a propojení s rozvaděčem ve strojovně MVE (JETE), které slouží k napájení vlastní spotřeby i k vyvádění výkonu soustrojí MVE. [ 11 ]

#### **3.1 Generátory MVE Kořensko**

Poháněnými stroji soustrojí elektrárny jsou dva asynchronní horizontální generátory poháněné přes převodovku Kaplanovou turbínou.

Oba generátory jsou stejné, mají shodné štítkové hodnoty. Proto zde uvádím popis jednoho generátoru.

Generátor je (při pohledu od spojky) levotočivý. Provozní napětí generátoru je 6 000 V.

Jako generátor je použit asynchronní horizontální elektromotor tvaru IM 1001 (dle ČSN 35 0002), proveden je pro normální prostředí s krytím IP 21 (dle ČSN 35 0001). Chlazený je vzduchem otevřeným cirkulačním ventilačním systémem (ICW 37 A 01 dle ČSN 35 0006). Účinník generátoru je upravován systémem kompenzace.

Brzdění soustrojí je mechanickými brzdami.

S převodovkou je generátor spojen zubovou spojkou. Rotor je uložen ve valivých ložiskách ve štítech.

Generátor je umístěn volně stojící na samostatném rámu upevněn kotevními šrouby do podlahy strojovny. Oteplený chladicí vzduch se využívá pro temperování strojovny. [ 11 ]

Generátor: typ	1MNJ 570582 V/12
Jmenovitý činný výkon	1000 kW
Jmenovité napětí	6 300 V
Jmenovitý proud	220 A
Jmenovitý účinník $\cos\varphi$	0,8
Jmenovité otáčky	505 $\text{min}^{-1}$
Moment setrvačnosti	880 $\text{kg}\cdot\text{m}^2$
Maximální výkon	1 900 kW
Spojení fází	Y
Průběžné otáčky	1 460 $\text{min}^{-1}$
Třída izolace	F
Vzduchová mezera	5 mm
Způsob chlazení	Vzduchem
Množství nasávaného vzduchu při jmenovitém zatížení	Asi 3,4 $\text{m}^3/\text{s}$
Oteplení vzduchu při jmenovitém zatížení	Asi 23 °C
Chladič vzduchu	Vodní
Spotřeba chladicí vody	28 $\text{m}^3/\text{h}$
Max. teplota chladicí vody	25 °C

Tab. 3.1 Technické údaje generátoru [ 11 ]

Kostra statoru je jednodílná svařovaná z válcovaného ocelového materiálu, skříňového typu. Kostra je opatřena patkami pro ukotvení do podlahy strojovny čtyřmi šrouby M42x3. Na horní část kostry je připevněna chladicí jednotka.

Vinutí statoru je trojfázové, spojené do hvězdy. Dvouvrstvé vinutí je uloženo a zaklínováno v otevřených drážkách plechů statoru. Čela vinutí jsou proti dynamickým silám vznikajícím při zkratu vyztužena. Vinutí je impregnováno lakem tepelné třídy F. Ze stroje jsou vyvedeny tři vývody fází a společný uzel na svorkovnice umístěné na pravém (vývody) a levém (nulový uzel) boku stroje. [ 11 ]

### 3.1.1 Rotor

Rotor je celosvařované konstrukce. Na kovaný hřídel jsou přímo navařena podélná žebra a kotouč. Aktivní železo rotoru je složeno z nízkoztrátových dynamových plechů. Jho rotoru je slisováno, staženo mezi dvěma ocelovými deskami a zaaretováno. Obdobně jako u statoru je jho rozděleno na bloky vzájemně oddělené ventilačními vložkami tl. 10 mm; takto vzniklé radiální ventilační kanály jsou vůči ventilačním kanálům statoru v axiálním směru přesazeny o polovinu rozteče.

V drážkách plechů magnetického obvodu jsou uloženy neizolované Cu tyče (8 x 40) mm na obou koncích přivařené na Cu kruhy rotorové klece nakrátko. Na obou stranách hvězdy rotoru jsou upevněna lopatková kola radiálních ventilátorů, které vhánějí vzduch do čel statorového vinutí. [ 11 ]

### 3.1.2 Chlazení

Stroj je vybaven vlastní ventilací s otevřeným okruhem chladicího vzduchu, ventilační systém je radiální: Vzduch je nasáván ze strojovny ventilačním účinkem radiálních lopatek ventilátorů umístěných po obou stranách rotorového kola a ofukuje čela statorového vinutí. Další část vzduchu dmychají radiální kanály rotorového jha přes vzduchovou mezeru do kanálů statorového jha. Vzduch, který tak ochlazuje rotorovou klec, paket statoru a čela statorového vinutí, se otvory ve vnitřních stěnách kostry statoru dostává do výfukového prostoru v horní části, kde je umístěn chladič. Oteplený vzduch proudí přes žebra vodního chladiče a ochlazený je vyfukován otvory v krytu chladiče zpět do strojovny. [ 11 ]

### 3.1.3 Výpočet výkonu kondenzátoru

$$P = 1900 \text{ kW}$$

$$\cos\varphi = 0,8$$

$$\operatorname{tg}\varphi = 0,75$$

$$\cos\varphi_K = 0,95$$

$$\operatorname{tg}\varphi_K = 0,32$$

$$Q_C = U \cdot I_C = U_2 \cdot \omega \cdot C = P \cdot (\operatorname{tg} \varphi - \operatorname{tg} \varphi_K)$$

$$Q_C = 1900 \cdot (0,75 - 0,32)$$

$$Q_C = 817 \text{ kVar}$$

## 3.2 Generátor MVE (JETE) Kořensko

Vypouštění odpadních vod z JETE je zaústěno pomocí dvou odpadních řadů DN 700 do stupně Kořensko na řece Vltavě. Protože odpadní vody jsou přiváděny pod vysokým tlakem, je jejich energie využita v malé vodní elektrárně (JETE) Kořensko. V případě odstavení turbíny se uvedou do provozu tlumiče energie s Peltonovými tlumícími dýzami. [ 12 ]

### 3.2.1 Asynchronní generátor

K turbíně je připojen asynchronní generátor Škoda typ 1 MNJ 530532 V/K. Asynchronní generátor je chlazený vodou přiváděnou z tlumícího objektu na jezu Kořensko.

Generátor je horizontální stroj poháněný vodní turbínou.

Štítkové údaje: typ 1 MNJ 530532 V/12, 850 kW, 6300 V, 98 A, 50Hz, 509/1250 ot.min<sup>-1</sup>,  
 $\cos\varphi$  0,81.

- Tvar: IM 1003 dle ČSN 350002 s valivými ložisky ve štítech a jedním kuželovým koncem hřídele s perem.
- Krytí: IP 21 dle ČSN 350001, chráněný před kapající vodou.
- Chlazení: ICW 37 A 01 dle ČSN 350006, s přívodem vzduchu otvory v ložiskových štítech a po průchodu strojem výfuk otepleného vzduchu přes chladiče do okolního prostoru.

Svorkovnice vývodů stroje je umístěna na pravém boku stroje při pohledu na poháněcí čep, svorkovnice nulového uzlu na levém boku stroje. Odporové teploměry pro kontrolu oteplení plechů, vinutí a chlad. vzduchu jsou vyvedeny na svorky umístěné na svorkovnici vývodů stroje. [ 12 ]

### 3.2.1.1 Stator

Kostra statoru je jednodílná, svařovaná, skříňového typu opatřená ve spodní části patkami na ukotvení generátoru a v horní části pro připojení vodních chladičů typu CU/CU A6 - 2,0 W.

Aktivní železo statoru je složeno z nízkoztrátových izotropních plechů pro elektrotechniku. Jho je slisováno a staženo mezi dvěma deskami. Je rozděleno na bloky vzájemně rozdělené ventilačními vložkami. Takto vzniklé radiální kanály slouží k ventilaci a chlazení statoru. Kostra je oboustranně prodloužena, takže tvoří i kryty čel vinutí a je zakončena přírubou pro připevnění ložiskových štítů. [ 12 ]

### 3.2.1.2 Vinutí statoru

Je třífázové, spojené do hvězdy. Je dvouvrstvé, uložené a zaklínované v otevřených drážkách plechů statoru. Čela vinutí jsou vyztužena proti účinkům dynamických sil. Čela navinutého statoru jsou impregnována lakem tepelné třídy F. Ze stroje jsou vyvedeny 3 fázové vývody a společný uzel na svorkovnici, umístěné na bocích statoru. [ 12 ]

### 3.2.1.3 Rotor

Hvězda rotoru je celosvařované konstrukce. Na kovaný hřídel je přímo navařen kotouč a podélná žebra. Aktivní železo rotoru je složeno z nízkoztrátových dynamických plechů pro elektrotechniku.

Jho rotoru je složeno v přípravku, staženo ocelovými deskami a za tepla nasazeno na hvězdu rotoru. Po nasazení je zaaretováno. Jho je rovněž jako u statoru rozděleno na bloky



vzájemně rozdělené ventilačními vložkami. Takto vzniklé radiální kanály, které jsou vůči kanálům na statoru přesazené, slouží k ventilaci a chlazení rotoru. Na obou koncích hvězdy rotoru jsou připevněné radiální ventilátory.

Hřídel je zakončen jedním kuželovým koncem pro nasazení spojky. Spojka je zajištěna speciální kruhovou maticí se 4 otvory průměr 9 pro utahování speciálním klíčem. Matice je z poloviny rozříznuta. Pojištění matice se provede sevřením matice na hřídel šroubem MB.

[ 12 ]

#### **3.2.1.4 Vinutí rotoru**

Vinutí rotoru tvoří měděné neizolované tyče uložené v drážkách rotoru, které jsou na obou koncích svařeny s měděným kruhem. Tím je vytvořena klec nakrátko.

[ 12 ]

### 3.2.1.5 Chlazení stroje

Chlazení generátoru je vzduchové s průtokovou ventilací. Vzduch je nasáván ze strojovny ventilačním účinkem radiálních ventilátorů umístěných na rotoru generátoru a částečně ventilačním účinkem vlastního rotoru. Je nasáván z prostoru ložiskových štítů. Část vzduchu prochází radiálními kanály rotorového jha přes vzduchovou mezeru a kanály statorového jha do kostry. Ostatní vzduch prochází přes čela statorového vinutí, které ochlazuje a otvory ve vnitřních stěnách kostry se dostává do výfukového prostoru statoru. Odtud je tlačěn otvorem v horní části kostry do chladiče, prochází přes žebra vodního chladiče a ochlazený je vyfukován otvory v krytu chladičů do prostoru strojovny. Množství vyfukovaného a opět nasávaného vzduchu při jmenovitém zatížení stroje je cca  $1,6 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ . Oteplení vzduchu je kolem  $25 \text{ }^\circ\text{C}$ . [ 12 ]

### 3.2.2 Výpočet výkonu kondenzátoru

$$P = 850 \text{ kW}$$

$$\cos\varphi = 0,81$$

$$\operatorname{tg}\varphi = 0,72$$

$$\cos\varphi_K = 0,95$$

$$\operatorname{tg}\varphi_K = 0,32$$

$$Q_C = U \cdot I_C = U_2 \cdot \omega \cdot C = P \cdot (\operatorname{tg} \varphi - \operatorname{tg} \varphi_K)$$

$$Q_C = 850 \cdot (0,72 - 0,32)$$

$$Q_C = 340 \text{ kVar}$$

## 3.3 Pomocné pohony

### 3.3.1 Čerpací agregát regulátoru

Čerpací agregát regulátoru slouží k akumulaci takového množství oleje a regulační práce, aby regulace turbíny mohla bezpečně vykonávat svou funkci. ČAR dodává tlakový olej pro systém regulace oběžného kola (pro ovládání servomotoru OK) a pro ostatní hydraulické pohony na turbíně vč. systému brzd. V ČAR je akumulován dostatek tlakové energie pro nouzové zavření turbíny i při ztrátě vlastní spotřeby pro pohon čerpadla ČAR.

elektromotor: typ	26MEX03AP001-M01	4 AP 132 M-4
výkon		7,5 kW
otáčky		1450 min <sup>-1</sup>
napětí / proud		380 V / 15 A
hmotnost		86 kg
Jmenovitý účinník cosφ		0,86

Tab. 3.2 Technické údaje ČAR

[ 11 ]

### 3.3.1.1 Výpočet výkonu kondenzátoru

$$P = 7,5 \text{ kW}$$

$$\cos\varphi = 0,86$$

$$\cos\varphi_K = 0,95$$

$$Q_C = 7,5 \cdot (0,59 - 0,32)$$

$$Q_C = 2,025 \text{ kVar}$$

### 3.3.2 Čerpadlové soustrojí chladicí vody

Systém chladicí vody VLT 26PAB02 dodává vodu do radiálního kluzného vodícího ložiska turbíny 26MED20. Pánev ložiska je vyrobena z plastické hmoty vyžadující pro spolehlivý provoz dodávku dostatečného množství vody, která působí jako mazivo a současně ložisko chladí. Voda musí být zbavena mechanických nečistot.

elektromotor: typ	26PAB02AP011-M01	4 AP 132M-2
provedení		asynchronní, horizontální, patkový
výkon		10 kW
napětí		Δ380 V
proud		20,7 A
otáčky		2940 min <sup>-1</sup>
hmotnost		86 kg
Jmenovitý účinník cosφ		0,85

Tab. 3.3 Technické údaje čerpadlových soustrojí chladicí vody VLT

[ 11 ]

elektromotor: typ	26PAB03AP011-M01	4 AP 112M-2S
provedení		asynchronní, horizontální, patkový
výkon		4 kW
napětí		$\Delta 380$ V
proud		8,7 A
otáčky		2900 min <sup>-1</sup>
hmotnost		41 kg
Jmenovitý účinník cos $\phi$		0,85

Tab. 3.4 Technické údaje čerpadlových soustrojí chladicí vody soustrojí

[ 11 ]

### 3.3.2.1 Výpočet výkonu kondenzátoru

$$P = 10 \text{ kW}$$

$$P = 4 \text{ kW}$$

$$\cos\phi = 0,85$$

$$\cos\phi = 0,85$$

$$\cos\phi_K = 0,95$$

$$\cos\phi_K = 0,95$$

$$Q_C = 10 \cdot (0,62 - 0,32)$$

$$Q_C = 4 \cdot (0,62 - 0,32)$$

$$Q_C = 3 \text{ kVar}$$

$$Q_C = 1,2 \text{ kVar}$$

### 3.3.3 Čerpadlové soustrojí převodovky

Převodovka má vlastní kompletní olejové hospodářství se zdvojenými mazacími čerpadly (jedno čerpadlo rezervní), chladičem a filtrem oleje, rozvodným potrubím a přístroji pro kontrolu funkce. Olejové hospodářství převodovky má dva samostatné okruhy: okruh chlazení a okruh filtrace.

elektromotor: typ	26MEK11AP0*1-M01	4 AP 100L-4
provedení		asynchronní, horizontální, přírubový
výkon		3 kW
napětí		$\Delta 380$ V / 220 V
proud		6,7 A / 11,6 A
otáčky		1490 min <sup>-1</sup>
hmotnost		25 kg
Jmenovitý účinník cos $\phi$		0,82

Tab. 3.5 Technické údaje čerpadlových soustrojí převodovky

[ 11 ]

### 3.3.3.1 Výpočet výkonu kondenzátoru

$$P = 3 \text{ kW}$$

$$\cos\varphi = 0,82$$

$$\cos\varphi_K = 0,95$$

$$Q_C = 3 \cdot (0,69 - 0,32)$$

$$Q_C = 1,11 \text{ kVar}$$

### 3.3.4 Čerpadlové soustrojí odlučovače

Čerpadlové soustrojí sestává z jednostupňového odstředivého čerpadla spojeného pevnou spojkou s přírubovým asynchronním elektromotorem. Soustrojí je uloženo na základovém plechu nad posledním oddílem odlučovače, ze kterého je vyvedeno sací potrubí čerpadla. Výtlačné potrubí osazené zpětnou klapkou a ručním uzávěrem (trvale otevřeným) je zavedeno do výtlačného potrubí čerpadel PV, které je napojeno na společné potrubí vyčerpávání vody z elektrárny s vývodem do spodní vody.

elektromotor. typ	4 AP 80-2
výkon	1,1 kW
napětí	380/220 V
proud	2,8/4,5 A
otáčky	2840 min <sup>-1</sup>
Jmenovitý účinník $\cos\varphi$	0,82

Tab. 3.6 Technické údaje čerpadlového soustrojí odlučovače

[ 11 ]

#### 3.3.4.1 Výpočet výkonu kondenzátoru

$$P = 1,1 \text{ kW}$$

$$\cos\varphi = 0,82$$

$$\cos\varphi_K = 0,95$$

$$Q_C = 1,1 \cdot (0,69 - 0,32)$$

$$Q_C = 0,407 \text{ kVar}$$

### 3.3.5 Čerpadlové soustrojí hydraulického obvodu

System slouží jak k vyčerpávání hydraulických obvodů soustrojí po zahrazení, tak k naplnění jednotlivé savky před jejím vyhrazením.

Zařízení pro vyčerpání hydraulického obvodu sestává z čerpadel umístěných ve společné jímce, z výzbroje jímky, elektrodového zařízení snímání hladin, z propojovacího a výtlačného potrubí včetně příslušných armatur a z vypouštěcího potrubí ze vtokových kusů a savek.

elektromotor. typ	1 M 3011
výkon	11 kW
napětí	380 V
proud	24,5 A
otáčky	980 min <sup>-1</sup>
hmotnost	140 kg
Jmenovitý účinník cosφ	0,87

Tab. 3.7 Technické údaje čerpadlových soustrojí studny savek

[ 11 ]

#### 3.3.5.1 Výpočet výkonu kondenzátoru

$$P = 11 \text{ kW}$$

$$\cos\varphi = 0,87$$

$$\cos\varphi_K = 0,95$$

$$Q_C = 11 \cdot (0,56 - 0,32)$$

$$Q_C = 2,64 \text{ kVar}$$

### 3.3.6 Čerpací agregát RZK

Zdrojem tlakového oleje pro otevírání RZK je čerpací agregát sestávající z čerpadlového soustrojí, nádrže a hydraulických prvků a obvodů ovládní servomotoru RZK. Jako ovládací médium se používá nízkotuhnoucí olej.

elektromotor: typ	26LPB40AP001-M01	4 AP 132 M-4
výkon		7,5 kW
napětí		3 x 380 V
otáčky		1450 min <sup>-1</sup>
Jmenovitý účinník cosφ		0,86

Tab. 3.8 Technické údaje ČARZK

[ 11 ]

### 3.3.6.1 Výpočet výkonu kondenzátoru

$$P = 7,5 \text{ kW}$$

$$\cos\varphi = 0,86$$

$$\cos\varphi_K = 0,95$$

$$Q_C = 7,5 \cdot (0,59 - 0,32)$$

$$Q_C = 2,025 \text{ kVar}$$

### 3.3.7 Kompresorová soustrojí

Stlačený vzduch dodávají dvě kompresorová soustrojí představovaná pojízdnými automatickými kompresorovými stanicemi.

elektromotor: typ	4AP 100L-4A
výkon	3 kW
napětí	380/220 V
proud	6,7/11 A
otáčky	1490 min <sup>-1</sup>
hmotnost	25 kg
Jmenovitý účinník cosφ	0,84

Tab. 3.9 Technické údaje kompresorových soustrojí

[ 11 ]

### 3.3.7.1 Výpočet výkonu kondenzátoru

$$P = 3 \text{ kW}$$

$$\cos\varphi = 0,84$$

$$\cos\varphi_K = 0,95$$

$$Q_C = 3 \cdot (0,64 - 0,32)$$

$$Q_C = 0,96 \text{ kVar}$$

### 3.4 Výpočet celkového výkonu kondenzátoru

Celkový potřebný výkon kondenzátoru pro vykompenzování obou soustrojí i s jejich pomocnými pohony a Peltonovy turbíny dostaneme součtem všech výkonů kondenzátorů, které jsou potřeba ke kompenzaci jednotlivých zařízení.

Potřebný výkon kondenzátoru daný výpočtem:

$$Q_C = 1996,127 \text{ kVar}$$

Potřebný výkon kondenzátoru po zaokrouhlení:

$$Q_C = 2000 \text{ kVar}$$

Potřebný výkon kondenzátoru s uvažovanou rezervou 100kVar

$Q_C = 2100 \text{ kVar}$
---------------------------



## 4 Příspěvky asynchronních generátorů a pomocných pohonů

### 4.1 Generátory

Vzhledem k níže uvedeným podmínkám provozu strojů na MVE Kořensko je nutno při výpočtu výkonu kondenzátorů potřebných pro kompenzaci vycházet z maximálních výkonů strojů. Tyto výše vypočtené hodnoty jsou proto dostačující ke kompenzaci špatného účinníku, neboť při běžném provozu, stroje pracují s maximálním výkonem dle průtoku řeky Vltavy cca 30% ročního časového fondu. Dále pak podle sezónního období dle stavu hladiny řeky Vltavy pracuje jen jeden stroj a druhý stroj je odstaven. Tento stav trvá cca 30% ročního časového fondu. Zbýlý časový fond je vyplněn provozem strojů v celkovém pásmu své regulace.

### 4.2 Peltonova turbína

Tato turbína a k ní připojený generátor není v každodenním provozu. Pracuje jen při vypouštění odpadních vod z objektu JETE a využívá tak vysokého tlaku této vody. Vzhledem k provozu dvou bloků JE je využit pouze poloviční výkon této jednotky a tudíž výše vypočtený výkon kondenzátoru je také dostačující.

### 4.3 Pomocné pohony

Z pomocných pohonů jsou v trvalém provozu připojeny tyto motory: čerpací agregát regulátoru, čerpadlové soustrojí chladící vody, čerpadlové soustrojí chladící a mazací vody pro VLT, čerpadlové soustrojí mazání převodovky a kompresorová soustrojí.

Z pomocných pohonů nejsou v trvalém provozu tyto motory: čerpadlové soustrojí studny savek, čerpací agregát RZK a čerpadlové soustrojí odlučovače.

Výše uvedené pomocné pohony, jak pro trvalý provoz, tak i pohony pro krátkodobý provoz byly zahrnuty do výpočtu celkového výkonu kondenzátoru a jejich kompenzace je dostačující.

### 4.4 Transformátor

Do celkové hodnoty výkonu kondenzátoru zasahuje svou indukčností i transformátor vlastní spotřeby. Vzhledem k uvažovaným provozním stavům pomocných pohonů, jež nejsou v trvalém provozu a pracují jen krátkodobě, nebyl tento transformátor zahrnut do výpočtu, ale je součástí uvažované rezervy.

## 5 Návrh vhodných způsobů zapojení kompenzace

### 5.1 Původní způsob kompenzace

Použití asynchronního elektromotoru jako generátoru soustrojí vyžaduje kompenzaci jalového výkonu na výstupu tak, aby účinník generátoru měl požadovanou hodnotu. Regulace  $\cos\varphi$  probíhá automaticky nezávisle na řídicím systému soustrojí.

Systém kompenzace sestává ze dvou kompenzačních rozváděčů soustrojí a společného kompenzačního transformátoru 6/0,4 kV.

V každém kompenzačním rozváděči je baterie šesti kondenzátorů, které jsou postupně připojovány k výstupu. Regulaci řídí regulátor jalového výkonu, jehož všechny funkce jsou řízeny mikroprocesorem. Regulátor neustále měří požadavek jalového výkonu, případně jeho změny, a podle těchto naměřených hodnot optimalizuje spínání kondenzátorů tak, aby byl připojen vždy co možno největší kondenzátorový stupeň. Správně změřit velikost jalového výkonu a vykompenzovat ho je regulátor schopen jak při odběru, tak i při dodávce činného výkonu do sítě. [ 11 ]

Pozn: Tento způsob kompenzace, jež zahrnuje kompenzační zařízení o výkonu 1,2 MVar, je podle výpočtů uvedených v bodě 3. nedostačující.

### 5.2 Individuální

Prvním navrhovaným způsobem kompenzace je kompenzace individuální.

Při této kompenzaci navrhuji připojit k jednotlivým spotřebičům samostatné kompenzační zařízení o výkonech dle výrobních možností z vypočtených hodnot v bodě 3 i s uvažovanou výkonnostní rezervou. Pro generátory volím kompenzační zařízení na napěťovou hladinu 6 kV a pro pomocné pohony kompenzační zařízení na napěťovou hladinu 0,4 kV.

### 5.3 Centrální s transformátorem

Druhým navrhovaným způsobem kompenzace je kompenzace centrální s transformátorem, tak jak je tomu u stávající kompenzace.

U tohoto způsobu kompenzace navrhuji doplnit stávající kompenzační rozvaděč o další kondenzátorové baterie na napěťovou hladinu 0,4 kV tak aby pokryly požadovaný kompenzační výkon dle vypočtených hodnot v bodě 3. celkového potřebného výkonu s uvažovanou výkonnostní rezervou.

## 5.4 Centrální bez transformátoru

Třetím navrhovaným způsobem kompenzace je kompenzace centrální bez transformátoru.

U tohoto způsobu kompenzace navrhuji demontovat stávající kompenzační zařízení, tj. kompenzační transformátor i s příslušným kompenzačním rozvaděčem a nahradit jej takovým novým kompenzačním rozvaděčem na napěťovou hladinu 6 kV, aby byl pokryt potřebný kompenzační výkon dle vypočtených hodnot v bodě 3. s uvažovanou výkonnostní rezervou.

## 6 Porovnání navržených variant kompenzace

### 6.1 Individuální

Individuální kompenzace je v tomto případě značně nevýhodná, jak z hlediska ekonomického tak z hlediska prostorového. Je zde zapotřebí mnoho kompenzačních jednotek, neboť musí být u každého motoru připojen na svorkovnici kompenzační kondenzátor. Tím je způsobena velká prostorová náročnost u tohoto typu kompenzace a zabraňuje tak využití velkého prostoru pro jiné účely. Tento typ kompenzace je jednotný a z důvodu členitosti zařízení i neměnný. U individuální kompenzace je jednou z velkých nevýhod i nemožnost účinně řídit kompenzační výkon, tudíž by mohlo dojít i k překompenzování kompenzovaných zařízení.

### 6.2 Centrální s transformátorem

Centrální kompenzace s transformátorem je o něco méně náročná z hlediska ekonomického i prostorového, než je tomu u individuální kompenzace. Jednou z nevýhod této kompenzace je nutnost použití převodního transformátoru z napěťové hladiny 6 kV na napěťovou hladinu 0,4 kV, neboť jsou kompenzační baterie projektovány na napěťovou hladinu 0,4 kV a provozní napětí generátorů je 6 kV. Tento způsob kompenzace je z toho hlediska neefektivní (ztráty na transformátoru) a z hlediska prostoru zabírá převodní transformátor poměrně značnou plochu. Výhodou je však možnost využití plynulé regulace kompenzačního výkonu, z důvodu jednotnosti kapacitních baterií, a odpadá tak riziko překompenzování daných zařízení.

### **6.3 Centrální bez transformátoru**

Centrální kompenzace bez transformátoru je nejméně náročná z hlediska ekonomického i z hlediska prostorového na rozdíl od výše uvedených dvou variant. U toho typu kompenzace je nejmenší zastavěná plocha, kterou zabírá jen samotný kompenzační rozvaděč bez dalšího potřebného přídatného zařízení. Výhodou této kompenzace je jednota kompenzačních kondenzátorových baterií připojených na stejnou hladinu napětí, na které pracují generátory a to 6 kV. Odpadá zde potřeba převodního transformátoru. Tento způsob kompenzace umožňuje automatickou regulaci kompenzačního výkonu dle potřeby sítě, čímž je zamezeno možnému překompenzování daných zařízení.

V porovnání s ostatními návrhy kompenzace MVE Kořensko se tento typ kompenzace jeví jako nejvýhodnější, jak z hlediska ekonomického, prostorového tak i z hlediska měření potřebných veličin a ztrát.

## **7 Závěr**

Z odborné literatury jsem načerpal nejdůležitější informace ohledně teoretických podmínek kompenzace v sítích VN v České republice. V dané práci jsem popsal základní principy kompenzace a její použití v praxi. V mém případě tato aplikace směřovala k malé vodní elektrárně Kořensko, ležící na řece Vltavě.

Ze štítkových hodnot strojů, získaných z místních provozních předpisů elektrárny Kořensko, jsem pomocí výše uvedené teorie, vypočetl potřebné kompenzační výkony k jednotlivým generátorům a pomocným pohonům. Dle výše uvedených výpočtů byl takto stanoven kompenzační výkon kondenzátoru potřebného ke kompenzaci všech těchto zařízení.

Následně z této vypočtené hodnoty byly stanoveny a popsány tři způsoby provedení kompenzace MVE Kořensko. Pro potřeby provozovatele této malé vodní elektrárny se jeví jako nejvhodnější způsob třetí varianta kompenzace, a to centrální na napěťové hladině 6 kV při použití automatické regulace kompenzačního výkonu.

## Seznam použité a citované literatury

- [1] *EMG Zlín, s.r.o.* [online]. 4.3.2010 [cit. 2011-06-23]. EMG Zlín, s.r.o. Dostupné z WWW: <[http://www.emgzlin.cz/menu/kompensace-o\\_kompensaci.html](http://www.emgzlin.cz/menu/kompensace-o_kompensaci.html)>.
- [2] *ČEZ Distribuce* [online]. 2008 [cit. 2011-06-23]. ČEZ a.s. Dostupné z WWW: <[http://www.cezdistribuce.cz/edee/content/file-other/distribuce/energeticka-legislativa/ppds/2009/ppds\\_2009.pdf](http://www.cezdistribuce.cz/edee/content/file-other/distribuce/energeticka-legislativa/ppds/2009/ppds_2009.pdf)>.
- [3] *EMCOS s.r.o.* [online]. 2010 [cit. 2011-06-23]. EMCOS s.r.o. Dostupné z WWW: <[http://www.emcos.cz/pdf/katkomp\\_KE-51-010-2010.pdf](http://www.emcos.cz/pdf/katkomp_KE-51-010-2010.pdf)>.
- [4] Teoretický rozbor kompenzace jalového výkonu - [online]. [cit. 2011-06-23]. Dostupné z WWW: <[http://home.pilsfree.net/fantom/FEL/MR/\\_pred\\_web/10\\_Pred10MR.pdf](http://home.pilsfree.net/fantom/FEL/MR/_pred_web/10_Pred10MR.pdf)>.
- [5] *ELCOM a.s.* [online]. 2011 [cit. 2011-06-23]. ELCOM a.s. Dostupné z WWW: <<http://www.elcom.cz/aplikovana-elektronika/produkty/clanek/441-stelcom.html>>.
- [6] *Závodný elektro* [online]. 2010 [cit. 2011-06-23]. Závodný elektro. Dostupné z WWW: <<http://www.zavodny.cz/index.php?id=23>>.
- [7] *Odborné časopisy* [online]. 2008 [cit. 2011-06-23]. Odborné časopisy. Dostupné z WWW: <<http://www.odbornecasopisy.cz/res/pdf/38682.pdf>>.
- [8] *EMCOS s.r.o.* [online]. 2010 [cit. 2011-06-23]. EMCOS s.r.o. Dostupné z WWW: <<http://www.volny.cz/molnarm/pdf/kompensace.pdf>>.
- [9] MERTLOVÁ, Jiřina; HEJTMÁNKOVÁ, Pavla; TAJTL, Tomáš. *Teorie přenosu a rozvodu elektrické energie*. Plzeň : Západočeská univerzita v Plzni, Univerzitní 8, 30614 Plzeň, 2008. 190 s.
- [10] HODINKA, M; FECKO, Š; NĚMEČEK, F. *Přenos a rozvod elektrické energie*. Praha : SNTL-nakladatelství technické literatury, n.p., 1989. 328 s.
- [11] Místní provozní předpis. *MPP*. 2005, EKO0001, s. 1-149.-Word dokument
- [12] Peltonova turbína Kořensko. 2011, s. 1-7.-Word dokument
- [13] *Calla* [online]. 2008 [cit. 2012-06-06]. Calla. Dostupné z WWW: <[http://calla.ecn.cz/atlas/detail.php?&id=314&kat=3&img\\_id=1778](http://calla.ecn.cz/atlas/detail.php?&id=314&kat=3&img_id=1778)>.

## **Přílohy**

**Příloha 1:** MVE Kořensko – Jezové těleso

**Příloha 2:** MVE Kořensko – Turbíny

**Příloha 3:** MVE Kořensko – Generátory

**Příloha 4:** MVE Kořensko – Převod na generátor

**Příloha 5:** MVE Kořensko – Generátor (JETE)

**Příloha 6:** MVE Kořensko – Olejová regulace (JETE)

**Příloha 7:** MVE Kořensko – Strojní část-Peltonova turbína

**Příloha 8:** MVE Kořensko – jednopólové schéma rozvodny 22 kV a 6 kV  
(viz. přiložený PDF dokument)

**Příloha 1: MVE Kořensko – Jezové těleso**



[13]

**Příloha 2: MVE Kořensko – Turbíny**



[13]



**Příloha 3:** MVE Kořensko – Generátory



[13]

**Příloha 4:** MVE Kořensko – Převod na generátor



[13]

**Příloha 5: MVE Kořensko – Generátor (JETE)**



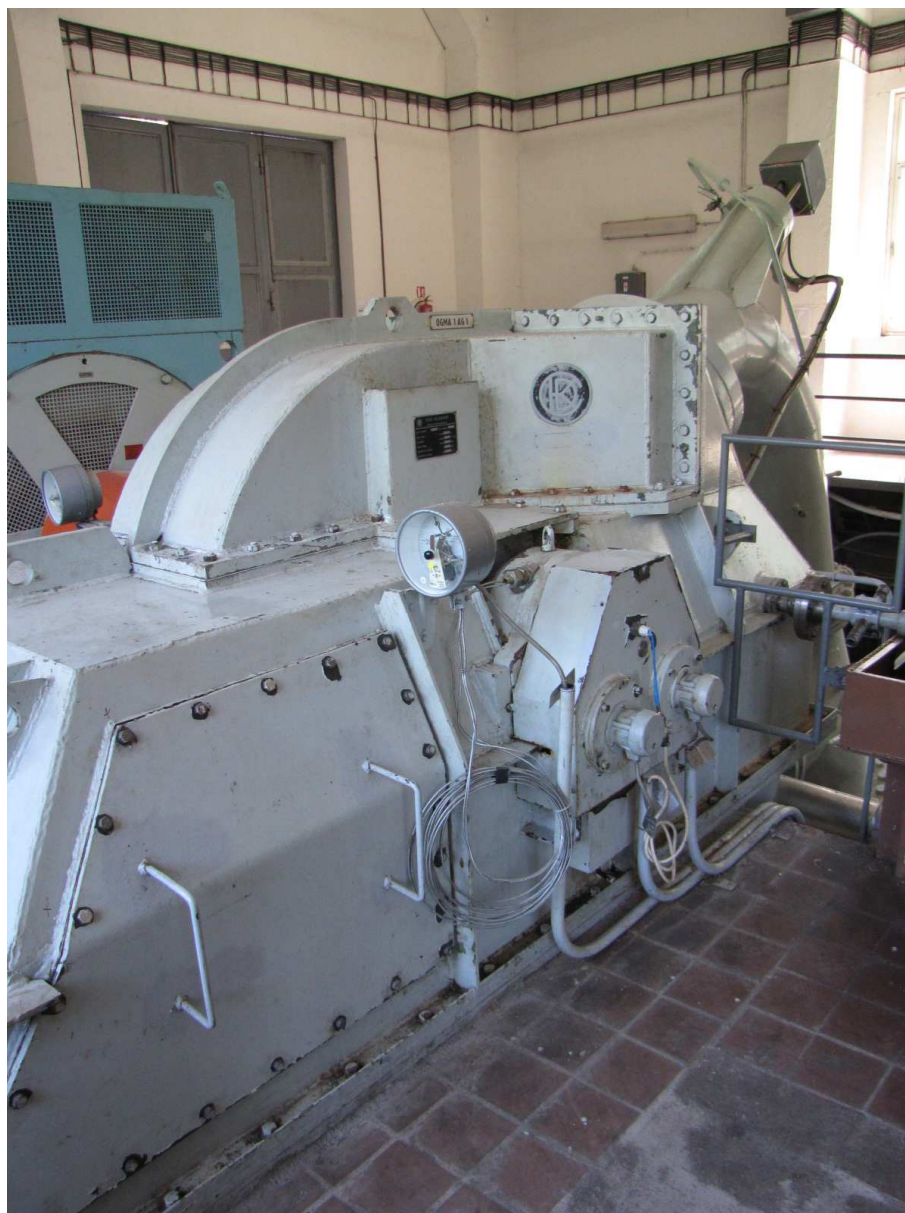
[12]

**Příloha 6: MVE Kořensko – Olejová regulace (JETE)**



[12]

**Príloha 7:** MVE Kořensko – Strojní část-Peltonova turbína



[12]