

ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

Fakulta elektrotechnická

K13115 – Katedra elektroenergetiky



Návrh statické kompenzace v rozvodně přenosové soustavy

Diplomová práce

Bc. Radek Ovesný

Praha 2014

CZECH TECHNICAL UNIVERSITY IN PRAGUE

Faculty of Electrical Engineering

K13115 – Department of Electroenergetics



Desing of Static Compensation in the Transmission System Substation

Master's Thesis

Bc. Radek Ovesný

Prague 2014

České vysoké učení technické v Praze
Fakulta elektrotechnická
katedra elektroenergetiky

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

Student: **Bc. Radek Ovesný**

Studijní program: Elektrotechnika, energetika a management
Obor: Elektroenergetika

Název tématu: **Návrh statické kompenzace v rozvodně přenosové soustavě**

Pokyny pro vypracování:

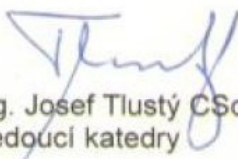
1. Prostudovat a popsat principy návrhu regulovatelné statické kompenzace.
2. S ohledem na rozvojové plány soustavy stanovit potřebu regulovatelné kompenzace v dané lokalitě.
3. Navrhnout statický kompenzátor umístěný v rozvodně přenosové soustavě.

Seznam odborné literatury:


- [1] G. Wakileh - Power System Harmonics: Fundamentals, Analysis and Filter Design, Springer 2001, ISBN 3-540-42238-2
- [2] V. Kús - Vliv polovodičových měničů na napájecí soustavu, BEN 2002, ISBN 80-7300-062-8
- [3] J. Arrillaga, N. Watson - Power System Harmonics, Wiley 2003, ISBN 0-470-85129-5

Vedoucí: Ing. Jan Špetlík, Ph.D.

Platnost zadání: do konce letního semestru 2014/2015


prof. Ing. Josef Tlustý CSc.
vedoucí katedry



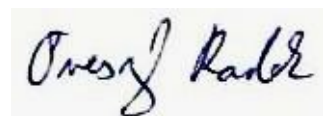

prof. Ing. Pavel Ripka, CSc.
děkan

V Praze dne 6. 2. 2014

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem svou diplomovou práci vypracoval samostatně a použil jsem pouze podklady (literaturu, SW atd.) uvedené v příloženém seznamu.

Nemám závažný důvod proti užití tohoto školního díla ve smyslu § 60 zákona č.121/2000 Sb., o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon).



V Praze dne 4. 5. 2014

.....
podpis

Poděkování

Rád bych na tomto místě poděkoval Ing. Janu Špetlíkovi, Ph.D. za zajímavé a velmi aktuální téma této práce, dobré vedení a poskytnutí praktických informací.

Dále bych chtěl poděkovat panu Ing. Zdeňku Hruškovi, z oddělení Analýzy Přenosové soustavy společnosti ČEPS a.s., za konzultace ohledně současné situace v provozu PS a možných provozních stavů v budoucnu. Také za poskytnutí hodnot napětí používaných spol. ČEPS pro výpočty.

Jako poslední bych chtěl poděkovat Ing. Janu Švecovi, Ph.D. za konzultaci ohledně HDO.

Abstrakt

Práce je zaměřena na problematiku udržování napětí v rozvodně přenosové soustavě Krasíkov pomocí regulace jalového výkonu. Vytvořil jsem analýzu stavu přenosové soustavy uvažovaného pro rok 2023 a vypočítal potřebný výkon kompenzačního zařízení pro udržování napětí na hodnotě 416 kV. Navrhl jsem kompenzační zařízení a vypočítal jeho elektrické parametry. Návrh respektuje stávající české a mezinárodní normy. Zařízení nebude ovlivňovat signály hromadného dálkového ovládání.

Abstract

The thesis is focused on the issue of maintaining voltage in the transmission system substation Krasíkov using the regulation of reactive power. I have analyzed the state of the transmission system proposed for year 2023 and I have calculated the required power range of a compensation device for maintaining the voltage level at 416 kV. I have also designed the compensation device and I have calculated its electrical parameters. The design respects the current Czech and international technical standards. The device will not affect the collective signal for remote control.

Obsah

1 Úvod.....	1
2 Teoretická východiska práce.....	3
2.1 Činný výkon.....	3
2.2 Jalový výkon.....	3
2.3 Zdánlivý výkon.....	5
2.4 Zdroje a spotřebiče Q.....	6
2.4.1 Asynchronní motor.....	6
2.4.2 Synchronní alternátory.....	6
2.4.3 Přenosová vedení ES.....	6
2.5 Výpočet zkratových proudů podle ČSN EN 60909-0 [23].....	13
2.5.1 Počáteční rázový zkratový proud.....	13
2.5.2 Impedance soustavy.....	13
2.5.3 Síťový napáječ.....	14
2.5.4 Transformátor.....	14
2.5.5 Trojvinuťový transformátor.....	14
2.5.6 Elektrárenský blok bez přepínače odboček pod zatížením.....	15
2.6 Kompenzace jalového výkonu Q.....	16
2.6.1 Kompenzační prostředky.....	16
2.6.2 Rotační kompenzátor.....	16
2.6.3 Statické kompenzátory.....	17
2.6.4 Paralelní tlumivky.....	17
2.6.5 Paralelní kondenzátory.....	18
2.6.6 Sériové kondenzátory.....	18
2.6.7 Statické var kompenzátory – SVC [8, 10, 12, 13].....	19
2.6.8 STATCOM.....	22
2.7 Harmonické [6, 19-21].....	25
2.7.1 Analýza.....	25
2.7.2 Filtrace.....	27
3 Analýza soustavy v okolí rozvodny Krasíkov.....	31
3.1 Rozsah uvažované oblasti.....	31
3.2 Výchozí stav PS pro výpočty.....	32
3.3 Zkratové poměry v uzlech sítě.....	35
3.4 Určení indukčního a kapacitního výkonu kompenzačního zařízení.....	40
4 Návrh kompenzačního zařízení.....	45
4.1 Návrh indukčnosti.....	45
4.2 Návrh filtračního řetězce.....	45
4.3 Výpočet THDV a THDI.....	46
4.4 Návrh filtru 5. harmonické.....	47

4.5 Vypočtené hodnoty pro L, C a filtrační řetězce.....	50
4.6 Výpočet parametrů tlumivek.....	53
4.7 Výpočet kapacity manuálně připojované kapacity na hladinu 400 kV.....	53
4.8 Výsledný regulační rozsah SVC.....	54
5 Závěr.....	57
6 Příloha A: Seznam zkratk.....	59
7 Příloha B: Literatura.....	61
8 Příloha C: Seznam obrázků.....	65
9 Příloha D: Seznam tabulek.....	67
10 Příloha E: Parametry lan a stožárů.....	69
11 Příloha F: Schéma rozvržení SVC.....	77

KAPITOLA 1

1 Úvod

Dnešní lidská společnost je životně závislá na energiích. Největší závislost je na elektrické energii. Většinou je možné slyšet, že někde postavíme elektrárnu a bude po problému. Jako příklad lze uvést, dnes již zrušené výběrové řízení na „dostavbu“ jaderné elektrárny Temelín. Uvozovky používám proto, že si myslím, že vyhraje Westinghouse.

Jenže i když zde jsou různé plány na výstavbu nových elektráren v ČR, jako je Temelín, 5. blok v Dukovanech, paroplynová elektrárna Čelákovice od společnosti RWE atd., není zde infrastruktura, kam vyvést vyráběný výkon. Infrastruktura, v podobě přenosové soustavy, zde sice je, ale její kapacita by ve stávající podobě nebyla schopna spolehlivě přenášet vyráběnou elektrickou energii ke spotřebitelům. Právě přenosové a distribuční soustavy jsou kritickou částí elektrizační soustavy a většina lidí si právě toto neuvědomuje. Ano zhruba třetina obyvatel Prahy pocítila minulý rok dopady zkratu a následného požáru transformátoru v rozvodně Chodov, ale tento částečný blackout trval maximálně 3 hodiny. Jenže pokud by nedošlo k posílení soustavy a zároveň by byly připojeny všechny plánované elektrárenské bloky, s velkou pravděpodobností by i při minimálním „přetoku“ z Německa došlo k přetížení soustavy a blackoutu v západní části republiky. V nejhorším možném případě by došlo ke kaskádovému přetížení a celorepublikovému blackoutu. Přenosová soustava musí plnit kritérium N-1, a proto ji bude potřeba posílit.

S každým posílením dochází k zvyšování zkratových proudů, protékajících při poruše, v dané oblasti a tím i ke zvyšování potřeby dodávaného/odebíraného jalového výkonu, pro udržení napětí na vhodných hodnotách, vzhledem ekonomice provozu (ztrátám).

V dnešní době se pro regulaci napětí využívá systém tzv. primárních uzlů, ve kterých jsou udržována na daných hodnotách, které je možné najít v Kodexu přenosové soustavy. Jalový výkon je dodáván/odebírán elektrárnami, které jsou připojené do dané rozvodny. Jenže většina uhelných elektráren se bude v roce 2025 blížit své životnosti a budou odstaveny nebo procházet komplexní rekonstrukcí. Právě tento typ elektráren je nejvíce využíván k regulaci napětí v soustavě. Vhodnou náhradou je vytvoření zařízení, které dokáže tuto službu poskytovat a bude vlastněně provozovatelem přenosové soustavy v ČR.

Kompenzační zařízení pak bude umístěno v areálu rozvodny a bude schopné regulovat napětí v určité části soustavy. V případě této práce bude uvažováno umístění v rozvodně Krasíkov. Právě tato rozvodna má strategický význam, jelikož leží na trase Západ → Východ, která bude kompletně zdvojená. Navíc rozvodna Krasíkov „sousedí“ s pilotním uzlem Týnec, do kterého je vyveden výkon elektrárny Chvaletice, která by v budoucnu mohla omezit provoz.

Rozvodna Týnec je v dnešní době jediným stálým pilotním uzlem regulující napětí v severovýchodní části soustavy. Pokud je v provozu elektrárna Dlouhé Stráně je využívána

i ona k regulaci napětí, právě v rozvodně Krasíkov.

Kompenzační zařízení v Krasíkově by přebralo funkci regulace místo odstavených bloků Chvaletic. Potřebný kompenzační výkon však bude vyšší, než výkon odstavených bloků, kvůli zvyšování přenosových kapacit a odběrů v jednotlivých rozvodnách v blízkém okolí.

Návrh parametrů statické kompenzace, který bude přestaven v této práci by, po důkladné analýze celé přenosové soustavy, mohl být aplikován na další vybrané uzly. Čímž by došlo k vytvoření dostatečných záložních kapacit kompenzace, pro případ většího počtu odstavených uhelných elektráren a zvýšení centralizace výroby elektrické energie v ČR.

Scénář centralizace výroby do oblastí Temelín, Dukovany a severní Čechy, kdy například severní Morava a Slezsko by byla čistě spotřební oblastí, je v budoucnu velmi pravděpodobný. Proto je tato práce velmi aktuální a pokud by v budoucnu došlo k praktické realizaci tohoto konceptu, zvýšila by se tím nejen energetická, ale i ekonomická bezpečnost celé České republiky.

KAPITOLA 2

2 Teoretická východiska práce

2.1 Činný výkon

Elektrický výkon, který se přenáší mezi zdrojem a spotřebičem, kde se nevratně přeměňuje na jiný druh energie (rotační, tepelná) se nazývá činný výkon P . Pro sinusový průběh napětí a proudu je dán vztahem:

$$P_{1f} = U_f \cdot I_f \cdot \cos \varphi \quad [\text{W}]$$

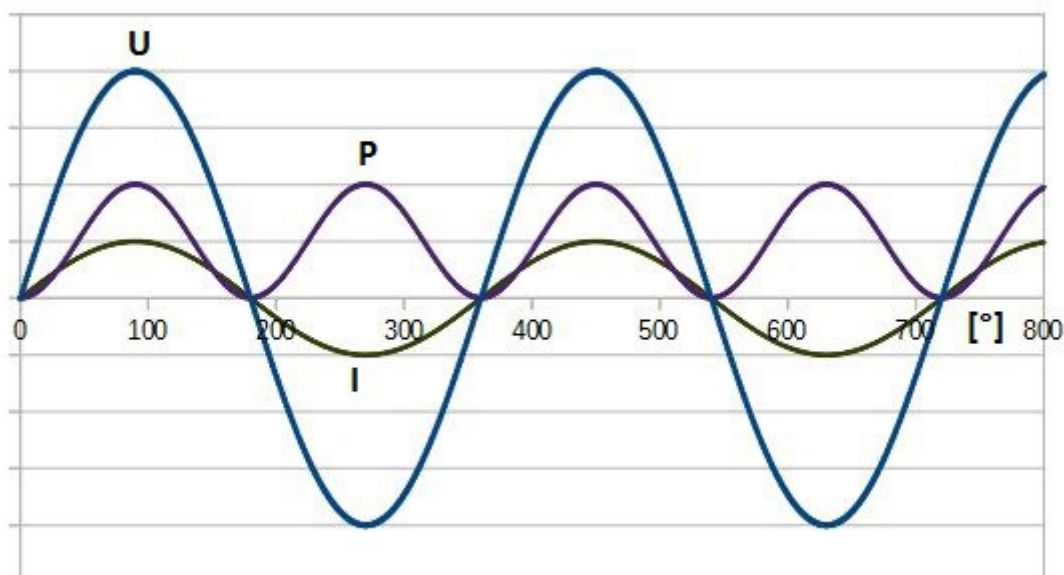
Pro 3-f výkon platí:

$$P_{3f} = P_{fA} + P_{fB} + P_{fC} \quad [\text{W}]$$

Při rovnoměrném zatížení fází:

$$P_{3f} = 3P_{1f} = 3 \cdot U_f \cdot I_f \cdot \cos \varphi \quad [\text{W}]$$

Hodnota $\cos \varphi$ se nazývá účinník, který vyjadřuje fázový posun 1. harmonické napětí a proudu. Pokud je hodnota $\varphi = 0^\circ$ je účinník roven 1. V tomto případě se od zdroje k zátěži přenáší činný výkon a minimální hodnota jalového, který je spotřebován přenosovou infrastrukturou (vedení, transformátory atd.), jedná se tak o čistě odporovou zátěž.



Obr. 1: Průběh napětí, proudu a činného výkonu na ideálním odporu

2.2 Jalový výkon

Čistě odporová zátěž se v praxi moc nevyskytuje, proto dochází k přenosům výkonu, který se přenáší od zdroje k zátěži a zpět. Tento výkon se nazývá jalový Q , jelikož nevykonává

žádnou práci.

Jalový výkon je potřeba k vytvoření elektrického pole u kapacitních zátěží nebo magnetického pole u induktivních zátěží. Je dán vztahem:

$$Q_{1f} = U_f \cdot I_f \cdot \sin \varphi \quad [\text{VAr}]$$

Pro 3-f výkon platí:

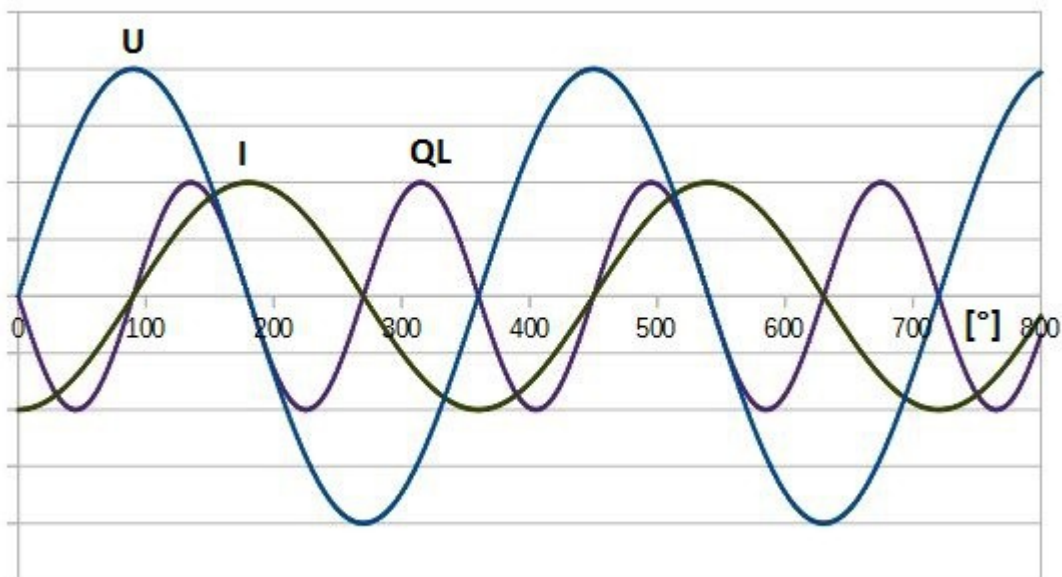
$$Q_{3f} = Q_{fA} + Q_{fB} + Q_{fC} \quad [\text{W}]$$

Při rovnoměrném zatížení fází:

$$Q_{3f} = 3 \cdot U_f \cdot I_f \cdot \sin \varphi \quad [\text{VAr}]$$

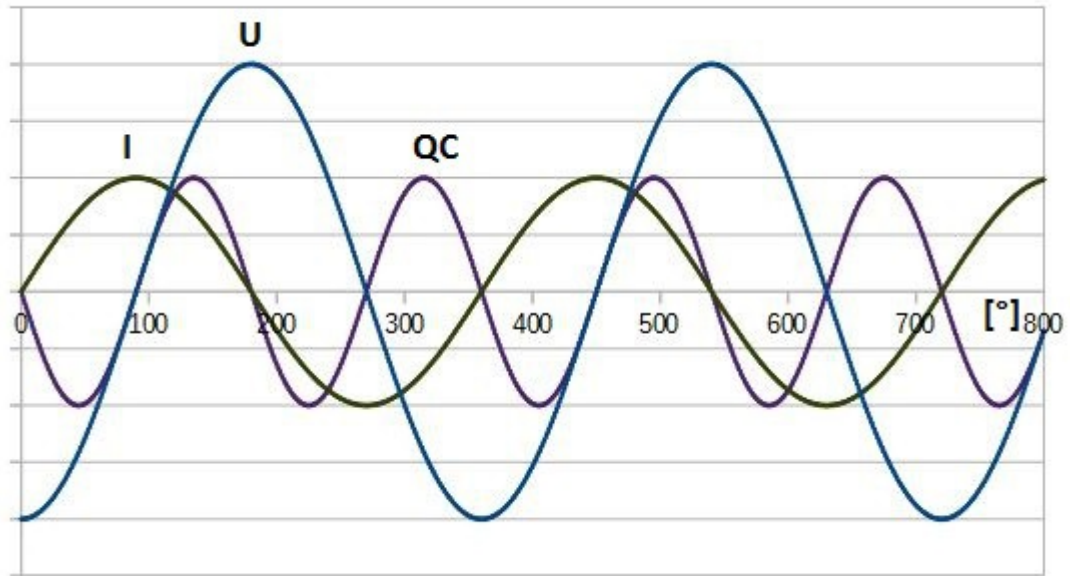
V závislosti na druhu zátěže se jalový výkon rozděluje:

- Induktivní charakter zátěže: Ideální indukčnost fázově posouvá průběh proudu nulou za napětím o $\varphi = 90^\circ$, v praxi se úhel fázového posuvu nachází v rozmezí 0° až 90° . Zátěže v energetických rozvodných sítích jsou převážně indukčního charakteru.



Obr. 2: Průběh napětí, proudu a jalového výkonu na ideální indukčnosti

- Kapacitní charakter: Průběh napětí na ideální kapacitní zátěži se zpožďuje o $\varphi = 90^\circ$. V praxi se hodnota φ pohybuje v rozmezí hodnot 0° až 90° .



Obr. 3: Průběh napětí, proudu a jalového výkonu na ideální kapacitě

Vlivem přenosu jalového výkonu dochází k dodatečnému zatěžování výrobních bloků (zdrojů) a prvků přenosových a distribučních soustav, k přenášenému činnému výkonu.

2.3 Zdánlivý výkon

V důsledku potřeby jalového výkonu, vyžadovaného zátěží, jsou prvky elektrizačních soustav (ES) zatěžovány zdánlivým výkonem S , na který musejí být dimenzovány, který je dán vztahy:

$$S_{1f} = U_f \cdot I_f \quad [\text{VA}]$$

$$S = \sqrt{P^2 + Q^2} \quad [\text{VA}]$$

Pro 3-f výkon platí:

$$S_{3f} = 3S_{1f} = 3 \cdot U_f \cdot I_f \quad [\text{VA}]$$

Zdánlivý výkon způsobuje:

- zvyšuje náklady na jednotlivé prvky elektrizační soustavy, tzn. že vedení, transformátory, rozvodny atd. musejí být projektovány na vyšší zdánlivý výkon místo činného => větší přenášený výkon = větší rozměry, hmotnost a cena transformátoru
- snížení využití generátorů: odběr induktivního jalového proudu zeslabuje buzení alternátoru, proto se musí zvyšovat hodnota budícího proudu, čímž se zároveň zvyšují tepelné ztráty v rotoru a budiči stroje. Současně dochází k zhoršení zkratových poměrů, zvýšení zkratového proudu při případné poruše stroje. Pokud by stroj pracoval do odlehčené sítě (kapacitní charakter sítě) mohlo by při jeho odbuzení

vypadnout ze synchronismu a způsobit překročení maximální dovolené hodnoty napětí [1]

- zvýšení ztrát na odporových prvcích soustavy vlivem zvýšení Jouleových ztrát, které jsou závislé na druhé mocnině proudu

2.4 Zdroje a spotřebiče Q

Jalový výkon je využíván k vytváření elektrických a magnetických polí v součástech elektrizační soustavy. Některé části ES se mohou chovat jako zdroje i spotřebiče jalového výkonu.

2.4.1 Asynchronní motor

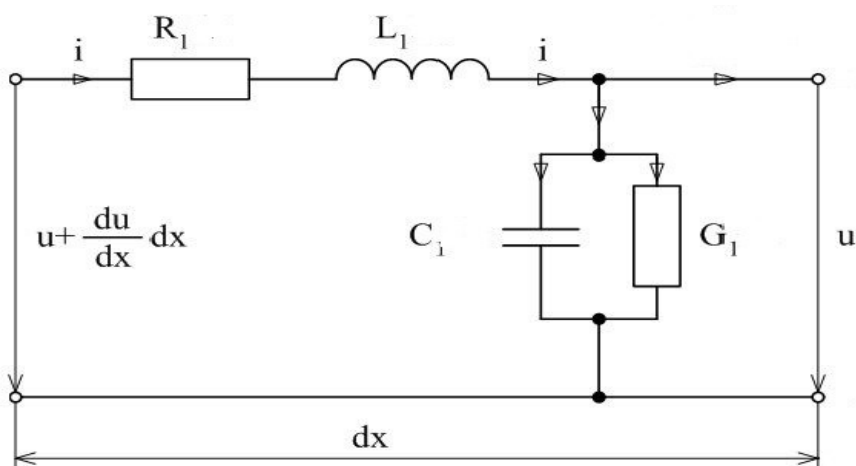
Jedná se o jeden z největších spotřebičů Q induktivního charakteru. Jalový výkon je využíván k vytvoření točivého magnetického pole statoru a zároveň pokrývá rozptylový magnetický tok. Hodnota účinníku, která je uvedena na štítku stroje je vztažena na jmenovitý výkon stroje. Účinník se snižuje se snižujícím se zatížením stroje a tím vzrůstá odběr jalového výkonu.

2.4.2 Synchronní alternátory

K výrobě elektrické energie se převážně využívají synchronní stroje, které do sítě dodávají jak činný, tak jalový výkon. Dodávka jalového výkonu je závislá na buzení stroje.

2.4.3 Přenosová vedení ES

Elektrický výkon je od zdrojů přenášen vedeními, která mají v závislosti na zatížení kapacitní nebo induktivní charakter. Každé vedení se dá charakterizovat jeho elektrickými parametry R , L , C , G .



Obr. 4: Parametry homogenního vedení – R , L , C , G rovnoměrně rozděleny po celé délce [4]

Při výpočtech vedení ES je výhodné počítat s parametry vztaženými na jednotku délky,

tj. odpor R_k [$\Omega \cdot \text{km}^{-1}$], induktivní reaktance X_k [$\Omega \cdot \text{km}^{-1}$], kapacitní suceptance B_k [$\text{S} \cdot \text{km}^{-1}$] a svod G_k [$\text{S} \cdot \text{km}^{-1}$].

Z předchozích hodnot se vypočítá podélná impedance vedení Z_k a příčná admitance vedení Y_k .

$$Z_k = R_k + j \cdot X_k \quad [\Omega \cdot \text{km}^{-1}]$$

$$Y_k = G_k + j \cdot B_k \quad [\text{S} \cdot \text{km}^{-1}]$$

Při výpočtech venkovního vedení velmi vysokého napětí (VVN) a zvláště vysokého napětí (ZVN) se dají zanedbat některé parametry a počítat jen s parametry, které jsou uvedeny tabulce č.1:

napět'ová hladina	uvažované parametry
nn	R_k
vn	R_k, X_k
110 kV	R_k, X_k, B_k
220 kV	X_k, B_k
400 kV	X_k, B_k

Tab. 1: Parametry vedení potřebné pro výpočty pro dané napět'ové hladiny [2]

Induktivní reaktance vedení X_k

Induktivní reaktance se vypočítá podle vztahu:

$$X_k = \omega \cdot L_k = 2 \cdot \pi \cdot f \cdot L_k \quad [\Omega \cdot \text{km}^{-1}; \text{rad}, \text{Hz}, \text{H} \cdot \text{km}^{-1}]$$

f – frekvence sítě

L_k – provozní indukčnost vedení

Odvození provozní indukčnosti jedné fáze trojfázového plně transponovaného vedení je možné vidět v [3] a zde uvádím pouze výsledný vztah:

$$L_k = 0,46 \cdot \log \frac{d_s}{k \cdot r} \quad [\text{mH} \cdot \text{km}^{-1}; \text{m}, -, \text{m}]$$

d_s – střední hodnota (geometrický průměr) vzdáleností mezi fázovými vodiči

r – poloměr vodiče

k – opravný koeficient respektující skinefekt ve vodiči, uspořádání (počet vrstev), materiály vodiče atd.

$$d_s = \sqrt[3]{d_{12} \cdot d_{13} \cdot d_{23}} \quad [\text{m}]$$

d_{12}, d_{13}, d_{23} – vzdálenost mezi fázovými vodiči

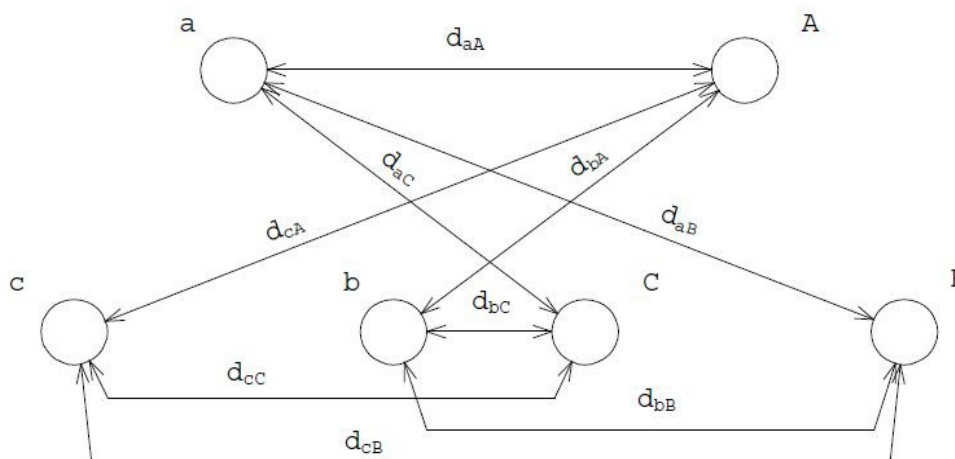
V případě hodnot d_s a r je jedno v jakých rozměrech jsou zadány (mm, cm, m), pouze se musí respektovat, aby byly oba rozměry stejné. Koeficient k se liší podle druhu vodiče. Nejčastější hodnoty pro AlFe lana, v anglické literatuře označované jako ACSR (aluminium conductors

steel reinforced), jsou od 0,809 do 0,826. Výpis hodnot k je v tabulce č.2 [4]:

Typ vodiče		k	poznámka
plný vodič (Cu, Al) kruhového průřezu		0,779	platí pro $f = 50 \text{ Hz}$, $f = 60 \text{ Hz}$ neplatí pro svazkové vodiče
celohliníková a měděná lana	počet drátů	-----	
	7	0,726	
	19	0,758	
	37	0,768	
	61	0,772	
	91	0,774	
	127	0,776	
	169	0,779	
počet Al vodičů - duté slané vodiče a AlFe lana	6 / jedna vrstva	0,768	
	12 / jedna vrstva	0,859	
	26 / dvě vrstvy	0,809	
	30 / dvě vrstvy	0,826	
	54 / tři vrstvy	0,810	
AlFe lano – jedna vrstva Al drátů		0,350 – 0,700	

Tab. 2: Hodnoty koeficientu k respektujícího skinefekt ve vodiči [5,9]

Skutečná třífázová vedení jsou v přenosové a distribuční soustavě většinou vedena na společných stožárech nebo ve společných koridorech, kdy jejich počet je vyšší než 1. Musíme se tedy zabývat výpočtem nové střední vzdálenosti vodičů d'_s , respektující tuto skutečnost [6,9].



Obr. 5: Geometrické uspořádání vodičů na stožáru DONAU, pro dvojité vedení [3]

Střední vzdálenost fázových vodičů dvojitého vedení:

$$d'_s = \frac{d_s \cdot a'}{a} \quad [\text{m}; \text{m}, \text{m}, \text{m}]$$

d'_s – střední geometrická vzdálenost fázových vodičů

d_s – střední geometrická vzdálenost fázových vodičů vlastního vedení

a' – střední geometrická vzdálenost mezi vodiči různých fází paralelních vedení

a – střední geometrická vzdálenost mezi vodiči stejných fází paralelních vedení

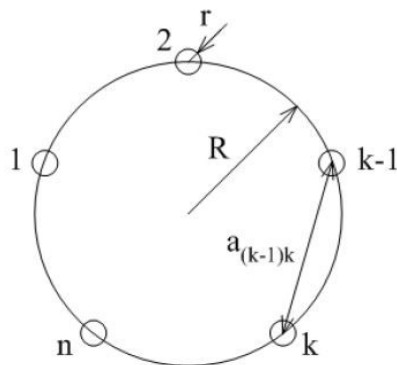
$$a' = \sqrt[6]{d_{15} \cdot d_{16} \cdot d_{24} \cdot d_{26} \cdot d_{34} \cdot d_{35}} \quad [\text{m}]$$

$$a = \sqrt[3]{d_{14} \cdot d_{25} \cdot d_{36}} \quad [\text{m}]$$

Na vedení 400 kV se používají výhradně tzv. svazkové vodiče. Svazkové vodiče jsou složeny z dvou a více lan, která jsou od sebe udržována v dané vzdálenosti rozpěrkami. V rámci České republiky jsou provozovány svazkové vodiče o 2 (rozvodny; 110 kV v okolí Kladna; PS - 220 kV), 3 (PS - 400 kV) a 4 lanech (vyvedení výkonu z elektrárenských bloků). Pro napěťové hladiny vyšší jak 400 kV byly navrženy svazky ze 4 lan a pro napětí 1000 kV a výš svazky z 8 lan. Lana jsou uspořádána do pravidelného n -úhelníku [4,7].

U [kV]	≥ 220	400 (ČR)	≥ 400	≥ 756	≥ 1000	≥ 1800
počet lan - n	2 - 3	3	4	6	8	16

Tab. 3: Počty lan ve svazku používané ve světě [4,7,8]



Obr. 6: Parametry pro výpočet svazkového vodiče [4]

Ve výpočtech se musí počítat s ekvivalentním poloměrem svazku a ekvivalentním koeficientem k :

$$r_e = r^n \cdot m^{\frac{n-1}{n}} \quad [\text{mm}]$$

r_{sv} – ekvivalentní poloměr svazku

r – poloměr vodiče použitého ve svazku

m – vzdálenost středů vodičů ve svazku

n – počet vodičů ve svazku

$$k_e = \sqrt[n]{k}$$

k_e – ekvivalentní koeficient k pro svazkový vodič

k – koeficient respektující skinefekt

n – počet vodičů ve svazku

Provozní indukčnost jedné fáze pro dvojitě plně transponované vedení se svazkovými vodiči se potom vypočte podle vztahu:

$$L_k = 0,46 \cdot \log \frac{d'_s}{k_e \cdot r_{sv}} \quad [\text{mH} \cdot \text{km}^{-1}; \text{m}, -, \text{m}]$$

Kapacitní susceptance vedení B_k

Kapacitní susceptance se vypočítá podle vztahu:

$$B_k = \omega \cdot C_k = 2 \cdot \pi \cdot f \cdot C_k \quad [\text{S} \cdot \text{km}^{-1}; \text{rad}, \text{Hz}, \text{F} \cdot \text{km}^{-1}]$$

f – frekvence sítě

C_k – provozní kapacita vedení

Odvození provozní kapacity jedné fáze trojfázového plně transponovaného vedení je možné vidět v [3] a zde uvádím pouze výsledný vztah za pomoci zobecněných koeficientů N a N' :

$$C_k = \frac{1}{N - N'} \quad [\mu\text{F} \cdot \text{km}^{-1}]$$

Vedení	Bez zemního lana	S zemním lanem
Jednoduché	$N = \delta$ $N' = \delta'$	$N = \delta - \delta_s$ $N' = \delta' - \delta_s$
Dvojitě	$N = \delta + \delta_N$ $N' = \delta' + \delta'_N$	$N = \delta + \delta_N - 2\delta_s$ $N' = \delta' + \delta'_N - 2\delta_s$

Tab. 4: Výpočet zobecněných potenciálových koeficientů pro různé typy vedení [3]

Výpočet vlastních a vzájemných průměrných potenciálových koeficientů pro třífázové vedení:

$$\delta = \frac{\log \frac{2 \cdot h}{r}}{0,0242} \quad \delta' = \frac{\log \frac{\sqrt{4 \cdot h^2 + d_s^2}}{d_s}}{0,0242} \quad [\text{km} \cdot \mu\text{F}^{-1}; \text{m}, \text{m}]$$

h – geometrický průměr výšek fázových vodičů

d_s – geometrický průměr vzdáleností fázových vodičů

r – jednotný poloměr fázového vodiče (pro svazkový vodič $r = r_{sv}$)

Výpočet opravných koeficientů pro dvojité vedení:

$$\delta_N = \frac{\log \frac{\sqrt{4 \cdot h^2 + a^2}}{a}}{0,0242} \quad \delta_{N'} = \frac{\log \frac{\sqrt{4 \cdot h'^2 + a'^2}}{a'}}{0,0242} \quad [\text{km} \cdot \mu \text{F}^{-1}; \text{m}, \text{m}]$$

a' – střední geometrická vzdálenost mezi vodiči různých fází paralelních vedení

a – střední geometrická vzdálenost mezi vodiči stejných fází paralelních vedení

Pokud jsou použita zemní lana musí se vypočítat opravný koeficient zemních lan:

$$\delta_s = \frac{n \cdot \delta_{zV}^2}{\delta_{z0} + (n-1) \cdot \delta_{zz}} \quad [\text{km} \cdot \mu \text{F}^{-1}]$$

$$\delta_{z0} = \frac{\log \frac{2 \cdot h_z}{r_z}}{0,0242} \quad \delta_{zV} = \frac{\log \frac{\sqrt{4 \cdot h_{zS}^2 + a_{zV}^2}}{a_{zV}}}{0,0242} \quad \delta_{zz} = \frac{\log \frac{\sqrt{4 \cdot h_z^2 + a_{zz}^2}}{a_{zz}}}{0,0242} \quad [\text{km} \cdot \mu \text{F}^{-1}; \text{m}, \text{m}]$$

n – počet zemních lan

h_z – výška zemního lana

h_{zS} – střední výška soustavy fázových vodičů a zemních lan

a_{zV} – střední vzdálenost zemních lan od fázových vodičů

a_{zz} – vzdálenost zemních lan

Charakteristická impedance vedení Z_c

Charakteristická impedance vedení Z_c je sekundární provozní parametr vedení. Pokud je vedení zakončené komplexně sdruženou impedancí k Z_c , nedochází k odrazům a všechna energie přenášená vedením je spotřebována v zátěži.

$$Z_c = \sqrt{\frac{Z_k}{Y_k}} = \sqrt{\frac{R + j\omega L_k}{G + j\omega C_k}}$$

Pro vedení VVN a ZVN můžeme pro zjednodušení uvažovat bezztrátové vedení a nulovou hodnotu svodu ($R, G = 0$), pak je Z_c :

$$Z_c = \sqrt{\frac{X_k}{B_k}} = \sqrt{\frac{L_k}{C_k}} \quad [\Omega]$$

Přirozený výkon vedení – SIL

U vedení VVN a ZVN je svod G nepatrný a sériový odpor R malý, můžeme je tedy považovat za bezztrátová vedení. Výkon přenášený vedením zakončeného právě charakteristickou impedancí Z_c se nazývá přirozený výkon, v anglické literatuře surge impedance load (SIL).

$$\text{SIL} = \frac{U_0^2}{Z_c} \quad [\text{W}]$$

Pokud je ve výpočtu použito jako U_0 fázové napětí U_f , pak výsledná hodnota SIL je vztažena na jednu fázi. Když se použije sdružené napětí, vychází SIL jako třífázová hodnota.

Při přenosu přirozeného výkonu vedením dochází k potlačení generace a absorpce jalového výkonu vedením, jelikož vygenerovaný kapacitní výkon se spotřebuje v indukčnosti vedení L . Na koncích vedení tedy není potřeba odebírat nebo dodávat jalový a napěťový profil na celé délce vedení je konstantní.

Pokud se vedením přenáší nižší výkon než je hodnota SIL převažuje generace kapacitního jalového výkonu vedením, který je nutné na obou koncích vedení odebírat. Naopak při zatížení vyšším jak SIL musíme dodávat kapacitní výkon do vedení, převažuje induktivní složka.

Nabíjecí výkon vedení

Vedení při stavu naprázdno se vlivem příčné kapacity chová jako kondenzátor. Je tedy možné určit jeho nabíjecí výkon Q_{NAB} :

$$Q_{NAB} = U^2 \cdot B_k \quad [MVar \cdot km^{-1}]$$

Potřeba Q pro vedení

Nejprve musíme určit úhel přenosu δ (zátěžný úhel), který je možno vypočítat z přenášeného činného výkonu P [8]:

$$P_R = \frac{U_s \cdot U_R}{Z_c \cdot \sin \Theta} \cdot \sin \delta$$

Po přepsání dostáváme vztah pro δ :

$$\delta = \arcsin \frac{P_R \cdot Z_c \cdot \sin \Theta}{U_R \cdot U_S}$$

P_R – činný výkon na konci vedení

Z_c – charakteristická impedance vedení

U_R, U_S – napětí na konci vedení, respektive na začátku

$$\Theta = \beta \cdot l$$

Θ – elektrická délka vedení

β – konstanta šíření

l – skutečná délka vedení

$$\beta = \sqrt{L_k \cdot C_k}$$

Pro krátká vedení (do 80 km) lze vzorec pro P zjednodušit, kdy se za $\sin \Theta$ dosadí pouze Θ pak:

$$Z_c \cdot \sin \Theta = Z_c \cdot \Theta = \sqrt{\frac{L_k}{C_k}} \cdot \omega \cdot \sqrt{L_k \cdot C_k} \cdot l = X_L$$

X_L – sériová induktivní reaktance vedení

Výpočet potřebného jalového výkonu Q_R na konci vedení je dán:

$$Q_R = \frac{U_R \cdot (U_S \cdot \cos \delta - U_R \cdot \cos \Theta)}{Z_c \cdot \sin \Theta} \quad [\text{MVA}; \text{kV}; \text{kV}; \Omega]$$

Obdobně lze vypočítat Q_S pro začátek vedení:

$$Q_S = \frac{-U_S \cdot (U_R \cdot \cos \delta - U_S \cdot \cos \Theta)}{Z_c \cdot \sin \Theta} \quad [\text{MVA}; \text{kV}; \text{kV}; \Omega]$$

2.5 Výpočet zkratových proudů podle ČSN EN 60909-0 [23]

Pokud potřebujeme určit tzv. tvrdost uzlu elektrizační soustavy, lze to provést pomocí určení počátečního trojfázového zkratového proudu v rozvodně, která má být posuzována, a následného vynásobení odmocninou ze 3.

2.5.1 Počáteční rázový zkratový proud

Jde o efektivní hodnotu střídavého zkratového proudu $I_k^{(3)''}$ v počátečním okamžiku zkratu.

$$I_k^{(3)''} = \frac{c \cdot U_n}{\sqrt{3} \cdot |Z_k|} \quad [\text{kA}; -, \text{kV}, \Omega]$$

c – napěťový součinitel pro výpočet maximálních a minimálních zkratových proudů

U_n – jmenovité napětí soustavy

Z_k – impedance soustavy

U_n	c_{\max}	c_{\min}
100 V až 1000 V	1,05; 1,10	0,95
>1 kV až 35 kV	1,10	1,00
>35 kV		
400 kV	1,05	

Tab. 5: Napěťový součinitel c pro výpočet maximálních a minimálních zkratových proudů [23]

2.5.2 Impedance soustavy

Jednotlivé prvky elektrizační soustavy lze přepočítat na impedance a dále s nimi počítat (stejně jako s odpory). Hlavní prvky jsou vedení, síťové napáječe, transformátory a elektrárenské bloky.

2.5.3 Síťový napáječ

Pokud je u sítě (okolní soustavy) znám pouze zkratový výkon, lze ji v bodě připojení považovat za síťový napáječ a jeho impedanci Z_Q vypočítat podle:

$$Z_Q = \frac{(c \cdot U_{nQ})^2}{S_{ksQ}} \quad [\Omega; -, kV, MVA]$$

U_{nQ} – jmenovité napětí síťového napáječe

S_{ksQ} – trojfázový zkratový výkon síťového napáječe

2.5.4 Transformátor

Pro výpočet sousledné zkratové impedance Z_T musíme znát štítkové hodnoty stroje – napětí nakrátko, jmenovitý výkon a jmenovitá napětí.

$$Z_T = u_k \cdot \frac{U_{rT}^2}{S_{rT}} \quad [\Omega; \%, kV, MVA]$$

u_k – napětí transformátoru nakrátko

U_{rT} – jmenovité napětí transformátoru na straně vyššího nebo nižšího napětí

S_{rT} – jmenovitý výkon transformátoru

2.5.5 Trojvinut'ový transformátor

Zkratové impedance Z_A , Z_B a Z_C lze vypočítat přes tři zkratové impedance vztažené na stejnou stranu transformátoru.

$$Z_{AB} = u_{kAB} \cdot \frac{U_{rTA}^2}{S_{rTAB}} \quad [\Omega; \%, kV, MVA]$$

$$Z_{AC} = u_{kAC} \cdot \frac{U_{rTA}^2}{S_{rTAC}} \quad [\Omega; \%, kV, MVA]$$

$$Z_{BC} = u_{kBC} \cdot \frac{U_{rTA}^2}{S_{rTBC}} \quad [\Omega; \%, kV, MVA]$$

Výsledné impedance pak jsou:

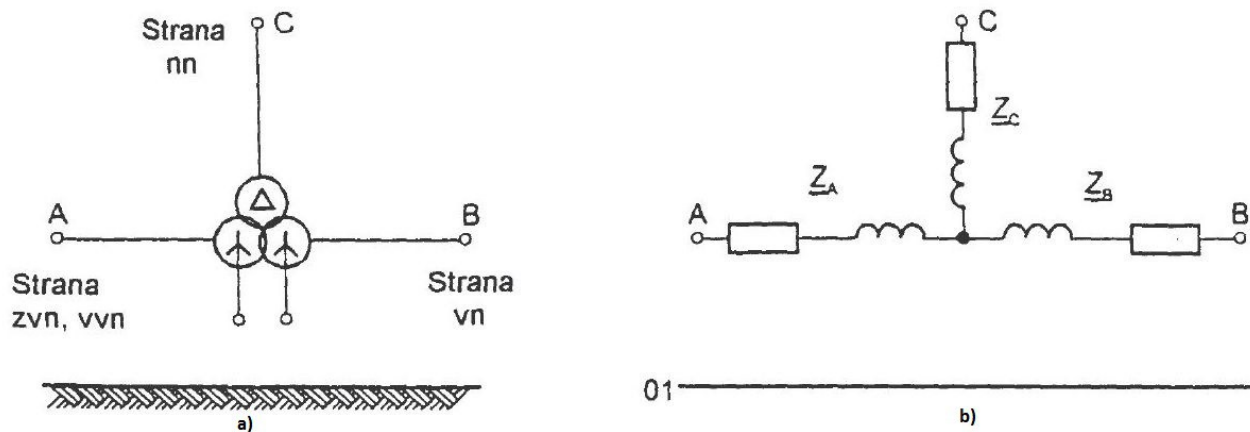
$$Z_A = \frac{(Z_{AB} + Z_{AC} - Z_{BC})}{2} \quad [\Omega]$$

$$Z_B = \frac{(Z_{AB} + Z_{BC} - Z_{AC})}{2} \quad [\Omega]$$

$$Z_C = \frac{(Z_{AC} + Z_{BC} - Z_{AB})}{2} \quad [\Omega]$$

U_{rTA} – jmenovité napětí strany A transformátoru; lze použít B nebo C, v případě výpočtu pro stranu B resp. C transformátoru, dále již se neprovádí přepočítání podle převodu TR

S_{rTAB} – jmenovitý výkon TR mezi stranami A a B
 S_{rTAC} – jmenovitý výkon TR mezi stranami A a C
 S_{rTBC} – jmenovitý výkon TR mezi stranami B a C
 u_{kAB} – napětí TR nakrátko mezi stranami A a B
 u_{kAC} – napětí TR nakrátko mezi stranami A a C
 u_{kBC} – napětí TR nakrátko mezi stranami B a C



Obr. 7: Trojvintuřový transformátor; a) označení zapojení vnutí, b) Náhradní schéma – sousledné složky [23]
 V normě se uvádí i výpočty korekčních součinitelů, které ovšem pro tuto práci nejsou podstatné.

2.5.6 Elektrárenský blok bez přepínače odboček pod zatížením

Následující vzorce se používají pro výpočet impedance celého elektrárenského bloku Z_{SO} včetně blokového transformátoru.

$$Z_{SO} = K_{SO} \cdot (t_r^2 \cdot Z_G + Z_{THV}) \quad [\Omega; -, -, \Omega, \Omega]$$

Korekční součinitel K_{SO} :

$$K_{SO} = \frac{U_{nQ}}{U_{rG} \cdot (1 + p_G)} \cdot \frac{U_{rTLV}}{U_{rTHV}} \cdot (1 \pm p_T) \cdot \frac{c_{max}}{1 + x_d'' \cdot \sin \varphi_{rG}}$$

$$Z_G = R_G + jX_d''$$

$$x_d'' = \frac{X_d''}{Z_{rG}} \quad Z_{rG} = \frac{U_{rG}^2}{S_{rG}}$$

$$t_r = \frac{U_{rTHV}}{U_{rTLV}}$$

Z_G – přechodná impedance generátoru – bez korekčního součinitele

Z_{THV} – impedance blokového transformátoru vztahovaná na stranu vyššího napětí – bez korekčního součinitele

U_{nQ} – jmenovité napětí soustavy v rozvodně kam je připojen elektrárenský blok

U_{rG} – jmenovité napětí generátoru

S_{rG} – jmenovitý výkon generátoru
 p_G – maximální odchylka napětí generátoru – podle štítku stroje
 φ_{rG} – jmenovitý fázový úhel stroje
 x_d'' – poměrná rázová reaktance generátoru vztažená k jmenovité impedanci
 t_r – jmenovitý převod blokového transformátoru
 U_{rTHV} – jmenovitá hodnota napětí na straně vyššího napětí blokového transformátoru
 U_{rTLV} – jmenovitá hodnota napětí na straně nižšího napětí blokového transformátoru
 p_T – velikost odbočky blokového transformátoru, na kterou je nastaven
 C_{max} – napěťový součinitel – určen pro hodnotu U_{rG}

2.6 Kompenzace jalového výkonu Q

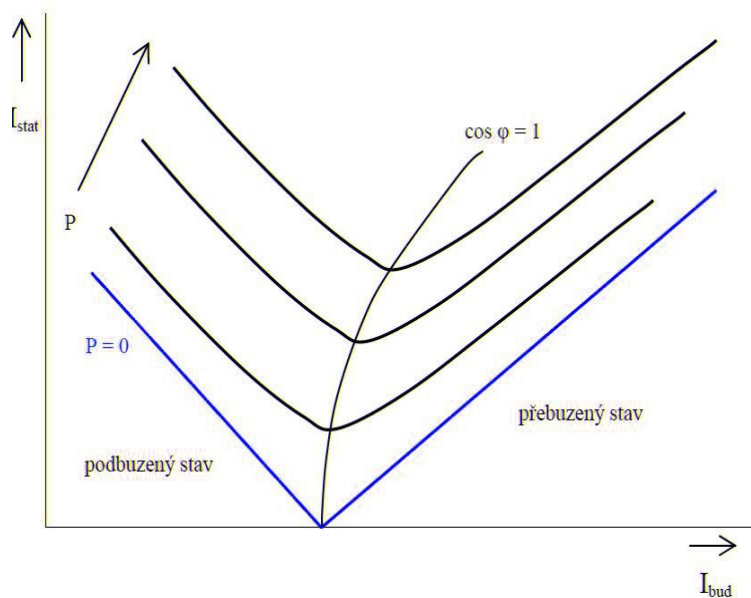
Cílem kompenzace jalového výkonu je snížení zatížení a jalových ztrát v síti, čímž se dosáhne lepších podmínek pro přenos činného výkonu – zvýšení kapacity přenášeného výkonu bez nutnosti změny fyzických parametrů sítě (vedení, transformátory). Maximální přenášený zdánlivý výkon zůstává stejný.

2.6.1 Kompenzační prostředky

Prostředky používané pro kompenzaci jalového výkonu se chovají jako zdroje i spotřebiče jalové energie. Základní dělení je na rotační a statické.

2.6.2 Rotační kompenzátor

Rotační kompenzátor je synchronní stroj s nevyvedenou hřídelí rotoru, který pracuje naprázdno. V tomto režimu má synchronní stroj minimální odběr činného výkonu. Kompenzace probíhá za pomoci změny buzení stroje, který je tak podbuzen nebo přebuzen (podle druhu zátěže – C, L).



Obr. 8: V-křivky synchronního stroje

Jelikož se dodávaný výkon mění se spožděním oproti změně budícího proudu, může docházet k dočasnému překompenzování sítě. Použití rotačních kompenzátorů je vhodné pro centrální kompenzaci průmyslových podniků nebo míst ES, kde nedochází k rychlým změnám Q . Nevýhodou mohou být velké rozměry stroje a nutnost odběru činného výkonu pro potřeby buzení, proto se rotační kompenzátory nahrazují statickými a v rámci PS ČR se nacházejí pouze dva, v rozvodně Krasíkov. Stroje jsou v majetku ČEZ Distribuce a.s. a primárně se využívají pro kompenzaci distribuční soustavy (DS).



Obr. 9: Rotační kompenzátor v R Krasíkov při generální opravě [42]

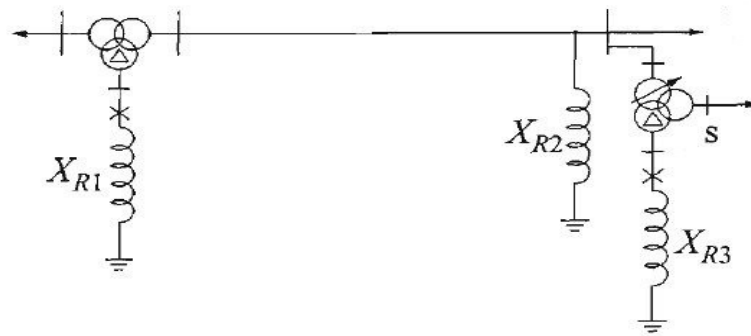
2.6.3 Statické kompenzátory

Za statické jsou označována všechna zařízení, kromě rotčních. Statická kompenzace není závislá na odběru činného výkonu. Jedná se o pralálně připojené tlumivky a kondenzátory k zátěži nebo vložené sériové kondenzátory. Tyto prostředky poskytují pasivní kompenzaci. Statické var kompenzátory (Static Var Compensator - SVC) nebo statické kompenzátory typu STATCOM (STATIC synchronous COMPensator) poskytují aktivní kompenzaci.

2.6.4 Paralelní tlumivky

Paralelní tlumivky jsou používány pro kompenzaci kapacity vedení při chodu naprázdno nebo nízkém zatížení vedení, kdy dochází k nárůstu napětí. Jsou vyžadovány pro vedení ZVN delší než 200 km [8]. U kratších vedení jsou používány při napájení z „měkkého“ zdroje (nízký zkratový výkon). Pro kratší vedení, která jsou napájena „tvrdými“ zdroji se používají v kombinaci s odpojovači, kdy se při větším zatížení odpojí (převládající induktivní charakter vedení).

Tlumivky se mohou připojit v rozvodnách přímo na napětí dané sítě nebo do terciárních vynutí síťových transformátorů.



Obr. 10: Paralelně připojené tlumivky do přenosové soustavy; X_{R1} , X_{R3} – tlumivky připojované do terciárních vinutí transformátoru, X_{R2} – permanentně připojená tlumivka na napětovou hladinu nadřazené sítě [8]

2.6.5 Paralelní kondenzátory

Paralelně připojené kondenzátory dodávají jalový výkon do sítě, který je využíván pro stabilizaci napětí na dané úrovni. K tomuto účelu fungují v přenosové soustavě tzv. pilotní uzly. V pilotních uzlech je změnou jalového výkonu řízeno napětí uzlu. Kondenzátory kompenzují induktivní jalový výkon odebíraný vedením při vysokém zatížení a zátěži, která je převážně induktivního charakteru. Kondenzátorové baterie se připojují přímo na síťové napětí nebo do terciárních vynutí transformátorů v elektrických stanicích PS.

2.6.6 Sériové kondenzátory

Sériové kondenzátory jsou zapojeny v sérii s fázovými vodiči a kompenzují induktivní reaktanci vedení. Zapojení zvyšuje maximální možnou hodnotu přenášeného výkonu a snižuje ztráty přenášeným jalovým výkonem. Hodnota vytvářeného jalového výkonu sériově zapojenými kondenzátory se zvyšuje s rostoucí hodnotou přenášeného činného výkonu. Sériové kondenzátory mají samoregulační schopnost.

Při využití sériově zapojených kondenzátorů se musí vzít v úvahu [8, 10]:

- Zvyšování napětí vlivem kapacitních proudů: Návrh kondenzátorových baterií je proveden na maximální hodnotu napětí, která se může v daném místě vyskytnout. Napětí je určeno pro nejhorší možný stav, kdy ještě nereaguje automatika (PRN, ASRU, ochrany atd.). Tato možnost nebývá ekonomicky a technicky únosná, jelikož cena a rozměry vysokonapětových kondenzátorů se zvyšují se čtvercem napětí.
- Ochrana přemostěním: Jelikož je na kondenzátorech stejné napětí jako na lince samotné, jsou jejich maximální provozní hodnoty navrhovány pouze o několik procent vyšší. Zkratový proud vyvolaný poruchou za kondenzátorem zvýší napětí na kondenzátoru přes jeho maximální hodnotu. Z tohoto důvodu se využívá přemostění (bypass). Během poruchy se kondenzátor přemostí a tím se prakticky vypojí z obvodu. Po odeznění poruchy je opět připojen, bypass se vypne. Dříve se využívala jiskřiště,

kdy připojení C proběhne ve stovkách milisekund po odeznění poruchy (1 jiskřiště: od 200 do 400 ms; 2 jiskřiště: cca 80 ms). Dnes se používají převážně nelineární odpory, což přináší výhodu okamžitého připojení kondenzátoru do linky. Odpor i C je během poruchy připojen v lince a poruchový proud přebírá odpor. Jiskřiště se využívá i u varianty s nelineárním odporem, ale pouze jako přepět'ová ochrana odporu.

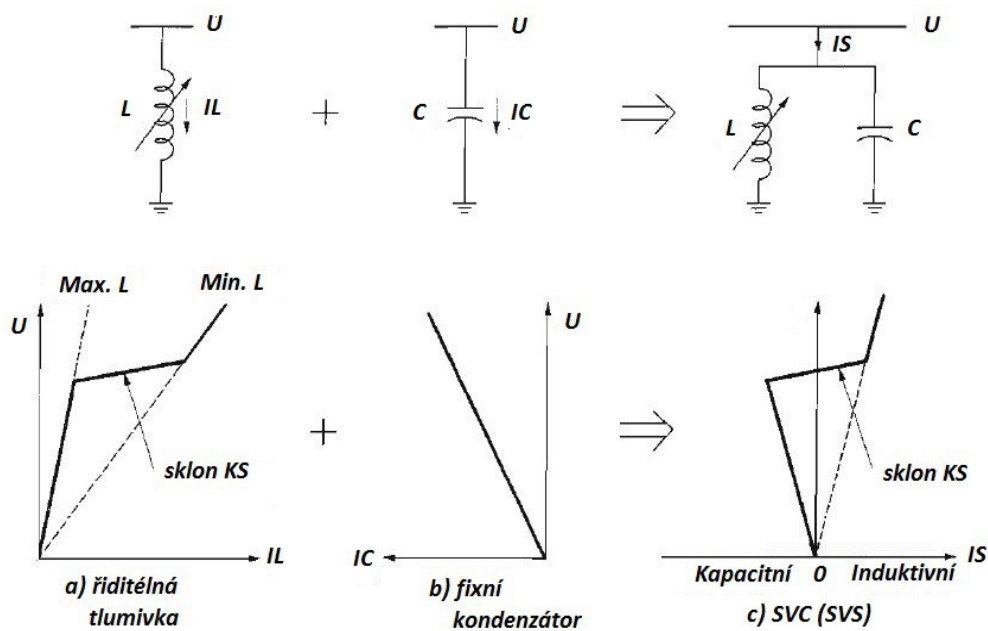
- Poloha: Kondenzátorové baterie by teoreticky mohly být do linky vřazeny kdekoliv. Hlavními faktory ovlivňující umístění jsou cena, dostupnost místa pro montáž a opravy, zkratové poměry v místě a efektivní zvýšení přenosových schopností linky. Nejběžnější umístění je v rozvodně, uprostřed linky nebo 1/3 či 1/4 délky linky.

2.6.7 Statické var kompenzátory – SVC [8, 10, 12, 13]

Jsou to paralelně připojené říditelné zátěže/zdroje jalového výkonu. SVC se skládají z odběrového/zdrojového prvku (C , L) a řídicích jednotek, převážně polovodičových prvků. Slovo „statické“ označuje skutečnost, že se zde na rozdíl od synchronních kondenzátorů nenacházejí pohyblivé (rotační) prvky. SVC je tvořeno základními prvky:

- Saturated reactor (SR)
- Tyristory řízená tlumivka / Thyristor-controlled reactor (TCR)
- Tyristory spínaný kondenzátor / Thyristor-switched capacitor (TSC)
- Tyristory spínaná tlumivka / Thyristor-switched reactor (TSR)
- Tyristory řízený transformátor / Thyristor-controlled transformer (TCT)

Systemy založené na prvcích SVC s možností kombinace s mechanicky spínanými prvky se nazývají Statické Var systémy (Static Var System – SVS). Jejich funkce spočívá v udržování konstantního napětí, v ideální případě, v daném uzlu za pomoci změny dodávky/odběru jalové energie. Základní zapojení SVS představuje paralelní provoz kondenzátoru a říditelné tlumivky. Složením charakteristik obou prvků do jedné dostaneme celkovou charakteristiku SVS.



Obr. 11: Složení charakteristik SVC (SVS)

Tyristory řízená tlumivka – TCR

Základ TCR tvoří tlumivka v sérii s dvěma antiparalelně zapojenými tyristory, které jsou využívány k řízení průtoku proudu tlumivkou. Tyristory jsou střídavě otevírány pod řídicím úhlem α , který se měří od průchodu napětí nulou. Při $\alpha = 90^\circ$ jsou tyristory plně otevřeny a tlumivkou prochází celá čistě jalový proud sinusového průběhu. K částečnému otevření tyristoru dojde při $\alpha > 90^\circ$. Nesmí dojít k provozu s $\alpha < 90^\circ$, jelikož by docházelo ke generaci nesymetrických proudů, vlivem obsahu ss složky. Pro úhel otevření σ platí:

$$\sigma = 2\pi - \alpha$$

Okamžitá hodnota proudu i je dána:

$$\mathbf{i} = \frac{\sqrt{2}\mathbf{U}}{\mathbf{X}_L} (\cos \alpha - \cos \omega t) \quad \mathbf{pro} \quad \alpha < \omega t < \alpha + \sigma$$

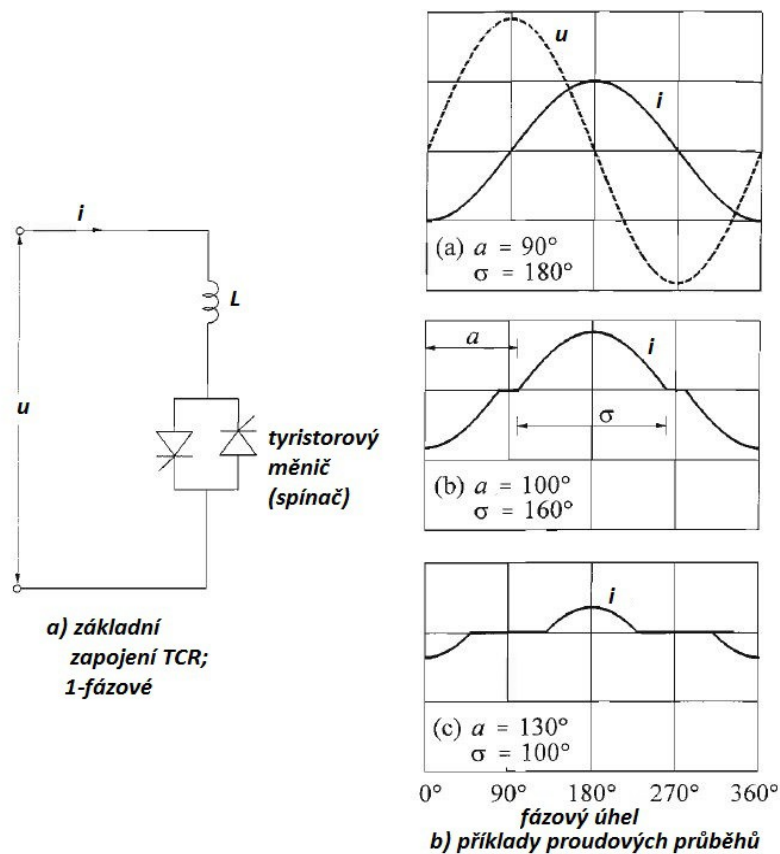
$$\mathbf{i} = \mathbf{0} \quad \mathbf{pro} \quad \alpha + \sigma < \omega t < \alpha + \pi$$

Vztah pro hodnotu 1. harmonické proudu I_1 :

$$I_1 = \frac{U}{X_L} \frac{\sigma - \sin \sigma}{\pi}$$

I_1, U – střední hodnoty proudu respektive napětí
 X_L – reaktance tlumivky pro 1. harmonickou

Při zvětšování řídicího úhlu α dochází ke snižování obsahu 1. harmonické proudu. Provoz TCR vyžaduje řídicí systém schopný spočítat a nastavit řídicí úhel α , který zároveň dokáže spolupracovat s napěťovou regulací tak, aby bylo dosaženo relativně konstantního napětí v uzlu.



Obr. 12: Zapojení TCR a příklady průběhů proudů v závislosti na řídicím úhlu

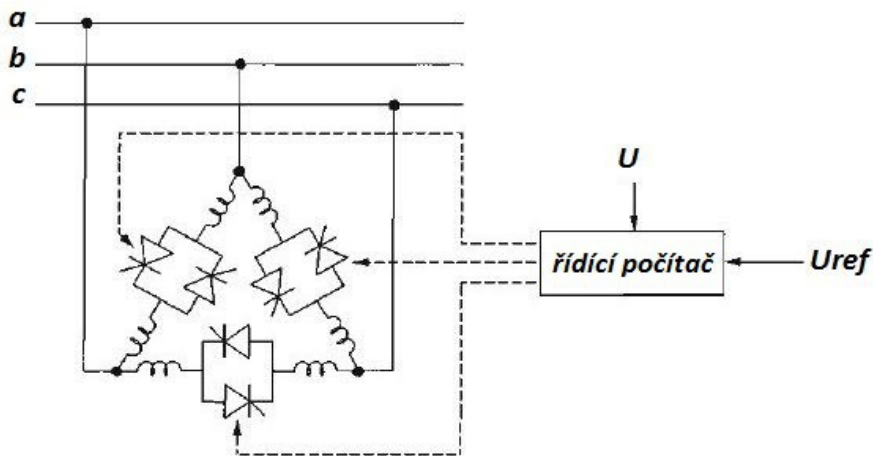
Při zvyšování a dochází ke generaci vyšších harmonických. Zapojení vhodná pro trojfázové systémy jsou složena z jednofázových zapojení. Nejvhodnější jsou 6-ti a 12-ti pulsní zapojení. V 6-ti pulsním zapojení jsou jednotlivé TCR spojeny do trojúhelníku. V tomto zapojení se násobky 3. harmonické (3, 9, atd.) šíří v rámci trojúhelníku a neovlivňují tak vnější síť. Pro ostatní harmonické se použijí filtry.

Využití 12-ti pulsního zapojení je sice vhodné pro eliminaci 5. a 7. harmonické, ale vyžaduje instalaci dalšího transformátoru s terciárním vynutím nebo dvou standardních transformátorů se zajištěním rozdílných hodinových úhlů pro daný fázový posun (30°). Eliminace spočívá v zapojení dvou 6-ti pulsních TCR do sekundárního a terciárního vynutí, kdy jedno vynutí je zapojené do trojúhelníka a druhé do hvězdy. Nejnižší generované harmonické jsou 11. a 13., pro které se použijí filtry [14].

Určení potřebné indukčnosti tlumivky se vypočítá z potřebného induktivního výkonu.

$$Q = B_{L_{\max}} U^2$$

$$I = B_{L_{\max}} U$$



Obr. 13: 6-ti pulsní zapojení TCR

Tyristory spínaný kondenzátor – TSC

Základní zapojení se skládá z kondenzátoru, tyristorů sloužících k připojení kondenzátoru na síť a malé tlumivky, která omezuje zapínací proudy vzniklé přechodným dějem a brání vzniku rezonance se sítí. V trojfázových aplikacích jsou většinou spojeny jednotky do Δ . K řízení výsledné susceptance systému je využit princip on-off spínání (integral cycle control). Susceptance je připojena po daný počet půlperiod napětí. Pro minimalizaci přechodných dějů při spínání a odpínání se využívá princip spínání v maximální hodnotě napětí, kdy je na tyristorech nulové rozdílové napětí ($\Delta U = U_1 - U_C = 0$). K vypnutí se zvolí bod, kdy dochází k průchodu proudu nulou a zároveň je napětí sítě na maximální nebo minimální hodnotě. Tímto postupem nedojde k vybití kondenzátorů a ty jsou připraveny k dalšímu připojení k síti bez přechodného jevu. Jelikož je celková hodnota susceptance rozdělena do několika baterií, je zapotřebí vhodně kombinovat sepnutí jednotlivých baterií, abychom dostali požadovanou výslednou hodnotu susceptance. Ke změnám v sepnutí jednotlivých baterií může dojít každou každý řídicí cyklus (půlperiodu). Tento způsob spínání negeneruje vyšší harmonické [17].

Celkovým výsledkem je skokové řízení susceptance. Velikost skoku je dána velikostí jednotlivých spínaných kondenzátorových baterií. Dříve se z ekonomických důvodů omezoval počet baterií (ceny tyristorů), což dnes již neplatí, jelikož dnešní ceny výkonových tyristorů se pohybují ve maximálně do 150 euro/ks [18].

Výpočet potřebné kapacity se provede z potřebného kapacitního výkonu.

$$Q = B_c U^2$$

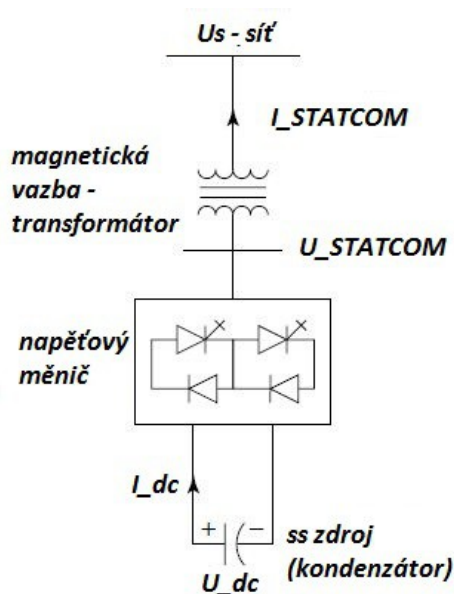
$$I = B_c U$$

2.6.8 STATCOM

Jedná se o paralelně připojené zařízení pro kompenzaci jalového výkonu, které dokáže generovat a zároveň absorbovat jalový výkon v závislosti na řídicím signálu. Řídicí signál je počítán podle specifických parametrů, které jsou pro každou síť jiné.

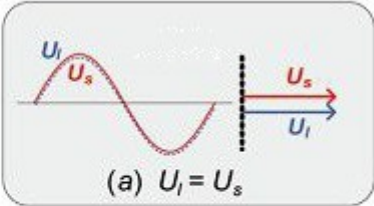
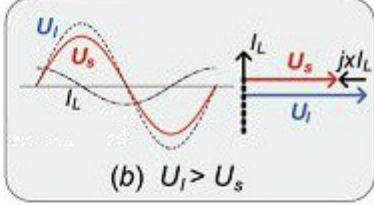
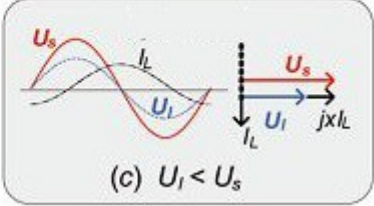
STATCOM je tvořen polovodičovými napěťovými měniči, které dokáží ze stejnosměrného zdroje vytvořit sinusový průběh a naopak. Jako stejnosměrný zdroj jsou většinou používány kondenzátorové baterie. STATCOM může sloužit pro:

- zlepšení napěťové stability přenosové nebo distribuční soustavy
- zlepšení stability přenosu
- odstraňování flickeru
- řízení jalového výkonu, ale také činného výkonu
- zvýšení stability při poruchových stavech v soustavě



Obr. 14: Schématické zapojení STATCOMu [13]

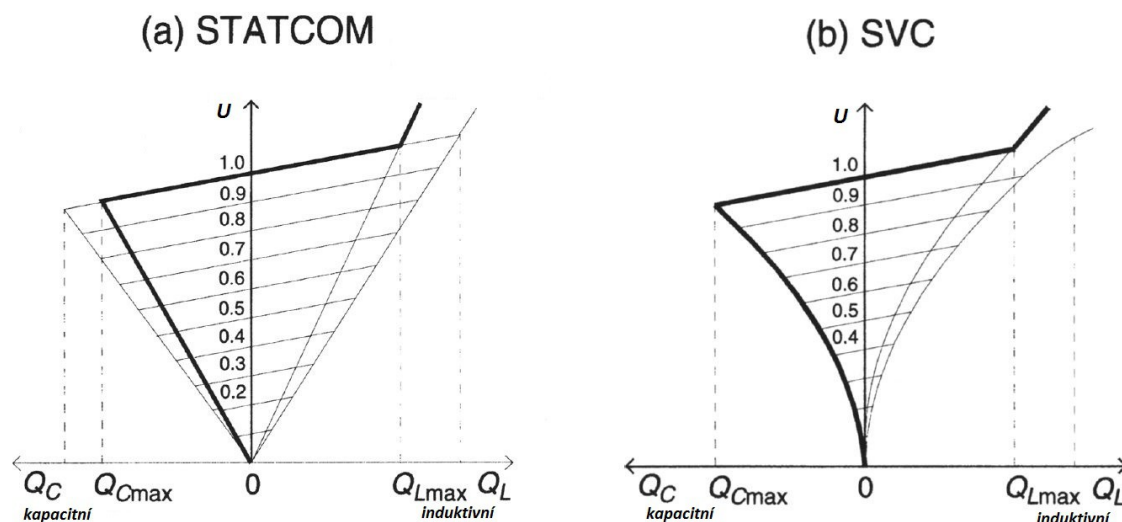
Funkce spočívá v injektáži napětí do uzlu sítě. Pokud je střední hodnota injektovaného napětí vyšší než hodnota napětí sítě, STATCOM se chová jako kapacita. Naopak při nižší hodnotě se chová jako indukčnost. Při shodném napětí je dodávaný/odebíraný jalový výkon roven 0. Podobně je možné řídit činný výkon, kde se využívá fázového posunu mezi výstupním napětím STATCOMu a síťovým napětím.

<p>práce bez zatížení</p>	 <p>(a) $U_1 = U_s$</p>	<p>$U_1 = U_s$ $Q = 0$ $I = 0$</p>
<p>kapacitní pracovní mód</p>	 <p>(b) $U_1 > U_s$</p>	<p>$U_1 > U_s$ Q - dodává I - kapacitní</p>
<p>induktivní pracovní mód</p>	 <p>(c) $U_1 < U_s$</p>	<p>$U_1 < U_s$ Q - odebírá I - induktivní</p>

Obr. 15: Princip práce STATCOMu [46]

Hlavní výhody jsou relativně malá velikost (zabraná plocha) oproti SVC a samostatným bateriím kondenzátorů, modularita.

Nevýhody jsou vysoká cena při vyšších výkonech, vysoké tepelné ztráty (polovodiče) a náklady na chlazení.



Obr. 16: Porovnání V-Q charakteristik SVC a STATCOM [8]

2.7 Harmonické [6, 19-21]

Podle definice je harmonické napětí nebo proud sinusovým průběhem o frekvenci odpovídající celočíselnému násobku základní frekvence. V Evropě je základní síťový kmitočet 50 Hz, severní Amerika využívá 60 Hz. V ideálním případě by ve všech částech ES měl být čistě sinusový průběh napětí a proudu o 50 Hz. Vlivem různých zátěží vyžadující nesinusový průběh napětí nebo proudu je však skutečný průběh deformován. Deformace je závislá na obsahu vyšších harmonických v dané části ES. Obsah a maximální hodnota vyšších harmonických je regulována normou. Většina vyšších harmonických se dá odstranit nasazením filtrů, kdy je každý naladěn na specifickou hodnotu (frekvenci).

Zdroje vyšších harmonických:

- Zátěže s výkonovými polovodičovými prvky – usměrňovače, střídavé měniče napětí, frekvenční měniče, SVC, HVDC
- Zátěže s nelineární VA charakteristikou – transformátory, indukčnosti, výbojky, obloukové pece, korona na vedení

Problémy způsobující obsah vyšších harmonických v síti:

- Tepelné přetěžování kondenzátorů = nižší životnost
- Chybně fungující ochrany
- Zhoršení zhášení oblouků při poruchách
- Zatížení středních a ochranných vodičů vyrovnávacími proudy (zemní lana)
- Rušení signálu HDO

2.7.1 Analýza

Pokud je průběh periodický, dá se rozložit za pomoci funkcí sinus a cosinus. Rozklad je nazýván jako Fourierova řada.

$$f(t) = \frac{a_0}{2} + \sum_{h=1}^{\infty} [a_h \cos(h\omega_0 t) + b_h \sin(h\omega_0 t)]; \quad \omega_0 = 2\pi f_0 = \frac{2\pi}{T}$$

$$a_0 = \frac{2}{T} \int_0^T f(t) dt$$

$$a_h = \frac{2}{T} \int_0^T f(t) \cos(h\omega_0 t) dt$$

$$b_h = \frac{2}{T} \int_0^T f(t) \sin(h\omega_0 t) dt$$

f_0 – frekvence základní harmonické – 50/60 Hz; podle systému

Zjednodušení rovnice:

$$f(t) = c_0 + \sum_{h=1}^{\infty} c_h \sin(h \omega_0 t + \varphi_h)$$

kde

$$c_0 = \frac{a_0}{2}; \quad c_h = \sqrt{a_h^2 + b_h^2}; \quad \varphi_h = \arctg\left(\frac{a_h}{b_h}\right)$$

h – pořadí harmonické – $h = 1, 2, 3, \dots$; podle norem se musíme zabývat max.

40. harmonickou

c_0 – velikost DC složky

c_h, φ_h – velikost a fáze h -té harmonické

Protože průběhy napětí a proudu jsou liché funkce a systému nedochází k offsetu, lze rovnici zjednodušit na vztahy pro napětí a proud:

$$i(t) = \sum_{h=1}^{40} I_{hm} \sin(h \omega_0 t + \phi_h)$$

$$u(t) = \sum_{h=1}^{40} U_{hm} \sin(h \omega_0 t + \theta_h)$$

I_{hm} – maximální hodnota proudu h -té harmonické

U_{hm} – maximální hodnota napětí h -té harmonické

ϕ_h – fázový posun proudu h -té harmonické

θ_h – fázový posun napětí h -té harmonické

Efektivní hodnota napětí a proudu:

$$U = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T f^2(t) dt} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T [U_{hm} \sin(h \omega_0 t + \theta_h)]^2 dt} = \sqrt{\sum_{h=1}^{\infty} U_h^2}$$

$$I = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T f^2(t) dt} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T [I_{hm} \sin(h \omega_0 t + \phi_h)]^2 dt} = \sqrt{\sum_{h=1}^{\infty} I_h^2}$$

U_h, I_h – efektivní hodnoty napětí a proudu obsažených harmonických

Pro hodnocení míry zkreslení napětí a proudu se používají tzv. koeficienty zkreslení THD (Total Harmonic Distortion):

$$\mathbf{THD}_U = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{\infty} U_h^2}}{U}; \quad \mathbf{THD}_I = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{\infty} I_h^2}}{I}$$

U, I – efektivní hodnota základní harmonické U a I

Vyšší harmonické jsou při induktivní zátěži zdrojem jalových ztrát. Střední hodnota P a Q se vypočte:

$$P = \sum_{h=1}^{\infty} U_h I_h \cos(\theta_h - \phi_h)$$

$$Q = \sum_{h=1}^{\infty} U_h I_h \sin(\theta_h - \phi_h)$$

Pak zdánlivý výkon je:

$$S = UI = \sqrt{\sum_{h=1}^{\infty} U_h^2 I_h^2} = S_1 \sqrt{1 + \text{THD}_U^2} \sqrt{1 + \text{THD}_I^2}$$

S_1 – zdánlivý výkon základní harmonické

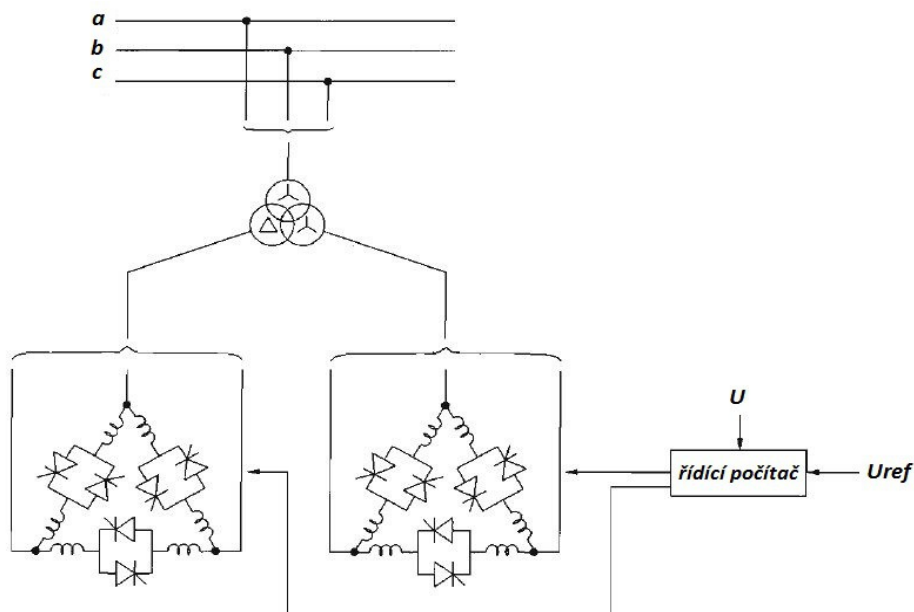
Ve většině aplikací se operuje s pojmem účinník $\cos \varphi$, který je ovšem platný pouze pro 1. harmonickou a pokud se v síti vyskytují vyšší harmonické neodpovídá realitě. Při přítomnosti harmonických se do vztahů zavádí tzv. deformační výkon D , který se nedá využít, ale může způsobit odběr jalového výkonu i na čistě odporové zátěži.

$$D^2 = S^2 - (P^2 + Q^2) \quad [VA]$$

2.7.2 Filtrace

Odstranění vyšších harmonických se primárně provádí již při jejich vzniku. Použitím správného návrhu lze dosáhnout zamezení vzniku některých harmonických. Pro odstranění zbývajících se využívá systému filtrů, kdy každý filtr je naladěn na specifickou frekvenci odpovídající dané harmonické.

- Odstranění pomocí zapojení: využívá se efektu kdy při správném zapojení měničů mezi jednotlivé fáze se vznikající harmonické vzájemně vyruší. Tohoto efektu se využívá např. u 12-ti pulsních usměrňovačů pro trakci. Dvě 6-ti pulsní jednotky jsou zapojeny do Δ do dvou sekundárních vynutí transformátoru. Jedno vynutí je zapojeno do Y a druhé do Δ . Vynutí jsou posunuta o 30° nebo 150° - zapojení např. Yy0d1 nebo Yd0y11 atd.



Obr. 17: 12-ti pulsní zapojení TCR

Díky tomuto principu vznikají nejnižší vyšší harmonické až 11. a 13.; potlačení 5. a 7. harmonické. Pro potlačení těchto hodnot se použijí filtry.

- Filtry: pomocí správného zapojení R, L a C lze dosáhnout odfiltrování daných harmonických ze sítě.

Návrh filtru

K naladění kondenzátoru na pro frekvenci dané harmonické je zapotřebí zařadit do série cívku. Na naladěné harmonické platí:

$$X_{Lh} = h_h X_{L1} = X_{Cn} = \frac{X_{Cn}}{h_h} = X_h = \sqrt{X_{L1} X_{C1}} = \sqrt{\frac{L_1}{C_1}}$$

Naladěná frekvence pak je:

$$f_n = h_n f_0 = \frac{1}{2\pi \sqrt{L_1 C_1}} \quad [\text{Hz}]; \quad h_n = \frac{f_n}{f_0} = \frac{1}{\omega_0 \sqrt{L_1 C_1}} = \sqrt{\frac{X_{C1}}{X_{L1}}}$$

Reaktance cívky je pak dána:

$$X_{L1} = \frac{X_{C1}}{h_n^2}$$

Při správném naladění filtru se bude chovat pro proud o dané frekvenci jako zkrat. Jelikož jsou kondenzátory citlivé na napětí (tepelné namáhání), musejí být dimenzovány na

maximální napětí odpovídající minimálně součtu napětí základní a laděné harmonické.

$$U_{CNmin} = U_{C1} + U_{Ch} = X_{C1} I_{C1} + X_{Ch} I_{Ch}$$

Výkonové kondenzátory musí být navrženy s možností přetížení, kdy je dovolené provozní přetížení:

$$U_C \leq 1,1 U_{CN} \quad Q_C \leq 1,35 Q_{CN} \quad I_C \leq 1,3 I_{CN}$$

Tepelné ztráty zkracují životnost kondenzátoru. Ztrátový výkon P_{ZN} je dán vztahem:

$$P_{ZN} = U_h^2 h \omega_0 C \operatorname{tg} \delta$$

Z hlediska využití kondenzátoru jako filtru se dá zanedbat $\operatorname{tg} \delta$ a ztráty jsou pak závislé hlavně na součtu napětí harmonických složek:

$$U_C = U_1 \sqrt{1 + \frac{\sum h U_h^2}{U_1^2}} \leq 1,1 U_{CN}$$

Filtr se chová zároveň jako kompenzační zařízení. Velikost jalového výkonu dodaného kondenzátory je:

$$Q_C = \sum_{h=1} U_{Ch} I_{Ch} = \sum_{h=1} \frac{X_C}{h} I_{Ch}^2 = \sum_{h=1} \frac{h}{X_C} U_{Ch}^2$$

Velikost odebraného jalového výkonu tlumivkami:

$$Q_L = \sum_{h=1} U_{Lh} I_{Lh} = \sum_{h=1} h X_L I_{Lh}^2 = \sum_{h=1} \frac{U_{Lh}}{h X_L}$$

Celkový jalový výkon filtrace pak je:

$$Q_{CFiltr} = Q_C - Q_L$$

KAPITOLA 3

3 Analýza soustavy v okolí rozvodny Krasíkov

Pro určení potřebného kompenzačního výkonu je nejprve nutno vytvořit analýzu zadané části přenosové soustavy. V této práci má být kompenzační zařízení umístěno v rozvodně PS Krasíkov. V rozvodně Krasíkov (R Krasíkov) se nacházejí jediné dva rotační kompenzátory v přenosové soustavě ČR. Rotační kompenzátory mají každý maximální výkon 100 MVAR a jsou zapojeny do terciárních vyunutí transformátorů T401 a T402. Oba stroje jsou v majetku ČEZ Distribuce a bude počítáno s jejich provozem (maximálním kompenzačním výkonem).

Udržované napětí v R Krasíkov bude $U = 416$ kV, s možností regulace o -1 kV při minimálním zatížení soustavy a $+1$ kV při maximálním zatížení. Napětí okolní soustavy v krajních rozvodnách zadané oblasti bude také 416 kV.

Při výpočtech minimálního zatížení bude uvažována odstávka elektráren Chvaletice a Dlouhé Stráně. Pro maximální zatížení budou v provozu 2 bloky Chvaletic a 1 blok Dlouhých Strání. Pro obě varianty budou vypočteny napěťové tvrdosti jednotlivých uzlů (rozveden).

3.1 Rozsah uvažované oblasti

Okraje výřezu PS jsou určeny rozvodnami na koncích vedení zaústěných do R Krasíkov. Detailně se jedná o R Dlouhé Stráně, R Horní Životice, R Neznášov, R Prosenice a R Týnec.



Obr. 18: Zadaný výřez přenosové soustavy [47]

3.2 Výchozí stav PS pro výpočty

Výpočty budou provedeny s ohledem na Plán rozvoje přenosové soustavy České republiky 2014 - 2023, vypracovaný provozovatelem přenosové soustavy. Dle tohoto dokumentu má být do R Krasíkov zaústěno celkem 7 (sedm) vedení. Maximální počet transformátorů vazby PS/DS na rozvodnu je stanoven na 3 [31]. Tento stav je již v rozvodně k dnešnímu dni, 1. 4. 2014. Možnost, jak do budoucna zvýšit transformační výkon je výměna strojů za stroje s vyšším výkonem. Momentálně se v R Krasíkov nacházejí stroje s výkonem 350 MVA.

vedení	druh vedení	typ stožáru	délka [km]
V401	dvojité / společný stožár	DONAU	103,8
V801			
V402	dvojité / společný stožár	DONAU	87,6
V802			
V453	jednoduché	PORTÁL	84,1
V457	dvojité / společný stožár; jednoduché	DONAU / DELTA	25 / dvojité; 34,8
V458			25 / dvojité; 54,3

Tab. 6: Typy použitých stožárů a délky vedení [32, 33, 34]

vedení	použité fázové vodiče (3-svazek)	maximální zatížitelnost vedení [A]
V401	490 - AL1/64 - ST1A	2500
V801		
V402		
V802		
V453	450 AlFe 6	1740
V457	450 AlFe 8	1500
V458	450 AlFe 8 / 430 - AL1/100 - ST1A	2500

Tab. 7: Použité fázové vodiče a maximální zatížitelnost vedení [30, 32 - 35]

Pro analýzu jsou důležité toky mezi PS a DS a zapojení rozveden, které bývá celoročně stejné nebo se může lišit podle predikce výkonů. Většinou se zapojení liší ve velkých rozvodnách (velký instalovaný výkon), jako je například R Krasíkov. Zapojení rozveden jsou v tzv. letním

nebo zimním režimu.

rozvodna	transformátory	počet TR v provozu	
		letní režim	zimní režim
Horní Životice	2x 400/121/10,5 kV; 250 MVA	1	2
Krasíkov	3x 400/121/10,5 kV; 350 MVA	2	3
Neznášov	2x 400/121/10,5 kV; 350 MVA	2	2
Prosenice	1x 400/121/10,5 kV; 350 MVA 3+1x 400/231/34 kV; 166,6 MVA	2	2
Týnec	2x 400/121/10,5 kV; 350 MVA	2	2

Tab. 8: Instalovaný transformační výkon (rozvodna 420 kV) a zapojení rozveden podle režimu provozu [35, 40]

stožár	Delta – 2 zemní lana; základní výška 33,85 m				Donau – 2 zemní lana; základní výška 46 m			
	F1	F2	F3	ZL	F1	F2	F3	ZL
vodič								
h [m]	27,15	17,15	-17,15	33,35	33,9	22,4	22,4	45,5
x [m] od osy stož.	0	8	-8	6,6	10,7	14,5	7,5	8,5

Tab. 9: Parametry stožárů použitých pro vedení [32, 41]

Příklad výpočtu indukčnosti a kapacity vedení – DELTA, 430-A11/100-ST1A

Reaktance:

$$d_s = \sqrt[3]{d_{12} \cdot d_{13} \cdot d_{23}} = d_s = \sqrt[3]{(27,15 - 17,15)^2 + 8^2 \cdot 2 \cdot 8} = 13,79 \quad [\text{m}]$$

$$r_e = r \cdot \frac{1}{n} \cdot m^{\frac{n-1}{n}} = 14,95^{\frac{1}{3}} \cdot 400^{\frac{2}{3}} = \sqrt[3]{14,95 \cdot 400^2} = 133,74 \quad [\text{mm}]$$

$$k_e = \sqrt[n]{k} = \sqrt[3]{0,826} = 0,938$$

$$L_k = 0,46 \cdot \log \frac{d_s}{k_e \cdot r_e} = 0,46 \cdot \log \frac{13,79}{0,938 \cdot 133,74 \cdot 10^{-3}} = 0,9389 \quad \left[\frac{\text{mH}}{\text{km}} \right]$$

$$X_k = \omega \cdot L_k = 2 \cdot \pi \cdot f \cdot L_k = 2 \cdot \pi \cdot 50 \cdot 0,9389 \cdot 10^{-3} = 0,295 \quad \left[\frac{\Omega}{\text{km}} \right]$$

Susceptance:

$$h = \sqrt[3]{h_{12} \cdot h_{13} \cdot h_{23}} = \sqrt[3]{27,15 \cdot 17,15^2} = 19,99 \quad [\text{m}]$$

$$h_{zs} = \sqrt[5]{h_{12} \cdot h_{13} \cdot h_{23} \cdot h_{z1} \cdot h_{z2}} = \sqrt[5]{27,15 \cdot 17,15^2 \cdot 33,35^2} = 24,53 \quad [\text{m}]$$

$$a_{zz} = 13,2 \quad [\text{m}]$$

$$a_{zv} = \sqrt[3]{\sqrt{(33,35 - 27,15)^2 + 6,6^2} \cdot \sqrt{(33,35 - 17,15)^2 + (8 - 6)^2} \cdot \sqrt{(33,35 - 17,15)^2 + (8 + 6)^2}} = 14,75 [\text{m}]$$

$$\delta = \frac{\log \frac{2 \cdot h}{r_e}}{0,0242} = \frac{\log \frac{2 \cdot 19,99}{133,74 \cdot 10^{-3}}}{0,0242} = 102,3 \quad \left[\frac{\text{km}}{\mu\text{F}} \right]$$

$$\delta' = \frac{\log \frac{\sqrt{4 \cdot h^2 + d_s^2}}{d_s}}{0,0242} = \frac{\log \frac{\sqrt{4 \cdot 19,99^2 + 13,79^2}}{13,79}}{0,0242} = 20,11 \quad \left[\frac{\text{km}}{\mu\text{F}} \right]$$

$$\delta_{z0} = \frac{\log \frac{2 \cdot h_z}{r_z}}{0,0242} = \frac{\log \frac{2 \cdot 33,35}{11,05 \cdot 10^{-3}}}{0,0242} = 156,23 \quad \left[\frac{\text{km}}{\mu\text{F}} \right]$$

$$\delta_{zv} = \frac{\log \frac{\sqrt{4 \cdot h_{zs}^2 + a_{zv}^2}}{a_{zv}}}{0,0242} = \frac{\log \frac{\sqrt{4 \cdot 24,53^2 + 14,75^2}}{14,75}}{0,0242} = 22,34 \quad \left[\frac{\text{km}}{\mu\text{F}} \right]$$

$$\delta_{zz} = \frac{\log \frac{\sqrt{4 \cdot h_z^2 + a_{zz}^2}}{a_{zz}}}{0,0242} = \frac{\log \frac{\sqrt{4 \cdot 33,35^2 + 13,2^2}}{13,2}}{0,0242} = 29,42 \quad \left[\frac{\text{km}}{\mu\text{F}} \right]$$

$$\delta_s = \frac{n \cdot \delta_{zv}^2}{\delta_{z0} + (n - 1) \cdot \delta_{zz}} = \frac{2 \cdot 22,34^2}{156,23 + 29,42} = 5,38 \quad \left[\frac{\text{km}}{\mu\text{F}} \right]$$

$$C_k = \frac{1}{N - N'} = \frac{1}{(102,3 - 5,38) - (20,11 - 5,38)} = 12,1671 \quad \left[\frac{\text{nF}}{\text{km}} \right]$$

$$B_k = \omega \cdot C_k = 2 \cdot \pi \cdot f \cdot C_k = 2 \cdot \pi \cdot 50 \cdot 12,1671 = 3,8224 \quad \left[\frac{\mu\text{S}}{\text{km}} \right]$$

Vodiče	Stožár	R _k [Ω/km]	X _k [Ω/km]	B _k [μS/km]
3x 450 AlFe 6	Portál	0,0217	0,3074	3,7112
3x 450 AlFe 6	Delta	0,0217	0,2968	3,7894
3x 450 AlFe 8	Delta	0,0225	0,2976	3,7795
3x 430-Al1/100-ST1A	Delta	0,0224	0,2963	3,7906
3x 450 AlFe 8	Donau	0,0225	0,2777	4,0384
3x 490-AL1/64-ST1A	Donau	0,0197	0,2763	4,0584

Tab. 10: Parametry venkovních vedení 400 kV

3.3 Zkratové poměry v uzlech sítě

Pro zjištění citlivosti napětí v uzlu sítě ($\Delta Q/\Delta U$) musíme nejdříve zjistit počáteční trojfázové zkratové proudy. Z těchto proudů, respektive zkratových výkonů v uzlech sítě, lze zjistit citlivost. Pro výpočty zkratových proudů je nutné znát nejen parametry vedení, ale i zkratové výkony okolní soustavy a parametry elektrárenských bloků zapojených do vybrané části přenosové soustavy.

Elektrárna Dlouhá Stráně (EDST)				Elektrárna Chvaletice (ECHV)			
generátor		blok. transformátor		generátor		blok. transformátor	
S _{rG} [MVA]	355,5	S _{rT} [MVA]	360	S _{rG} [MVA]	235	S _{rT} [MVA]	250
u _{rG} [kV]	22 ± 5%	U _{rTLV}	22	u _{rG} [kV]	15,75 ± 5%	U _{rTLV}	15,75
cos φ _{rG}	0,9	U _{rTHV}	420 ± 2x2,5%	cos φ _{rG}	0,85	U _{rTHV}	420 ± 2x2,5%
x _{d''}	0,3	u _k	0,14 ± 0,1	x _{d''}	0,204	u _k	0,14 ± 0,1

Tab. 11: Parametry generátorů a blokových transformátorů připojených do zadaného výjezu přenosové soustavy [25 – 27]

Příklad přepočtu parametrů elektrárenského bloku (ECHV) bez přepínání odboček transformátoru pod zatížením podle ČSN EN 60909-0 :

Impedance generátoru

$$Z_{rG} = \frac{U_{rG}^2}{S_{rG}} = \frac{15,75^2}{235^2} = 1,056$$

$$X_{d''} = Z_{rG} \cdot x_{d''} = 1,36 \cdot 0,204 = 0,215$$

$$R_G = 0,05 \cdot X_{d''} = 0,05 \cdot 0,215 = 0,0108$$

$$Z_G = (R_G + jX_{d''}) = 0,0108 + j0,215 \quad [\Omega]$$

Korekční součinitel pro elektrárenský blok

$$K_{SO} = \frac{U_{nQ}}{U_{rG} \cdot (1 + p_G)} \cdot \frac{U_{rTLV}}{U_{rTHV}} \cdot (1 \pm p_T) \cdot \frac{c_{max}}{1 + x_d'' \cdot \sin \varphi_{rG}}$$

$$K_{SO} = \frac{400}{15,75} \cdot \frac{15,75}{420} \cdot \frac{1,1}{1 + 0,204 \cdot \sin(\cos^{-1} 0,85)} = 0,94596$$

Impedance blokového transformátoru vztažená na stranu 420 kV

$$Z_{THV} = u_k \cdot \frac{U_{rTHV}^2}{S_{rT}} = 0,14 \cdot \frac{420^2}{250} = j98,784 \quad [\Omega]$$

Impedance celého elektrárenského bloku

$$Z_{SO} = K_{SO} \cdot (t_r^2 \cdot Z_G + Z_{THV})$$

$$Z_{SO} = 0,94596 \cdot \left[\left(\frac{420}{15,75} \right)^2 \cdot (0,0108 + j0,215) + j98,784 \right] = 7,2448 + j238,0725 \quad [\Omega]$$

$$|Z_{SO}| = \sqrt{7,2448^2 + 238,0725^2} = 238,2 \quad [\Omega]$$

Příklad přepočtu parametrů vedení (V401/801) podle ČSN EN 60909-0:

$$Z_V = (R_k \cdot l + jX_k \cdot l) = (0,0197 \cdot 103,8 + j0,2763 \cdot 103,8) = 2,0414 + j28,6799 \quad [\Omega]$$

$$|Z_{SO}| = \sqrt{2,0414^2 + 28,6799^2} = 28,75 \quad [\Omega]$$

Příklad přepočtu zkratového výkonu soustavy (síťový napáječ) na impedanci (R Horní Životice; minimální zatížení) podle ČSN EN 60909-0:

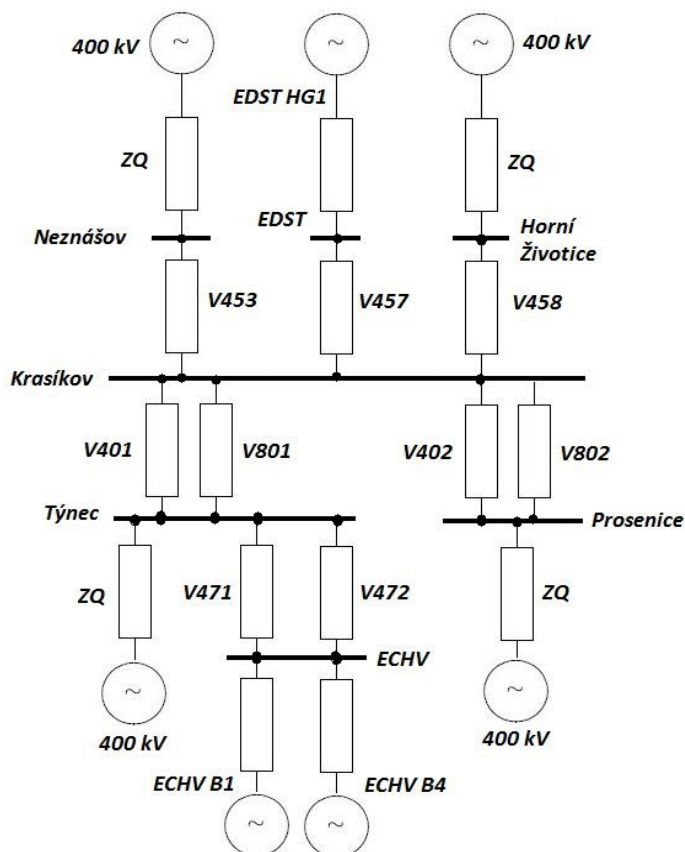
rozvodna	zvolené				minimální podle Kodexu PS	
	minimální zatížení		maximální zatížení		$I_k^{(3)''}$ [kA]	$S_{ks}^{(3)''}$ [MVA]
	$I_k^{(3)''}$ [kA]	$S_{ks}^{(3)''}$ [MVA]	$I_k^{(3)''}$ [kA]	$S_{ks}^{(3)''}$ [MVA]		
Horní Životice	6	4157	12	8314	2,887	2000
Neznášov	10	6928	20	13856		
Prosenice	12	8314	24	16628		
Týnec	15	10392	30	20785		

Tab. 12: Zvolené a minimální [29] zkratové výkony okolní soustavy připojené do dané rozvodny

$$Z_Q = \frac{c \cdot U_n}{\sqrt{3} \cdot I_k^{(3)''}} = \frac{400}{\sqrt{3} \cdot 12} = 19,25 \quad [\Omega]$$

vedení	Z_v [Ω]	vedení; blok	$Z_v; Z_{so}$ [Ω]	rozvodna	Z_Q [Ω]	Z_{QK} [Ω]
V401/801	28,75	V457	17,35	H. Životice	19,25	80
V402/802	24,27	V471/472	2,45	Neznášov	11,55	
V453	25,92	EDST	201,58	Prosenice	9,62	
V458	23,10	ECHV	238,18	Týnec	7,7	

Tab. 13: Vypočtené impedance vedení, elektrárenských bloků a okolní soustavy



Obr. 19: Zadaný výřez soustavy s elektrárenskými bloky, které budou zahrnuty do výpočtů

Příklad výpočtu impedance přenosové soustavy – R Týnec při odstávce ECHV a EDST; zvolené maximální zatížení:

$$Z_{SK} = \frac{Z_{NK} \cdot Z_{HZK} \cdot Z_{PK}}{Z_{NK} \cdot Z_{HZK} + Z_{NK} \cdot Z_{PK} + Z_{HZK} \cdot Z_{PK}}$$

$$Z_{SK} = \frac{37,47 \cdot 42,35 \cdot 21,755}{37,47 \cdot 42,35 + 37,47 \cdot 21,755 + 42,35 \cdot 21,755} = 10,388 \quad [\Omega]$$

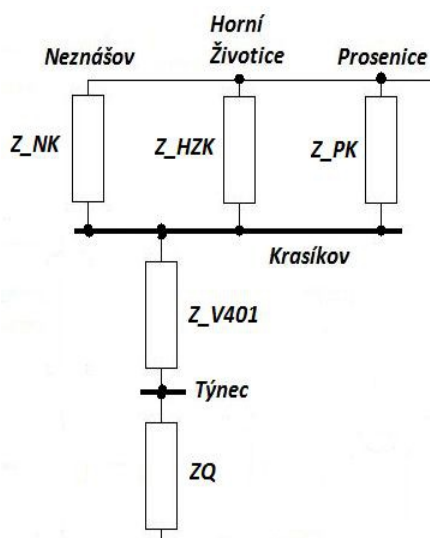
Z_{SK} – celková impedance z pohledu R Krasíkov; vedení V402/802, V453 a V458 a okolní soustava

Z_{NK} – impedance okolní soustavy připojené do R Neznášov a vedení V453 do R Krasíkov

Z_{HZK} – impedance okolní soustavy připojené do R Horní Životice a vedení V458 do R

Krasíkov

Z_{PK} – impedance okolní soustavy připojené do R Prosenice a vedení V402/802 do R Krasíkov



Obr. 20: Upravená soustava pro výpočet zkratových proudů

$$Z_{CT} = \frac{\left(Z_{SK} + \frac{Z_{V401}}{2} \right) \cdot Z_{QT}}{Z_{SK} + \frac{Z_{V401}}{2} + Z_{QT}} = \frac{(10,388 + 14,375) \cdot 7,7}{10,388 + 14,375 + 7,7} = 5,87 \quad [\Omega]$$

Z_{CT} – celková impedance z pohledu R Týnec

Z_{V401} – impedance vedení V401/801

Z_{QT} – impedance okolní soustavy připojené do R Týnec

provoz elektráren / rozvodna	Z_C [Ω]					
	zvolené $S_{KS}^{(3)''}$				minimální $S_{KS}^{(3)''}$ podle Kodexu PS	
	minimální		maximální		bez ECHV; EDST	ECHV 2 bloky; EDST 1 blok
	bez ECHV; EDST	ECHV 2 bloky; EDST 1 blok	bez ECHV; EDST	ECHV 2 bloky; EDST 1 blok		
H. Životice	18,26	18,03	11,96	11,90	32,76	29,83
Krasíkov	9,80	9,20	7,06	6,80	24,64	19,77
Neznášov	14,39	14,25	8,66	8,64	33,63	30,86
Prosenice	11,13	10,90	6,75	6,70	29,11	25,44
Týnec	10,06	9,18	5,87	5,58	29,89	22,78

Tab. 14: Vypočtené hodnoty „viděných“ impedancí z pohledu dané rozvodny

Příklad výpočtu počátečního souměrného zkratového proudu – R Týnec při odstávce ECHV a EDST; zvolené maximální zatížení:

$$I_k^{(3)''} = \frac{U_n}{\sqrt{3} \cdot Z_{CT}} = \frac{400}{\sqrt{3} \cdot 5,87} = 39,32 \quad [\text{kA}]$$

provoz elektráren / rozvodna	$I_k^{(3)''}$ [kA]					
	zvolené $S_{KS}^{(3)''}$				minimální $S_{KS}^{(3)''}$ podle Kodexu PS	
	minimální		maximální			
	bez ECHV; EDST	ECHV 2 bloky; EDST 1 blok	bez ECHV; EDST	ECHV 2 bloky; EDST 1 blok	bez ECHV; EDST	ECHV 2 bloky; EDST 1 blok
H. Životice	12,65	12,81	19,31	19,40	7,05	9,08
Krasíkov	23,58	25,11	32,69	33,97	9,37	11,68
Neznášov	16,05	16,20	26,66	26,74	6,87	7,48
Prosenice	20,75	21,18	34,23	34,49	7,93	9,08
Týnec	22,97	25,15	39,32	41,42	7,73	10,14

Tab. 15: Vypočtené počáteční souměrné zkratové proudy pro jednotlivé rozvodny zadané části PS při zvolených a minimálních zkratových výkonech soustavy

Příklad výpočtu citlivosti $\Delta Q/\Delta U$ v uzlu – R Týnec při odstávce ECHV a EDST; zvolené maximální zatížení:

$$\frac{\Delta Q}{\Delta U} = \sqrt{3} \cdot I_k^{(3)''} = \sqrt{3} \cdot 39,32 = 68,10 \quad \left[\frac{\text{MVar}}{\text{kV}} \right]$$

provoz elektráren / rozvodna	$\Delta Q/\Delta U$ [MVar/kV]					
	zvolené $S_{KS}^{(3)''}$				minimální $S_{KS}^{(3)''}$ podle Kodexu PS	
	minimální		maximální			
	bez ECHV; EDST	ECHV 2 bloky; EDST 1 blok	bez ECHV; EDST	ECHV 2 bloky; EDST 1 blok	bez ECHV; EDST	ECHV 2 bloky; EDST 1 blok
H. Životice	21,90	22,19	33,45	33,60	12,21	13,41
Krasíkov	40,84	43,50	56,63	58,84	16,24	20,23
Neznášov	27,81	28,06	46,18	46,32	11,89	12,96
Prosenice	35,95	36,69	59,28	59,74	13,74	15,72
Týnec	39,78	43,55	68,10	71,74	13,38	17,56

Tab. 16: Vypočtené hodnoty citlivostí $\Delta Q/\Delta U$ pro jednotlivé uzly zadané části PS

3.4 Určení indukčního a kapacitního výkonu kompenzačního zařízení

Kompenzační zařízení v R Krasíkov bude pracovat jako doplnění k synchronním kompenzátorům. Elektrárna Chvaletice bude z ekonomických důvodů omezovat provoz pouze na 2 bloky (limity těžby uhlí; nízká výkupní cena elektřiny, kvůli OZE).

Při výpočtu L jsou ECHV a EDST odstavené a kompenzační tlumivky v R Prosenice jsou v provozu. Do výpočtů bude zahrnuta pouze jedna tlumivka, druhá vypomáhá okolní soustavě a soustavě 220 kV. U výpočtu hodnoty C uvažuji práci dvou blouků ECHV (ECHV B1, B4) a jednoho bloku EDST (EDST HG1). V obou případech předpokládám práci synchronních kompenzátorů v R Krasíkov. Ostatní podmínky jsou uvedeny v tabulkách č. 17 a 18.

hodnoty pro výpočet L; ECHV a EDST odstávka				
činné toky vedením		toky PS/DS		
vedení	P [MW]	rozvodna	P [MW]	Q [MVar]
V401/801	224	Týnec	80,2	27
V402/802	168,6	Prosenice	59,9	29,2
V453	74,7	Neznášov	106,9	37,6
V457	0,3	Krasíkov	109,5	40,6
V458	37,5	H. Životice	77,5	22,4

Tab. 17: Hodnoty výkonů odebíraných v rozvodnách a činných výkonů přenášených vedeními potřebné pro výpočet indukčnosti kompenzačního zařízení

hodnoty pro výpočet C; ECHV 2 bloky, EDST 1 blok				
činné toky vedením		toky PS/DS		
vedení	P [MW]	rozvodna	P [MW]	Q [MVar]
V401/801	1760	Týnec	256,7	97,2
V402/802	1798	Prosenice	191,6	125
V453	515,3	Neznášov	342,2	135,3
V457	325	Krasíkov	349,3	146
V458	453	H. Životice	248,1	80,7

Tab. 18: Hodnoty výkonů odebíraných v rozvodnách a činných výkonů přenášených vedeními potřebné pro výpočet kapacity kompenzačního zařízení

Výpočty vyžadují znalost jalových výkonů kompenzačních zařízení a elektrárenských bloků. Jedná se o QXN – regulační rozsah výrobní jednotky ve směru přebuzení, certifikovaný při

P_n , QXN - regulační rozsah výrobní jednotky ve směru přebuzení, certifikovaný při P_{min} ,
 QMN – regulační rozsah výrobní jednotky ve směru podbuzení, certifikovaný při P_n
 a QMM – regulační rozsah výrobní jednotky ve směru podbuzení, certifikovaný při P_{min} .
 Certifikované výkony je možné najít např. v [35].

blok	QXN [MVar]	QXM [MVar]	QMN [MVar]	QMM [MVar]	prostředky v rozvodnách	Q [MVar]
ECHV B1	112	109	-64	-75	tlumivka R Prosenice	-45
ECHV B2	138	123	-69	-80		
ECHV B3	124	113	-66	-79	synchronní kompenzátor R Krasíkov	+100/-50
ECHV B4	116	109	-65	-77		
EDST HG1	132	148	-44	-114		
EDST HG2	162	143	-51	-114		

Tab. 19: Certifikované hodnoty jalových výkonů elektrárenských bloků, tlumivek a synchronních kompenzátorů připojených do zadané části PS

Další podmínkou potřebnou k výpočtu jsou udržovaná napětí v rozvodnách PS. Hlavní hodnota je v R Krasíkov a tu volím podle plánovacího napětí provozovatele přenosové soustavy pro R 400 kV – $U = 416$ kV. V ostatních rozvodnách, v Týnci bez provozu ECHV, je uvažováno napětí $U = 414,5$ kV, což přibližně odpovídá poklesu napětí na vedení mezi R Krasíkov a danou rozvodnou při přenosu přirozeného výkonu vedení.

Jelikož je R Týnec provozována jako tzv. pilotní uzel, hodnotu napětí udává Kodex PS na $U = 413$ kV, ale pro moje výpočty bude napětí zvýšeno na $U = 415$ kV. Tato hodnota bude uvažována při provozu ECHV (výpočet C). Vycházím z vypočtených hodnot, kdy s provozem ECHV by se zbytečně snižovalo U v R Týnec.

Příklad výpočtu jalového výkonu Q generovaného/spotřebovaného vedením – V457 při odstávce ECHV a EDST:

$$\delta = \arcsin \frac{P_R \cdot Z_c \cdot \sin \Theta}{U_R \cdot U_S} = \arcsin \frac{0,3 \cdot 272,78 \cdot \sin(0,001 \cdot 59,8)}{(416)^2} = 2,828 \cdot 10^{-5}$$

$$Q_R = \frac{U_R \cdot (U_S \cdot \cos \delta - U_R \cdot \cos \Theta)}{Z_c \cdot \sin \Theta} = \frac{416 \cdot [416 \cdot \cos \delta - 416 \cdot \cos(0,001 \cdot 59,8)]}{272,78 \cdot \sin(0,001 \cdot 59,8)} = 18,97 \text{ [MVar]}$$

$$Q_S = \frac{-U_S \cdot (U_R \cdot \cos \delta - U_S \cdot \cos \Theta)}{Z_c \cdot \sin \Theta}$$

$$Q_S = \frac{-416 \cdot [416 \cdot \cos \delta - 416 \cdot \cos(0,001 \cdot 59,8)]}{272,78 \cdot \sin(0,001 \cdot 59,8)} = -18,97 \text{ [MVar]}$$

Celkový jalový výkon generovaný vedením:

$$Q_V = Q_R - Q_S = 18,97 - (-18,97) = 37,95 \quad [\text{MVar}]$$

Q_V – jalový výkon generovaný/spotřebovaný vedením

Q_S – jalový výkon, který je potřeba odebrat/dodat na „vysílacím“ (tok P z uzlu) konci vedení, pro udržení rovného napěťového profilu na vedení

Q_R – jalový výkon, který je potřeba odebrat/dodat na „přijímacím“ (tok P do uzlu) konci vedení, pro udržení rovného napěťového profilu na vedení

Pro určení celkové hodnoty Q pro jednotlivé linky zadané části PS je potřeba vzít v úvahu i toky PS/DS v rozvodnách. Jelikož uvažují, že v krajních rozvodnách soustavy jsou nulové příspěvky Q od okolní soustavy, musím odběry Q v rozvone přičíst k velikosti Q potřebného pro vedení. V tabulce jsou uvedeny hodnoty Q pro jednotlivá vedení s respektováním odběrů/dodávek v koncových rozvodnách.

vedení	minimální zatížení – výpočet L		maximální zatížení – výpočet C	
	Q_V [MVar]	$Q_{V\text{potř}}$ [MVar]	Q_V [MVar]	$Q_{V\text{potř}}$ [MVar]
V401	66,40	-52,90	-53,15	-12,25
V801	66,40	-52,90	-53,15	-12,25
V402	56,58	-16,72	-50,85	113,35
V802	56,58	-16,72	-50,85	113,35
V453	49,13	-11,55	11,71	123,59
V457	37,95	-35,55	27,48	-157,08
V458	49,34	-26,92	22,94	57,76

Tab. 20: Vypočtené hodnoty potřebných jalových výkonů pro jednotlivá vedení s respektováním dodávek z ECHV, EDST, kompenzačních tlumivků v R Prosenice a toků PS/DS a v koncových rozvodnách;
 $Q_{V\text{potř}}$ – celkový potřebný jalový výkon pro jednotlivá vedení (- induktivní; + kapacitní)

Výpočet potřebné hodnoty induktivního a kapacitního výkonu kompenzačního zařízení:

$$Q_{\text{KOMP}} = Q_{\text{VKRA}} + Q_{\Delta U} - 2 \cdot Q_{\text{SK}} = 172,71 + 40,84 - 2 \cdot (-50) = 113,55 \quad \text{ind} \quad [\text{MVar}]$$

$\sum Q_{V\text{potř}}$ – celkový potřebný jalový výkon pro všechna vedení (+ kapacitní, - induktivní)

Q_{VKRA} – jalový výkon potřebný pro zadanou část PS

$Q_{\Delta U}$ – jalový výkon potřebný pro změnu napětí o +1 kV při maximálním zatížení a -1 kV při minimálním zatížení

Q_{SK} – výkon synchronního kompenzátoru

Q_{KOMP} – potřebný jalový výkon kompenzačního zařízení doplňujícího synchronní kompenzátory po započítání jejich výkonu

$Q_{\text{min}}, Q_{\text{max}}$ – hodnoty jalových výkonů pro podmínky minimálního/maximálního zatížení sítě

R Krasíkov	Q_{\min} [MVar]	Q_{\max} [MVar]
$\Sigma Q_{Vpotř}$	-213,27	226,47
Q_{VKRA}	-172,71	372,47
$Q_{\Delta U}$	-40,84	58,84
Q_{SK}	-100	200
Q_{KOMP}	-113,55	231,31

Tab. 21: Vypočtené hodnoty potřebných indukčních a kapacitních jalových výkonů kompenzačního zařízení

Kompenzační zařízení bude navrženo s minimálním výkonem 113,55 MVar induktivní a 231,31 MVar kapacitní. Konečná hodnota bude určena podle možností reálných tlumivek a kondenzátorů, zároveň budou přepočteny možnosti regulace U .

KAPITOLA 4

4 Návrh kompenzačního zařízení

Síťový transformátor do jehož terciárního vinutí bude SVC připojeno má jmenovité hodnoty výkonů 350/350/100 MVA. Podle zadávací dokumentace společnosti ČEPS a.s., pro nákup nových transformátorů, může být terciární vinutí trvale zatěžováno kompenzačním výkonem 90 MVA_r.

Z tohoto hlediska plyne podmínka dodávaného výkonu z SVC max. 90 MVA_r. U induktivního výkonu toto není problém, jelikož SVC i s transformátorem splní hodnotu potřebného odebíraného jalové výkonu. U kapacitní části předpokládám maximální dovolený výkon řízené části SVC, který po odečtení hodnoty potřebné pro provoz transformátoru odpovídá výkonu pro zvýšení napětí v uzlu o 1 kV, při maximálním zatížení soustavy.

Další potřebný kapacitní výkon bude dodáván pomocí kondenzátorových baterií připojených přímo na 400 kV.

4.1 Návrh indukčnosti

Začínám s hodnotou $Q_L = 90$ MVA_r, při $U_n = 10,5$ kV.

$$X_L = \frac{U_n^2}{Q_L} = \frac{10,5^2}{90} = 1,225 \quad [\Omega; \text{kV}, \text{MVA}_r]$$

$$L = \frac{X_L}{\omega} = \frac{1,225}{100\pi} = 3,9 \cdot 10^{-3} \quad [\text{H}; \Omega, \text{rad}]$$

X_L – impedance tlumivek
 Q_L – výkon tlumivek
 U_n – jmenovité napětí sítě

4.2 Návrh filtračního řetězce

Každý filtr bude zatěžován nejen proudem první harmonické procházející kondenzátorem, ale i proudem vyšších harmonických. Nejvíce právě harmonickou, na kterou je naladěn. Proud harmonické je dán proudem zátěže, v tomto případě proudem kompenzačních tlumivek.

$$I_L = \frac{Q_L}{\sqrt{3} \cdot U_n} = \frac{90}{\sqrt{3} \cdot 10,5} = 4,949 \quad [\text{kA}; \text{kV}, \text{MVA}_r]$$

I_L – proud dodávaný tlumivkami
 Q_L – výkon tlumivek
 U_n – jmenovité napětí sítě

harmonická	I_1/I_h [%]	harmonická	I_1/I_h [%]
1	100	23	0,24
5	5,05	25	0,20
7	2,59	29	0,15
11	1,05	31	0,13
13	0,75	35	0,09
17	0,44	37	0,08
19	0,35		

Tab. 22: Maximální amplituda proudových harmonických produkovaných tyristory [5, 20]; harmonické nad 31. mohou být i nižší

4.3 Výpočet THD_V a THD_I

Nejdříve potřebuji zjistit, na které harmonické budu muset navrhnout filtry. Takže si musím spočítat THD pro napětí a proud, zda se vejdu do limitů daných normou. Potřebuji také impedanci sítě pro dané harmonické, jejíž výpočet je stejný jako výpočet zkratové impedance sítě. Pro 1. harmonickou je $Z = 0,32 \Omega$ pro nejnižší zatížení sítí a $Z=0,28 \Omega$ pro nejvyšší. EN 50160 udává limity pro napěťové harmonické pro napěťovou hladinu $1 \text{ kV} < U_n \leq 35 \text{ kV}$.

liché harmonické		sudé harmonické		násobky 3. harmonické	
h	% U_1	h	% U_1	h	% U_1
5	6	2	2	3	5
7	5				
11	3,5	4	1	9	1,5
13	3				
17	2	6	0,5	15	0,5
19	1,5				
23	1,5	8...24	0,5	21	0,5
25	1,5				
$THD_V \leq 8\%$ do 40. harmonické včetně					

Tab. 23: Dovolené amplitudy harmonických napětí v procentech 1. harmonické a maximální THD pro sítě s $1 \text{ kV} < U_n \leq 35 \text{ kV}$ podle EN 50160

Pro případ bez filtrů vychází $THD_V = 18,05 \%$ pro nejnižší zatížení sítí, respektive

$THD_V = 20,63\%$ pro nejvyšší zatížení, což nesplňuje normou dané hodnoty. Velikosti jednotlivých napěťových harmonických jsou nižší než udává norma kromě 5. harmonické.

THD_I vychází $11,12\%$, což je víc jak dvojnásobek povolený normou IEEE-519 ($THD_I \leq 5\%$). Jediná harmonická, která je mimo hodnoty povolené normou je 5. harmonická, na kterou budu navrhovat filtr jako první a později i na další, dokud nebudou hodnoty pod povoleným limitem.

4.4 Návrh filtru 5. harmonické

Počáteční výkon kondenzátorové baterie filtru volím $Q_C = 10 \text{ MVAR}$ a jmenovité napětí kondenzátoru $U_{nC} = 12 \text{ kV}$.

$$X_{C1} = \frac{U_{nC}^2}{Q_C} = \frac{12^2}{10} = 14,4 \quad [\Omega; \text{kV}, \text{MVAR}]$$

X_{C1} – impedance kondenzátoru pro 1. harmonickou

Výpočet sériové indukčnosti tvořící rezonanční obvod filtru:

$$X_{L1} = \frac{X_C}{h^2} = \frac{14,4}{5^2} = 0,576 \quad [\Omega; \Omega, -]$$

X_{L1} – impedance tlumivky pro 1. harmonickou
h – pořadí harmonické na kterou ladíme filtr

Nyní musíme zjistit, zda dané parametry odpovídají maximálním možným hodnotám pro výkon, proud a napětí kondenzátoru podle IEEE-18.

Výpočet proudu procházejícího kondenzátorem:

$$I_1 = \frac{U_{fn}}{X_C - X_L} = 1,05 \cdot \frac{10500}{\sqrt{3} \cdot 14,4 - 0,576} = 460,45 \quad [\text{A}; -, \text{kV}, \Omega, \Omega]$$

I_1 – proud 1. harmonické procházející filtračním řetězcem

U_{fn} – fázové napětí sítě

1,05 – praktická konstanta respektující maximální fázové napětí na kondenzátoru

$$I_5 = 0,0505 \cdot I_L = 0,0505 \cdot \frac{4948,72}{\sqrt{3}} = 144,29 \quad [\text{A}; -, \text{A}]$$

$$I_{\text{CRMS}} = \sqrt{(I_1^2 + I_5^2)} = \sqrt{(460,45^2 + 144,29^2)} = 482,53 \quad [\text{A}; \text{A}, \text{A}]$$

I_{CRMS} – střední hodnota proudu procházející kondenzátorem

Výpočet napětí na kondenzátoru:

$$X_{C5} = \frac{X_{C1}}{h} = \frac{14,4}{5} = 2,88 \quad [\Omega; \Omega, -]$$

X_{C5} – impedance kondenzátoru pro 5. harmonickou

$$U_{Cp} = \sqrt{2}(U_{C1} + U_{C5}) = \sqrt{2}(X_{C1}I_1 + X_{C5}I_5)$$

$$U_{Cp} = \sqrt{2}(14,4 \cdot 460,45 + 2,88 \cdot 144,29) = 9965 \quad [V; \Omega, A]$$

U_{Cp} – špičkové napětí na kondenzátoru

$$U_{CRMS} = \sqrt{U_{C1}^2 + U_{C5}^2} = \sqrt{(X_{C1}I_1)^2 + (X_{C5}I_5)^2}$$

$$U_{CRMS} = \sqrt{(14,4 \cdot 460,45)^2 + (2,88 \cdot 144,29)^2} = 6643 \quad [V; \Omega, A]$$

U_{CRMS} – střední hodnota napětí na kondenzátoru

Výpočet dodávaného jalového výkonu:

$$Q_{1f} = \frac{U_{CRMS} I_{CRMS}}{10^6} = \frac{482,53 \cdot 6643}{10^6} = 3,205 \quad [MVar; V, A]$$

Q_{1f} – kondenzátorem dodávaný výkon na jednu fázi

$$Q_{3f} = Q_{1f} \cdot 3 = 3,205 \cdot 3 = 9,615 \quad [MVar; MVar, -]$$

Q_{3f} – dodávaná trojfázová hodnota jalového výkonu

$$Q_{Cpřep} = Q_C \cdot \left(\frac{U_n}{U_{nC}}\right)^2 = 10 \cdot \left(\frac{10,5}{12}\right)^2 = 7,656 \quad [MVar; kV, kV]$$

$Q_{Cpřep}$ – jmenovitá hodnota jalového výkonu kondenzátoru přepočtená na hodnotu síťového napětí

Zjištění plnění limitu daných IEEE-18:

$$\frac{U_{CRMS}}{U_{fC}} = \frac{6643}{\frac{12000}{\sqrt{3}}} = \frac{6643}{6928} = 0,959 \quad [pu; V, V]$$

U_{fC} – fázové napětí přepočtené ze zvoleného napětí kondenzátoru

Limit IEEE-18 je 1,1 pu => **splňuji**.

$$\frac{U_{Cp}}{U_{fCp}} = \frac{9965}{\sqrt{2 \cdot 6928}} = 1,017 \quad [pu; V, V]$$

U_{fCp} – špičkové napětí odvozené ze zvoleného napětí kondenzátoru

Limit IEEE-18 je 1,2 pu => **splňuji**.

$$\frac{I_{CRMS}}{I_{nC}} = \frac{482,53}{\frac{10000}{12\sqrt{3}}} = 1,003 \quad [\text{pu}; \text{A}, \text{MVAr}, \text{kV}]$$

I_{nC} – jmenovitý proud kondenzátorem

Limit IEEE-18 je 1,35 pu => **splňuji**.

Jelikož filtrační řetězce odebírají proud i dalších harmonických je vhodné překompenzování o 15 až 20 %. V mém případě využívám 20 %.

$$\frac{I_{CRMS}}{I_{nC}} = \frac{482,53}{\frac{10000}{12\sqrt{3}}} \cdot 1,2 = 1,204 \quad [\text{pu}; \text{A}, \text{MVAr}, \text{kV}]$$

Limit IEEE-18 je 1,35 pu => **splňuji**.

$$\frac{Q_{3f}}{O_{Cpřep}} = \frac{9,615}{7,656} = 1,256 \quad [\text{pu}; \text{MVAr}, \text{MVAr}]$$

Limit IEEE-18 je 1,35 pu => **splňuji**.

Stejným způsobem vypočítám parametry filtrů pro 7., 11. a 13. harmonickou. Po výpočtu hodnot jednotlivých filtrů si musím ověřit vzniklé paralelní rezonance, mezi jednotlivými filtry, kdy chci rezonanci mezi 5. a 7. harmonickou naladit na signál HDO o $f = 283 \frac{1}{3}$ Hz. Jelikož při prvním „náhodném“ výběru nedokáži přesně určit odpovídající hodnoty kapacit jednotlivých filtrů, musím využít dalších iterací pro výpočet parametrů se správným laděním paralelních rezonancí.

Do iteračního postupu musím zahrnout i výpočet kapacitní části SVC (C-SVC), jelikož se z R Krasíkov vysílají dvě frekvence HDO. Druhá frekvence se nachází před frekvencí 5. harmonické na hodnotě $f = 216 \frac{2}{3}$ Hz. Paralelní rezonance na této f se vytvoří laděním filtrů, nastavením kapacitní části SVC na určitou frekvenci a započítáním impedance sítě, která s filtry a C-SVC také tvoří svoji rezonanci a zároveň posouvá všechny ostatní paralelní rezonance na vyšší frekvenci.

Výpočet minimální bezpečné jmenovité hodnoty napětí kondenzátoru:

$$U_{nCmin} = \sqrt{3} \cdot X_{C1} \cdot \left(I_1 + \frac{I_5}{h} \right) = \sqrt{3} \cdot 14,4 \cdot \left(460,45 + \frac{144,29}{5} \right) = 12204 \quad [\text{V}; \Omega, \text{A}, \text{A}, -]$$

U_{nCmin} – minimální bezpečná jmenovitá hodnota napětí kondenzátoru

Tato hodnota se při každé iteraci mění v závislosti na Q_C , laděné frekvenci filtru a Q_L řízené tlumivky SVC. Jelikož každý filtrační řetězec dodává určitou hodnotu kapacitního jalového výkonu musím o tuto hodnotu zvýšit dimenzování kompenzační tlumivky SVC, abych využil

celý žádaný rozsah 90 MVar odebíraný ze soustavy.

O stejnou hodnotu musím zmenšit navrhovaný výkon kompenzačních kondenzátorů pro SVC.

4.5 Vypočtené hodnoty pro L, C a filtrační řetězce

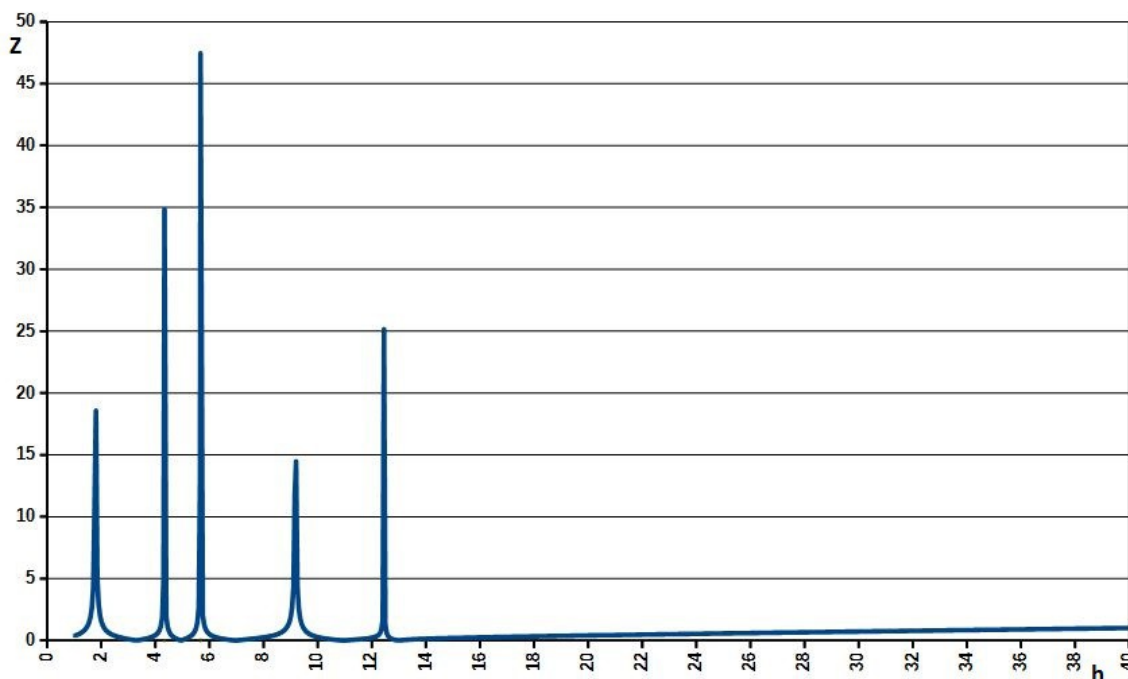
h	5	7	11	13	C-SVC
Q_C [MVar]	16	26	14	6	74
U_{nc} [kV]	12,6	12,3	12,3	12,3	12,3
X_n/R [-]	100	100	100	100	20
U_{fc} [V]	7275	7101	7101	7101	7101
U_{fcP} [V]	10288	10043	10043	10043	10043
I_{nc} [A]	733,14	1220,42	657,15	281,63	3473,5
X_{C1} [Ω]	9,92	5,82	10,81	25,22	2,04
X_{Ch} [Ω]	2,05	0,84	0,99	1,94	0,62
X_{L1} [Ω]	0,42	0,12	0,9	1,49	1,88
I₁ [A]	670,11	1117,10	593,97	253,94	3428,24
I_h [A]	288,57	148	60	42,86	0
I_{CRMS} [A]	729,6	1126,9	597	257,5	3428,2
U_{Cp} [V]	10240	9368	9161	9173	9912
U_{CRMS} [V]	6675	6501	6419	6404	7009
U_{CRMS}/U_{fc} [pu]	0,918	0,916	0,904	0,902	0,987
U_{Cp}/U_{fcP} [pu]	0,995	0,933	0,912	0,913	0,987
I_{CRMS}/I_{nc} [pu]	0,995	0,923	0,908	0,914	0,987
I_{CRMS}/I_{nc} přek. [pu]	1,194	1,108	1,090	1,097	1,184
Q_C/Q_{Cpřep}	1,315	1,160	1,127	1,132	1,337
C [μF]	320,80	547,03	294,56	126,24	1556,94
L [mH]	1,337	0,382	0,286	0,475	0,598
R_L [mΩ]	4,24	1,21	0,90	1,49	6,26
Q_{filtr_dodané} [MVar]	10,03	18,44	10,1	4,33	47,31
f – laděná [Hz]	243	348	548	650	165

Tab. 24: Vypočtené parametry filtračních řetězců

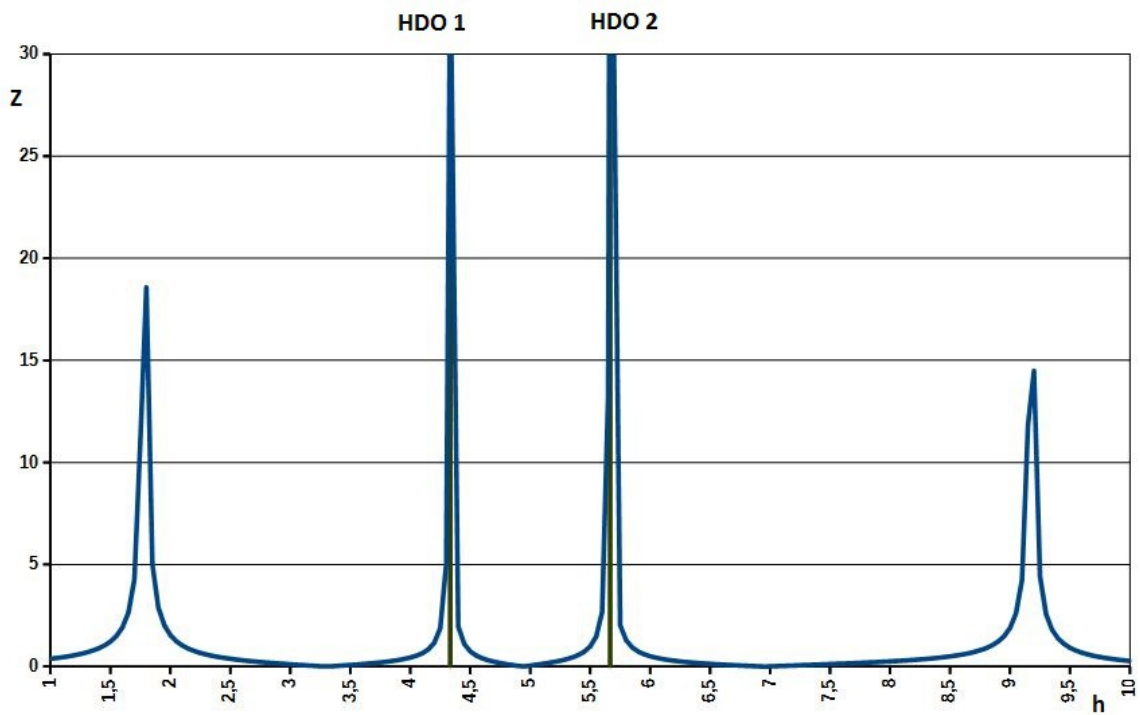
Výsledný dodávaný kapacitní jalový výkon filtry je $Q = 42,9$ MVar. Zbytek dodává kondenzátor paralelně připojený k filtrům. Výkon kompenzačních tlumivek je $Q_L = 180$ MVar. Hodnoty filtrů jsou již počítané s touto hodnotou Q_L .

Hodnoty filtračních řetězců byly vypočítány s ohledem na frekvence HDO vysílané z R Krasíkov na $f_1 = 216 \frac{2}{3}$ Hz a $f_2 = 283 \frac{1}{3}$ Hz. V okolí těchto hodnot se nacházejí špičky paralelních rezonancí tvořených filtry, C a sítí. Frekvence filtrů byly voleny s ohledem na možnou toleranci hodnot $C \pm 5 \%$ a $L \pm 3 \%$; změna parametrů vlivem teploty, výroby atd.. Hodnoty THD po zapojení filtrace vychází – $THD_V = 6 \%$ pro minimální zatížení soustav a $THD_V = 6,9 \%$ pro maximální zatížení a nejvyšší hodnota $THD_I = 1,7 \%$ pro oba případy.

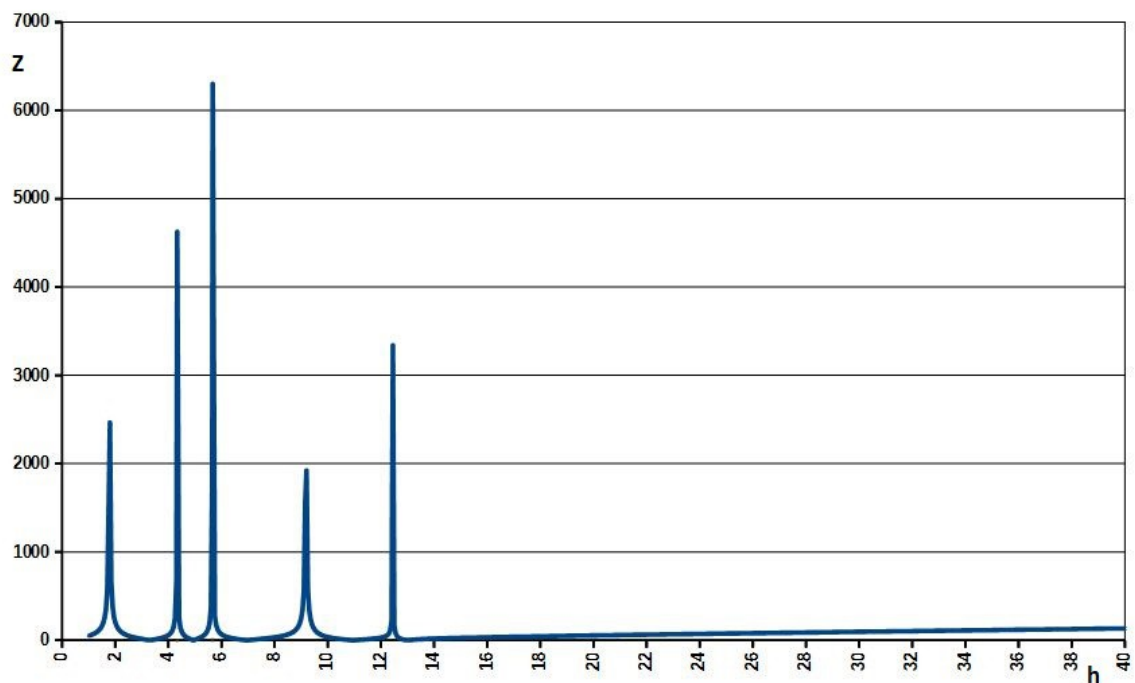
Při výskytu nejvyššího možného napětí na terciáru transformátoru ($U = 14,1$ kV) dojde k překročení napěťových maxim o cca 5 - 10 %. Jelikož je 14,1 kV hodnota napětí při havarijním stavu, která nesmí trvat déle než 10 minut, považují zatížení za bezproblémové. Ostatní hodnoty zůstávají pod limitem i v případě havarijního napětí.



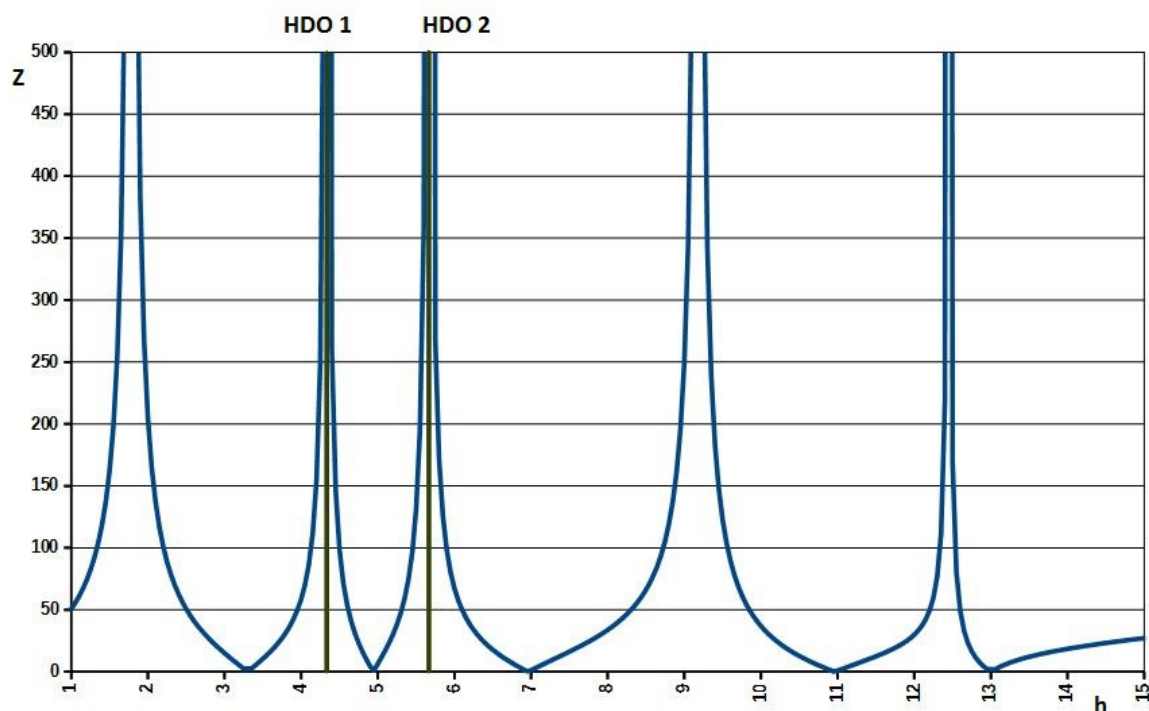
Obr. 21: Průběh impedance filtru paralelně s impedancí sítě a C-SVC, z pohledu 10,5 kV



Obr. 22: Výřez průběhu impedance filtru paralelně s impedancí sítě a C-SVC, z pohledu 10,5 kV



Obr. 23: Průběh impedance filtru paralelně s impedancí sítě a C-SVC, z pohledu rozvodny 121 kV



Obr. 24: Výřez průběhu impedance filtru paralelně s impedancí sítě a C-SVC, z pohledu rozvodny 121 kV

4.6 Výpočet parametrů tlumivek

$Q_L = 180 \text{ MVar}$, při $U_n = 10,5 \text{ kV}$:

$$X_L = \frac{U_n^2}{Q_L} = \frac{10,5^2}{180} = 0,6125 \quad [\Omega; \text{kV}, \text{MVar}]$$

$$L = \frac{X_L}{\omega} = \frac{0,6125}{100 \pi} = 1,95 \cdot 10^{-3} \quad [\text{H}; \Omega, \text{rad}]$$

L – celková indukčnost tlumivek umístěných mezi fázemi

Kvůli ochraně tyristorových měničů budou v každé větvi trojúhelníka zapojeny dvě tlumivky s poloviční indukčností a tyristory budou umístěny mezi nimi.

4.7 Výpočet kapacity manuálně připojované kapacity na hladinu 400 kV

Požadované hodnoty – $U_{nC} = 420 \text{ kV}$, $Q_{nC} = 60 \text{ MVar}$.

$$X_C = \frac{U_{nC}^2}{Q_{nC}} = \frac{420^2}{60} = 2940 \quad [\Omega; \text{kV}, \text{MVar}]$$

$$C = \frac{1}{\omega X_C} = \frac{1}{100 \cdot \pi \cdot 2940} = 1,083 \cdot 10^{-6} \quad [\text{F}; \text{rad}, \Omega]$$

Výpočet dodávaného výkonu na udržované hladině napětí $U_n = 416 \text{ kV}$:

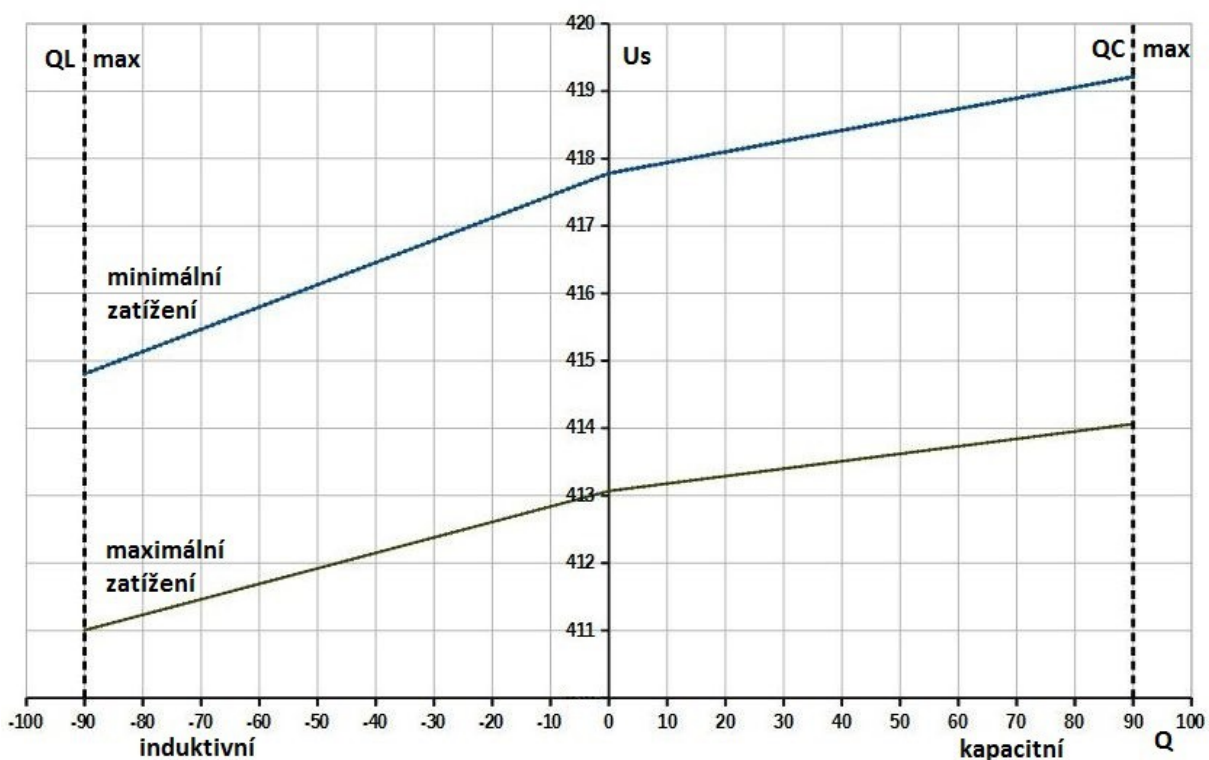
$$Q_{\text{Cpřep}} = Q_{\text{nC}} \cdot \left(\frac{U_n}{U_{\text{nC}}} \right)^2 = 60 \cdot \left(\frac{416}{420} \right)^2 = 58,86 \quad [\text{MVA}r; \text{MVA}r, \text{kV}, \text{kV}]$$

Dodávaný výkon odpovídá nejvyšší vypočítané hodnotě tvrdosti R Krasíkov, která je $\Delta Q/\Delta U = 58,84 \text{ MVA}r/\text{kV}$.

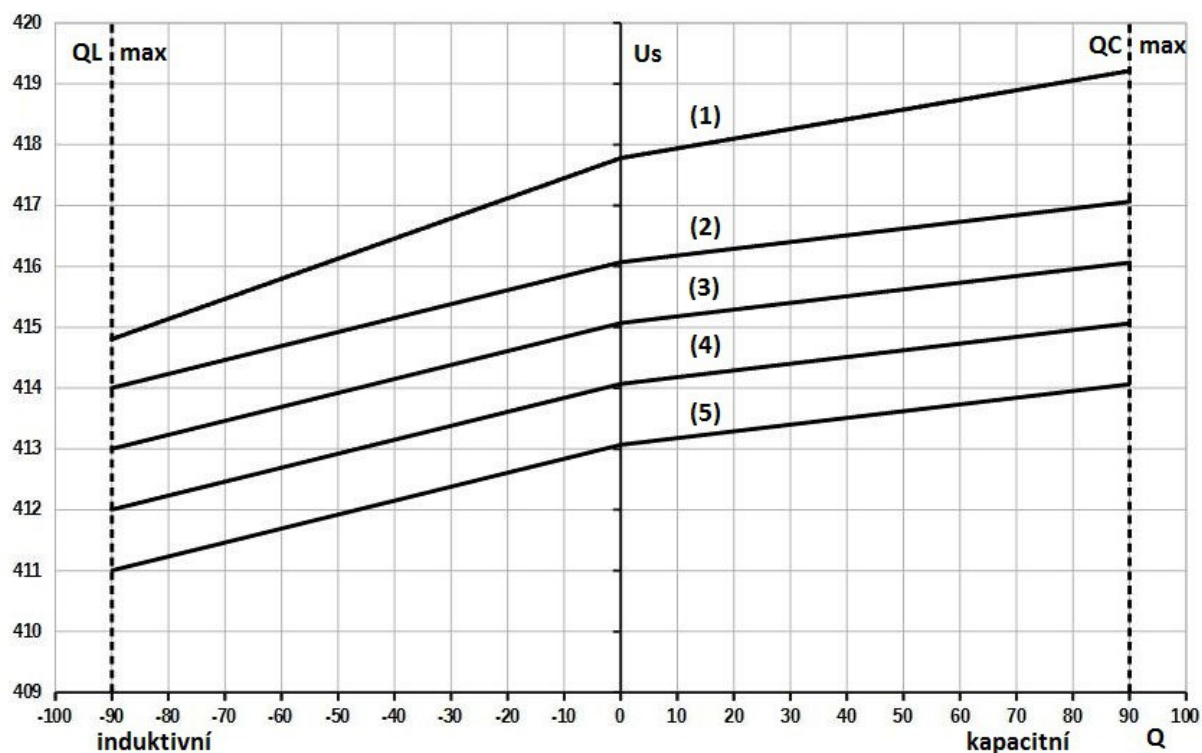
Kondenzátorové baterie budou zapojeny do uzemněné hvězdy. Pro vypočítaný kompenzační výkon budou potřeba 3 baterie pro každou fázi, kdy kompenzace bude prováděna jako stupňovitá, po vyčerpání limitu říditelné části SVC. Po připojení bude říditelná dodávka z říditelné části snížena na 0, případně do induktivní oblasti.

4.8 Výsledný regulační rozsah SVC

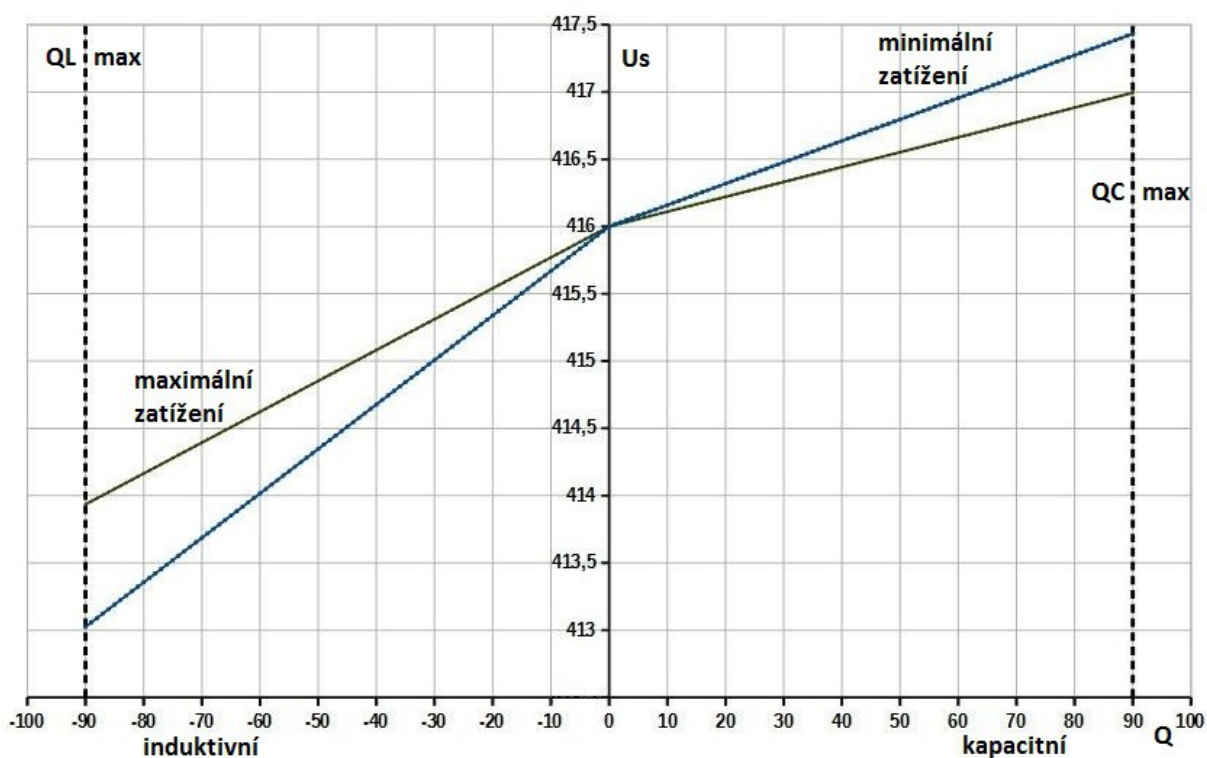
Výsledný regulační rozsah při minimálním zatížení soustavy je od $U_{\text{min}} = 414,81 \text{ kV}$ do $U_{\text{max}} = 419,21 \text{ kV}$, při maximálním zatížení vychází od $U_{\text{min}} = 414 \text{ kV}$ do $U_{\text{max}} = 417 \text{ kV}$. Napětí při maximálním zatížení se dá snížit postupným odpojováním bloků připojených přímo na hladinu 400 kV, každý odpojený blok sníží napětí o 1 kV.



Obr. 25: Napětí v R Krasíkov v závislosti na aktuálním výkonu říditelné části SVC pro maximální a minimální zatížení soustavy; bez přidavných bloků na hladině 400 kV



Obr. 26: Napětí v R Krasíkov v závislosti na aktuálním výkonu celého kompenzačního zařízení pro maximální a minimální zatížení soustavy; (1) – minimální zatížení; (2) - maximální zatížení - 3 bloky (180 MVar) na hladině 400 kV; (3) - maximální zatížení - 2 bloky (120 MVar) na hladině 400 kV; (4) - maximální zatížení - 1 blok (60 MVar) na hladině 400 kV; (5) - maximální zatížení – bez přidavných bloků na hladině 400 kV



Obr. 27: Napětí v R Krasíkov v závislosti na aktuálním výkonu říditelné části SVC pro maximální a minimální zatížení soustavy; napětí $U = 416$ kV je udržováno externími zdroji a paralelně připojenou kompenzací na hladině 400 kV

KAPITOLA 5

5 Závěr

Práce je zaměřena na návrh statické kompenzace jalového výkonu umístěné v rozvodně přenosové soustavě Krasíkov. Pro výpočet parametrů statického kompenzátoru bylo nejprve nutné vytvořit analýzu PS pro zjištění potřebných výkonů SVC.

V analytické části byla uvažována soustava v roce 2025 a dál, tedy zapojení soustavy podle rozvojového plánu provozovatele přenosové soustavy, podle kterého má být zdvojeno vedení v úseku R Týnec → R Krasíkov → R Prosenice. Dále mají být v provozu jednoduchá vedení z R Krasíkov do R Horní Životice, R Neznášov a vodní přečerpávací elektrárny Dlouhé Stráně.

Induktivní výkon kompenzace byl určen za předpokladu odstavení elektráren Chvaletice a Dlouhé Stráně, při minimálním zatížení soustavy - tzv. Letním minimu. Potřebný výkon byl určen na $Q = 113,6$ MVar induktivních.

Kapacitní výkon SVC byl určen za předpokladu provozu dvou bloků elektrárny Chvaletice a jednoho bloku elektrárny Dlouhé Stráně, kdy obě elektrárny dodávají maximální hodnotu kapacitního jalového výkonu, při maximálním dodávaném činném výkonu. Všechny dodané jalový výkon jde do zadané části PS. Toky Q mezi okolní soustavou a zadanou částí jsou 0. Přenášené činné výkony a odběry v jednotlivých rozvodnách byly zvoleny na základě predikce OTE a rozvojových plánů ČEZ Distribuce a.s. a ČEPS a.s.. Výsledná potřebná hodnota je $Q = 231,3$ MVar kapacitních.

Obě hodnoty respektují udržované napětí $U = 416$ kV a možnost regulace o -1 kV při minimálním respektive $+1$ kV při maximálním zatížení soustavy.

Jako možnost byl zvažován provoz 4 bloků elektrárny Chvaletice, kdy při maximálním zatížení soustavy by docházelo k přenosu téměř přirozeného výkonu vedením mezi R Čechy střed a R Týnec. Tato situace by umožňovala využít celou dodávku jalového výkonu z ECHV ke kompenzaci vedení do R Krasíkov a odběru v R Týnec. Tím by se docílilo zachování rezervy v produkci Q o velikosti cca 1 bloku ECHV a zároveň snížení potřeby kompenzačního výkonu dodávaného SVC na hodnotu $Q = 27$ MVar kapacitních. Z již dříve popsaných důvodů, hlavně vývoje cen uhlí, se autor rozhodl možnost se 4 bloky ECHV v provozu nevyužít.

Hodnoty parametrů jednotlivých částí SVC byly určeny s ohledem na frekvence HDO $f_1 = 216 \frac{2}{3}$ Hz, $f_2 = 288 \frac{1}{3}$ Hz a platné normy EN 50160, IEEE-18 a také IEEE-519. Filtrační řetězce byly zvoleny pro 5., 7., 11. a 13. harmonickou, kvůli dodržení maximálních přípustných hodnot THD_v a THD_i , které po filtraci vycházejí na $THD_v = 6 \%$ pro minimální zatížení soustav a $THD_v = 6,9 \%$ pro maximální zatížení a nejvyšší hodnota $THD_i = 1,7 \%$ pro oba případy. Parametry jsou uvedeny v následující tabulce.

	5. harm	7. harm	11. harm	13. harm	C-SVC
U_n [kV]	12,6	12,3	12,3	12,3	12,3
C [μF]	320,80	547,03	294,56	126,24	1556,94
L [mH]	1,337	0,382	0,286	0,475	0,598
R_L [mΩ]	4,24	1,21	0,90	1,49	6,26

Tab. 25: Výsledné parametry filtrů a kapacitní části SVC

Parametry indukční části jsou $U_n = 10,5$ kV, $Q_L = 180$ MVar a $L = 1,95$ mH.

Jelikož je vypočítaná hodnota kapacitního výkonu větší, než maximální přípustná hodnota pro zatížení transformátoru je říditelná kapacitní část doplněna o postupně připojované kapacity o výkonu $Q_C = 60$ MVar. Celková hodnota kapacity pro každou fázi vychází na $C = 1,083$ mF při jmenovitém napětí $U_{nC} = 420$ kV. Dodávaný výkon na udržované hladině $U = 416$ kV je $Q = 58,86$ MVar. Tato hodnota odpovídá maximální citlivosti $\Delta Q/\Delta U$ v R Krasíkov (58,84 MVar) a hodnotě dodávané z SVC po odečtení spotřeby síťového transformátoru.

Výsledný regulační rozsah plynule říditelné části kompenzačního zařízení při minimálním zatížení soustavy je od $U_{\min} = 414,81$ kV do $U_{\max} = 419,21$ kV, při maximálním zatížení vychází od $U_{\min} = 414$ kV do $U_{\max} = 417$ kV. Napětí při maximálním zatížení se dá snížit postupným odpojováním bloků připojených přímo na hladinu 400 kV, každý odpojený blok sníží napětí o 1 kV.

Pokud by muselo být v budoucnu kompenzační zařízení zvětšeno stačilo by dodat další baterii kondenzátorů nebo tlumivky na hladinu 400 kV, o velikosti 60 MVar.

6 Příloha A: Seznam zkratek

ACSR – Aluminium conductors steel reinforced – anglická zkratka pro AlFe lano

AlFe – lano složené z hliníkového potahu a železného jádra

ASRU – automatická sekundární regulace napětí

ČR – Česká republika

ČSN – česká technická norma

DS – distribuční soustava

EDST HG1 – elektrárna Dlouhé Stáně – hydrogenerátor 1

ECHV B1 – elektrárna Chvaletice – blok 1

EN – European Standard – evropská norma

ES – elektrizační soustava

HDO – hromadné dálkové ovládaní

HVDC – High-Voltage Direct Current

IEC – International Electrotechnical Commission

IEEE - Institute of Electrical and Electronics Engineers

NN – nízké napětí

OZE – obnovitelný zdroj elektrické energie

PS – přenosová soustava

PRN – primární regulace napětí

R „Krasíkov“ - R značí rozvodnu

SIL – surge impedance load – přirozený výkon vedení

SR – saturated reactor

STATCOM – static synchronous compensator

SVC – static Var compensator

SVS – static Var systém

TCR – Thyristor-controlled reactor – Tyristory řízená tlumivka

TCT – Thyristor-controlled transformer – Tyristory řízený transformátor

THD – Total Harmonic Distortion – celkové harmonické zkreslení signálu

TSC – Thyristor-switched capacitor – Tyristory spínaný kondenzátor

TSR - Thyristor-switched reactor – Tyristory spínaná tlumivka

VA-char. – volt-ampérová charakteristika

7 Příloha B: Literatura

- [1] TLUSTÝ J., KYNCL J., MUSIL L., ŠPETLÍK J., ŠVEC J., HAMOUZ P., MÜLLER Z. a MÜLLER M.: „Monitorování, řízení a chránění elektrizačních soustav“, Praha: České vysoké učení technické, 2011, ISBN 978-80-01-04940-2, Dostupné z: http://k315.feld.cvut.cz/CD_MPO/CVUT-5-Monitorovani.pdf
- [2] GURECKÝ J.: „Kompenzace“, studijní materiály, VŠB-TU Ostrava, Fakulta elektrotechniky a informatiky, katedra elektroenergetiky, Ostrava
- [3] MÁŠLO K. a kol.: „Řízení a stabilita elektrizační soustavy“, Praha: České vysoké učení technické, Dostupné z: <http://www.powerwiki.cz/attach/PrilohyVyuka/Rizeni%20a%20stabilita%20elektrizacni%20soustavy.pdf>
- [4] Studijní materiály k předmětu A1B15EN2, ČVUT-FEL, Katedra elektroenergetiky, Praha, Dostupné z: <http://www.powerwiki.cz>
- [5] ABB POWER T&D COMPANY, INC. ELECTRIC SYSTEMS TECHNOLOGY INSTITUTE: „Electrical Transmission and Distribution Reference Book“, Stockholm: ABB Power T&D Company, Inc., 1997
- [6] DAS, J.: „Power system analysis: short-circuit load flow and harmonics“, New York: Marcel Dekker, 2002, ISBN 0-8247-0737-0
- [7] ČEPS a.s.: „Výstavba přenosové soustavy“, Praha: ČEPS a.s., 2012, Dostupné z: www.ceps.cz/CZE/Media/Ke-stazeni/Documents/Vystavba_vedeni_2012_web.pdf
- [8] KUNDUR P.: „Power System Stability and Control“, New York: McGraw-Hill, Inc., 1994, ISBN 978-0-07-035958-1
- [9] BAYLISS C., HARDY B.: „Transmission and distribution electrical engineering“, 4th edition, Boston: Elsevier/ Newnes, 2012, ISBN 978-0-08-096912-1
- [10] HOFMANN W., SCHLABBACH J., JUST W.: „Reactive power compensation: A practical guide“, Chichester, West Sussex, U.K.: Wiley, 2012, ISBN 978-0-470-97718-7
- [11] Studijní materiály k předmětu A2B13PEL, ČVUT-FEL, Katedra elektroenergetiky, Praha, Dostupné z: <http://www.powerwiki.cz>
- [12] Studijní materiály k předmětu A1M15PRE, ČVUT-FEL, Katedra elektroenergetiky, Praha, Dostupné z: <http://www.powerwiki.cz>
- [13] MATHUR R., VARMA R.: „Thyristor-based FACTS controllers for electrical transmission systems“, New York: Wiley, 2002, ISBN 0-471-20643-1
- [14] Studijní materiály k předmětu EMC – elektromagnetická kompatibility, VŠB-TU Ostrava, Fakulta elektrotechniky a informatiky, katedra elektroenergetiky, Ostrava
- [15] TRANSMISSION AND DISTRIBUTION COMMITTEE OF THE IEEE POWER ENGINEERING SOCIETY: „IEEE Std 18-2002: IEEE standard for shunt power capacitors“, New York, N.Y: Institute of Electrical and Electronics Engineers, 2002,

ISBN 978-0-7381-3244-0

- [16] TRANSMISSION AND DISTRIBUTION COMMITTEE OF THE IEEE POWER ENGINEERING SOCIETY: „IEEE Std 519-1992: IEEE recommended practices and requirements for harmonic control in electrical power systems“, New York: Institute of Electrical and Electronics Engineers, 1993. ISBN 978-0-7381-0915-2
- [17] „Chapter 4: AC to AC Converters“, Studijní materiál k předmětu Power Electronics, Xi'an Jiaotong University, Čína,
Dostupné z: http://pel-course.xjtu.edu.cn/courseware/pdf_en/full/chapter4.pdf
- [18] ABB Polovodiče: „Ceník polovodičových komponent: výkonové diody a tyristory“, ABB Polovodiče, Praha 2013
- [19] DE LA ROSA, Francisco C.: „Harmonics and power systems“, Boca Raton, FL: CRC/Taylor, 2006, ISBN 0-8493-3016-5
- [20] ARRILLAGA J., WATSON N.: „Power System Harmonics“, 2nd edition, Hoboken, NJ: J. Wiley, 2003, ISBN 0-470-85129-5
- [21] WAKILEH, George J.: „Power Systems Harmonics: Fundamentals, Analysis and Filter design“, New York: Springer, 2001, ISBN 3-540-42238-2
- [22] WEEDY B.: „Electric power systems“, 5th edition, Chichester, West Sussex, UK: John Wiley, 2012, ISBN 978-0-470-68268-5
- [23] ČSN EN 60909-0: „Zkratové proudy v trojfázových střídavých soustavách – Část 0: Výpočet proudů“, Praha: Český normalizační institut, 2002
- [24] IEC/TR 60909-2: „Short-circuit currents in three-phase a.c. systems – Part 2: Data of electrical equipment for short-circuit current calculations“, Geneva: International Electrotechnical Commission, 2008
- [25] IEC/TR 60909-4: „Short-circuit currents in three-phase a.c. systems – Part 4: Examples for the calculation of short-circuit currents“, Geneva: International Electrotechnical Commission, 2000
- [26] <http://www.etm.cz/index.php/novinky/782-precerpavaci-vodni-elektrarna-dlouhe-strane-v-jesenikach-1cast>
- [27] http://cs.wikipedia.org/wiki/Elektrárna_Chvaletice
- [28] Studijní materiály k předmětu A1M15ENY, ČVUT-FEL, Katedra elektroenergetiky, Praha, Dostupné z: <http://www.powerwiki.cz>
- [29] ČEPS a.s.: „Kodex PS 2014 – Část V“, ČEPS a.s., Praha 2014, Dostupné z: <http://www.ceps.cz/CZE/Data/Legislativa/Kodex/Stranky/default.aspx>
- [30] ČEPS a.s.: „Plán rozvoje přenosové soustavy České republiky 2014 - 2023“, ČEPS a.s., Praha 2013, Dostupné z: <http://www.ceps.cz/CZE/Cinnosti/Technicka-infrastruktura/Documents/Rozvoj%20PS/2013/Pl%C3%A1n%20rozvoje%20%C5%99enosov%C3%A9%20soustavy%20%C4%8Cesk%C3%A9%20republiky%202014%20-%202023.pdf>
- [31] ČEPS a.s.: „Kodex PS 2014 – Část VII“, ČEPS a.s., Praha 2014, Dostupné z: <http://www.ceps.cz/CZE/Data/Legislativa/Kodex/Stranky/default.aspx>

- [32] LAUB Č., RIEB: „V458 Krasíkov – H. Životice – výstavba nového vedení – Realizace; Technická část“, Výkresová dokumentace k veřejné zakázce spol. ČEPS a.s. č. 2014100018, EGEM a.s., Praha 2011
- [33] ČEPS a.s.: „Dokumentace záměru: Zdvojení stávajícího vedení V401/801 Týnec - Krasíkov“, Dokumentace EIA – MZP422, ČEPS a.s., Praha 2013
- [34] ČEPS a.s.: „Oznámení záměru: Zdvojení stávajícího vedení V402 Krasíkov - Prosenice“, Dokumentace EIA – MZP434, ČEPS a.s., Praha 2013
- [35] ČEPS a.s.: „Roční příprava provozu 2014“, ČEPS a.s., Praha 2013, Dostupné z: http://www.ceps.cz/cze/cinnosti/dispecerske_rizeni/priprava_provozu/Stranky/default.aspx
- [36] ČEPS a.s.: „Roční příprava provozu 2013“, ČEPS a.s., Praha 2012, Dostupné z: http://www.ceps.cz/cze/cinnosti/dispecerske_rizeni/priprava_provozu/Stranky/default.aspx
- [37] ČEPS a.s.: „Roční příprava provozu 2012“, ČEPS a.s., Praha 2011, Dostupné z: http://www.ceps.cz/cze/cinnosti/dispecerske_rizeni/priprava_provozu/Stranky/default.aspx
- [38] ČEPS a.s.: „Roční příprava provozu 2011“, ČEPS a.s., Praha 2010, Dostupné z: http://www.ceps.cz/cze/cinnosti/dispecerske_rizeni/priprava_provozu/Stranky/default.aspx
- [39] ČEPS a.s.: „Roční příprava provozu 2010“, ČEPS a.s., Praha 2009, Dostupné z: http://www.ceps.cz/cze/cinnosti/dispecerske_rizeni/priprava_provozu/Stranky/default.aspx
- [40] ČEZ Distribuce a.s.: „Roční příprava provozu 2014“, ČEZ Distribuce a.s., 2013
- [41] CHLUMSKÝ V.: „V410 – Zdvojení vedení“, Zadávací dokumentace k veřejné zakázce č. 20131000095, ČEPS a.s., Praha 2013
- [42] ŠEDA J.: „Využití rotačních kompenzátorů pro zlepšení kvalitativních parametrů napětí v napájecí oblasti Krasíkov“, ČEZ Distribuce a.s., Děčín
- [43] KŮS V.: „Vliv polovodičových měničů na napájecí soustavu“, 1. vydání, Praha: BEN - technická literatura, 2002, ISBN 80-730-0062-8
- [44] ČSN EN 50160: „Charakteristiky napětí elektrické energie dodávané z veřejné distribuční sítě“, Praha: Český normalizační institut, 2000
- [45] SVOBODA J., PAVLÍK J., BELATKA M.: „V451 Babylon – Bezděčín – Zdvojení vedení“, Zadávací dokumentace, stupeň DZA, k veřejné zakázce spol. ČEPS a.s. č. 2013100001, Elektrotrans a.s., Praha 2012
- [45] LAUB Č., RIEB: „V451 Babylon – Bezděčín – Zdvojení vedení“, Technická dokumentace; Zadávací dokumentace k veřejné zakázce spol. ČEPS a.s. č. 2013100001, EGEM a.s., Praha 2012
- [46] <http://www.tkdldz.com/english/show.asp?id=64&SmallClassName=High%20voltage%20VAR%20compensators>

- [47] HONIŠ R., KONEČNÝ M., GALETKA M., ULLMAN I.: „Přenosová soustava České republiky“, Moravskoslezský energetický klastr, 2012, Dostupné z: <http://partnerstvi-energetiky.msek.cz/wp-content/uploads/2013/01/01-Prenosova-soustava-Ceske-republiky.pdf>
- [48] „Dry-type, Air-Core Shunt Reactors“, katalog, Trench Ltd. – Siemens, Dostupné z: http://www.trenchgroup.com/content/download/1763/15631/file/HVSR_Europe.pdf
- [49] „Air-Core Raectors – Dry Type“, katalog, ALSTOM, Dostupné z: <http://www.alstom.com/Global/Grid/Resources/Documents/Air%20core%20reactors%20Brochure%20GB.pdf>
- [50] „Instruction Manual – TV85019“, manuál k zakázce č. TV85019, Nokian Capacitors
- [51] „Power Capacitors and Harmonic Filters Buyer’s Guide“, katalog, ABB, Dostupné z: [http://www05.abb.com/global/scot/scot245.nsf/veritydisplay/7385b4a156d09453c1257bf600227be7/\\$file/1HSM%209543%2032-00en%20Capacitors%20Buyers%20Guide%20Ed%201.pdf](http://www05.abb.com/global/scot/scot245.nsf/veritydisplay/7385b4a156d09453c1257bf600227be7/$file/1HSM%209543%2032-00en%20Capacitors%20Buyers%20Guide%20Ed%201.pdf)
- [52] ČSN EN 50522: „Uzemňování elektrických instalací AC nad 1 kV“, Praha: Český normalizační institut, 2012

8 Příloha C: Seznam obrázků

Obrázek 1: Průběh napětí, proudu a činného výkonu na ideálním odporu.....	3
Obrázek 2: Průběh napětí, proudu a jalového výkonu na ideální indukčnosti.....	4
Obrázek 3: Průběh napětí, proudu a jalového výkonu na ideální kapacitě.....	5
Obrázek 4: Parametry homogenního vedení – R, L, C, G rovnoměrně rozděleny po celé délce [4].....	6
Obrázek 5: Geometrické uspořádání vodičů na stožáru DONAU, pro dvojité vedení [3].....	8
Obrázek 6: Parametry pro výpočet svazkového vodiče [4].....	9
Obrázek 7: Trojvinutový transformátor.....	15
Obrázek 8: V-křivky synchronního stroje.....	16
Obrázek 9: Rotační kompenzátor v R Krasíkov při generální opravě [42].....	17
Obrázek 10: Paralelně připojené tlumivky do přenosové soustavy.....	18
Obrázek 11: Složení charakteristik SVC (SVS).....	20
Obrázek 12: Zapojení TCR a příklady průběhů proudů v závislosti na řídicím úhlu.....	21
Obrázek 13: 6-ti pulsní zapojení TCR.....	22
Obrázek 14: Schématické zapojení STATCOMu.....	23
Obrázek 15: Princip práce STATCOMu.....	24
Obrázek 16: Porovnání V-Q charakteristik SVC a STATCOM.....	24
Obrázek 17: 12-ti pulsní zapojení TCR.....	28
Obrázek 18: Zadaný výřez přenosové soustavy.....	31
Obrázek 19: Zadaný výřez soustavy s elektrárenskými bloky.....	37
Obrázek 20: Upravená soustava pro výpočet zkratových proudů.....	38
Obrázek 21: Průběh impedance filtru paralelně s impedancí sítě a C-SVC, z pohledu 10,5 kV.....	51
Obrázek 22: Výřez průběhu impedance filtru paralelně s impedancí sítě a C-SVC, z pohledu 10,5 kV.....	52
Obrázek 23: Průběh impedance filtru paralelně s impedancí sítě a C-SVC, z pohledu rozvodny 121 kV.....	52
Obrázek 24: Výřez průběhu impedance filtru paralelně s impedancí sítě a C-SVC, z pohledu rozvodny 121 kV.....	53
Obrázek 25: Napětí v R Krasíkov v závislosti na aktuálním výkonu říditelné části SVC pro maximální a minimální zatížení soustavy; bez přidavných bloků na hladině 400 kV.....	54
Obrázek 26: Napětí v R Krasíkov v závislosti na aktuálním výkonu celého kompenzačního zařízení pro maximální a minimální zatížení soustavy.....	55
Obrázek 27: Napětí v R Krasíkov v závislosti na aktuálním výkonu říditelné části SVC pro maximální a minimální zatížení soustavy.....	55
Obrázek 28: Základní rozměry nosného stožáru – typ DONAU.....	70

Obrázek 29: Kotevní stožár typ DONAU - RII 120.....	71
Obrázek 30: Speciální kotevní podchodový stožár typ DONAU.....	72
Obrázek 31: Základní rozměry nosného stožáru typ DELTA.....	73
Obrázek 32: Základní rozměry konstrukce kotevního stožáru typ DELTA.....	74
Obrázek 33: Popsané schéma rozvržení SVC.....	77
Obrázek 34: Schéma rozvržení SVC s rozměry.....	78
Obrázek 35: Rozměry kondenzátorů.....	79
Obrázek 36: Uspořádání kondenzátorové baterie typ QBANK-A.....	79
Obrázek 37: Uspořádání kondenzátorové baterie typ QBANK-B.....	80
Obrázek 38: Uspořádání kondenzátorové baterie typ QBANK-C.....	80

9 Příloha D: Seznam tabulek

Tabulka 1: Parametry vedení potřebné pro výpočty pro dané napěťové hladiny [2].....	7
Tabulka 2: Hodnoty koeficientu k respektujícího skin efekt ve vodiči [5,9].....	8
Tabulka 3: Počty lan ve svazku používané ve světě [4,7,8].....	9
Tabulka 4: Výpočet zobecněných potenciálových koeficientů pro různé typy vedení [3].....	10
Tabulka 5: Napěťový součinitel c pro výpočet maximálních a minimálních zkratových proudů [23].....	13
Tabulka 6: Typy použitých stožárů a délky vedení [32, 33, 34].....	32
Tabulka 7: Použité fázové vodiče a maximální zatížitelnost vedení [30, 32 - 35].....	32
Tabulka 8: Instalovaný transformační výkon (rozvodna 420 kV) a zapojení rozveden podle režimu provozu [35, 40].....	33
Tabulka 9: Parametry stožárů použitých pro vedení [32, 41].....	33
Tabulka 10: Parametry venkovních vedení 400 kV.....	35
Tabulka 11: Parametry generátorů a blokových transformátorů připojených do zadaného výřezu přenosové soustavy [25 – 27].....	35
Tabulka 12: Zvolené a minimální [29] zkratové výkony okolní soustavy připojené do dané rozvodny.....	36
Tabulka 13: Vypočtené impedance vedení, elektrárenských bloků a okolní soustavy.....	37
Tabulka 14: Vypočtené hodnoty „viděných“ impedancí z pohledu dané rozvodny.....	38
Tabulka 15: Vypočtené počáteční souměrné zkratové proudy pro jednotlivé rozvodny zadané části PS při zvolených a minimálních zkratových výkonech soustavy.....	39
Tabulka 16: Vypočtené hodnoty citlivostí $\Delta Q/\Delta U$ pro jednotlivé uzly zadané části PS.....	39
Tabulka 17: Hodnoty výkonů odebíraných v rozvodnách a činných výkonů přenášených vedeními potřebné pro výpočet indukčnosti kompenzačního zařízení.....	40
Tabulka 18: Hodnoty výkonů odebíraných v rozvodnách a činných výkonů přenášených vedeními potřebné pro výpočet kapacity kompenzačního zařízení.....	40
Tabulka 19: Certifikované hodnoty jalových výkonů elektrárenských bloků, tlumivek a synchronních kompenzátorů připojených do zadané části PS.....	41
Tabulka 20: Vypočtené hodnoty potřebných jalových výkonů pro jednotlivá vedení s respektováním dodávek z ECHV, EDST, kompenzačních tlumivek v R Prosenice a toků PS/DS a v koncových rozvodnách.....	42
Tabulka 21: Vypočtené hodnoty potřebných induktivních a kapacitních jalových výkonů kompenzačního zařízení.....	43
Tabulka 22: Maximální amplituda proudových harmonických produkovaných tyristory [5, 20].....	46

Tabulka 23: Dovolené amplitudy harmonických napětí v procentech 1. harmonické a maximální THD pro sítě s $1 \text{ kV} < U_n \leq 35 \text{ kV}$ podle EN 50160.....	46
Tabulka 24: Vypočtené parametry filtračních řetězců.....	50
Tabulka 25: Výsledné parametry filtrů a kapacitní části SVC.....	58
Tabulka 26: Základní parametry fázových a zemních lan použitých ve vybrané části PS.....	69
Tabulka 27: Přepočtené ekvivalentní poloměry a koeficienty svazkových vodičů použitých ve vybrané části PS.....	69
Tabulka 28: Vzdálenosti fázových vodičů a zemních lan od země a svislé osy stožáru DONAU, pro různé typy a základní výšky [45].....	58
Tabulka 29: Vzdálenosti fázových vodičů a zemních lan od země a svislé osy stožáru DELTA, pro různé typy a základní výšky [32].....	58

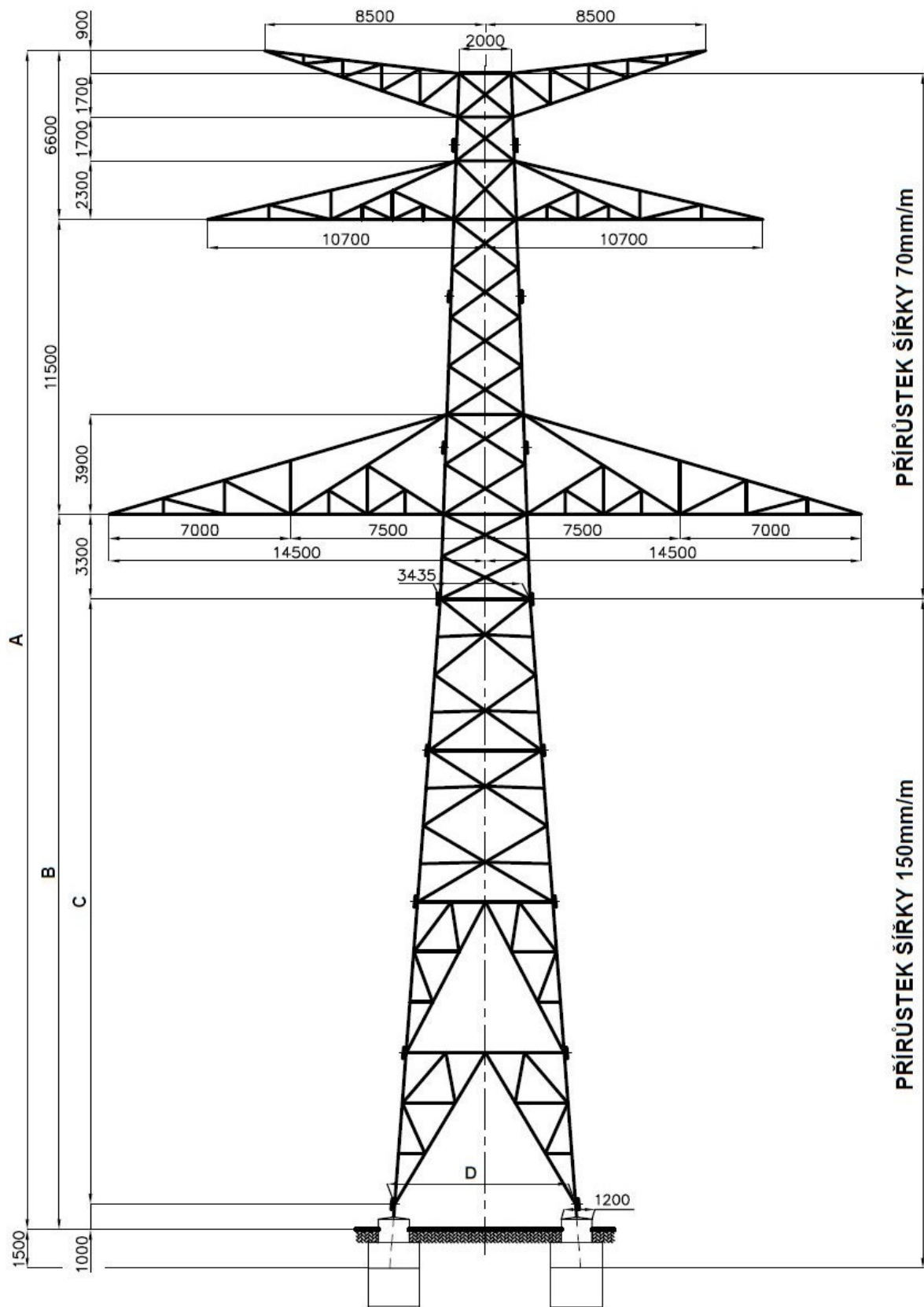
10 Příloha E: Parametry lan a stožárů

Lano			
Typ	d [mm]	r [mm]	R [Ω/km]
450 AlFe 6	29,76	14,88	0,0650
450 AlFe 8	28,7	14,35	0,0674
430-Al1/100-ST1A	29,9	14,95	0,0673
490-Al1/64-ST1A	30,6	15,3	0,0590
183-Al1/43-ST1A	19,5	9,75	-
234-AL4/55-ST6C	22,1	11,05	-

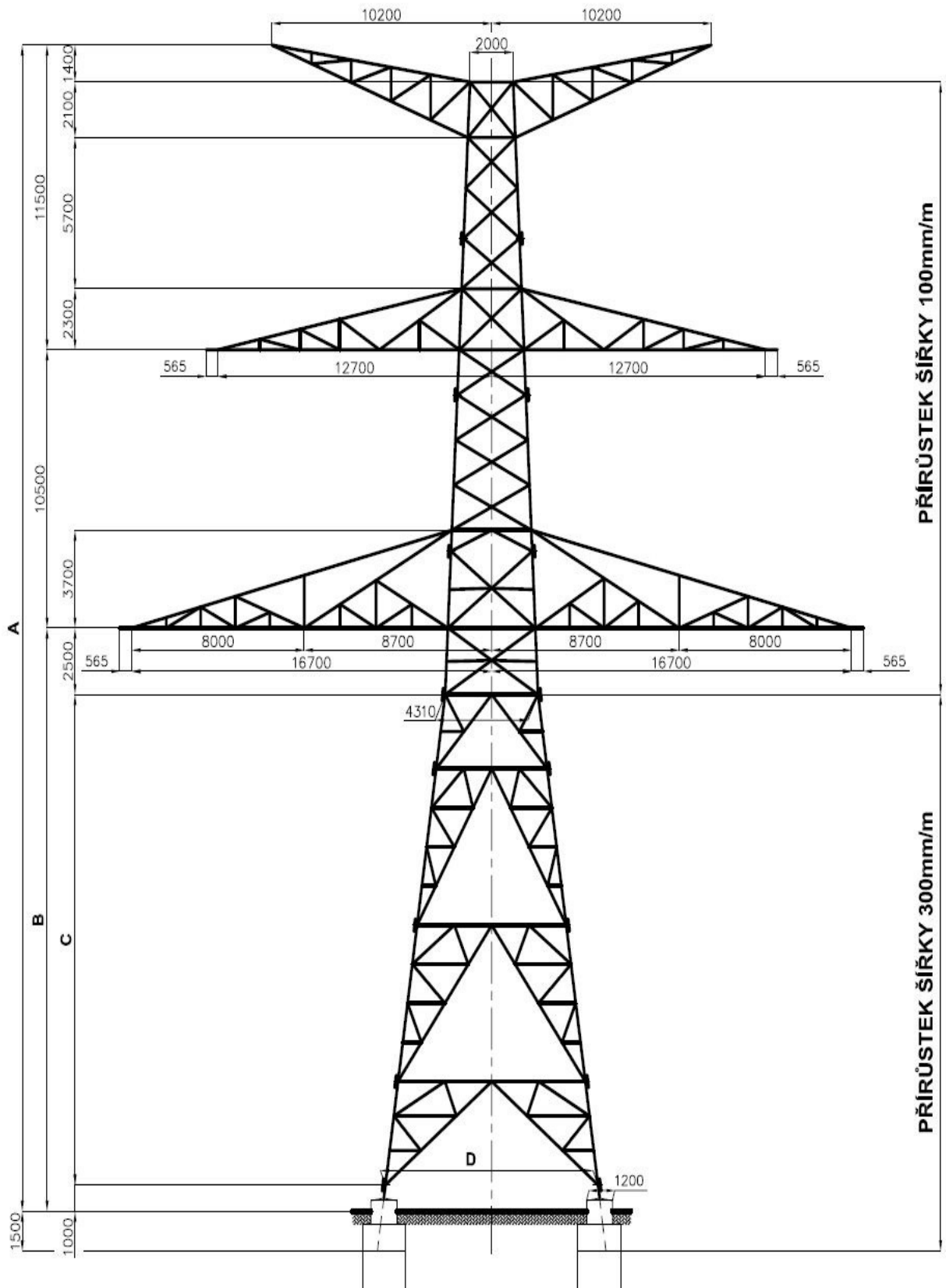
Tab. 26: Základní parametry fázových a zemních lan použitých ve vybrané části PS

Svazek						
lano	poč. vod.	a [mm]	re [mm]	k [-]	ke [-]	R_sv [Ω/km]
450 AlFe 6	3	400	133,53	0,810	0,932	0,0217
450 AlFe 8	3	400	131,92	0,810	0,932	0,0225
430-Al1/100-ST1A	3	400	133,74	0,826	0,938	0,0224
490-Al1/64-ST1A	3	400	134,77	0,810	0,932	0,0197

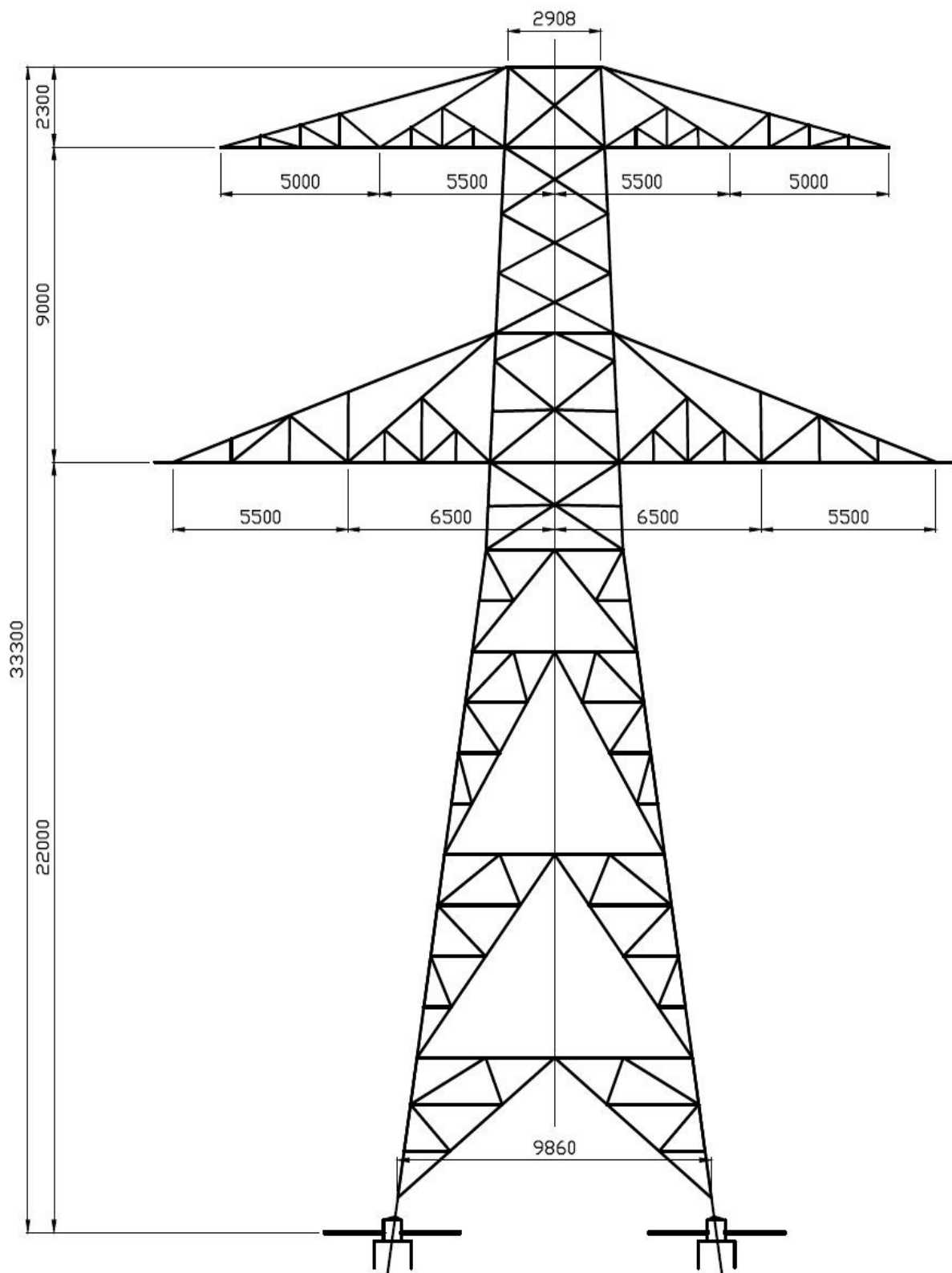
Tab. 27: Přepočtené ekvivalentní poloměry a koeficienty svazkových vodičů použitých ve vybrané části PS



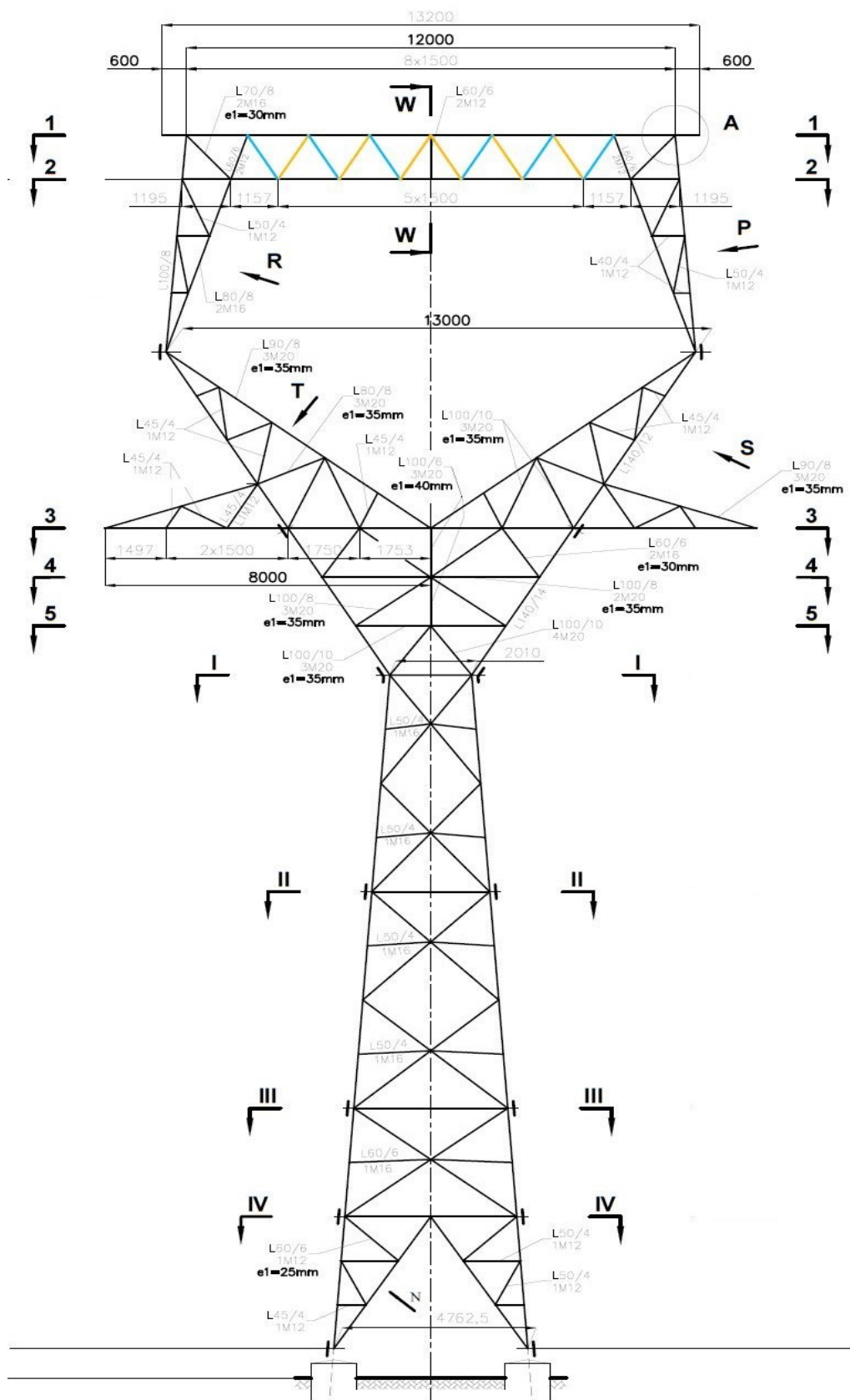
Obr. 28: Základní rozměry nosného stožáru – typ DONAU [45]



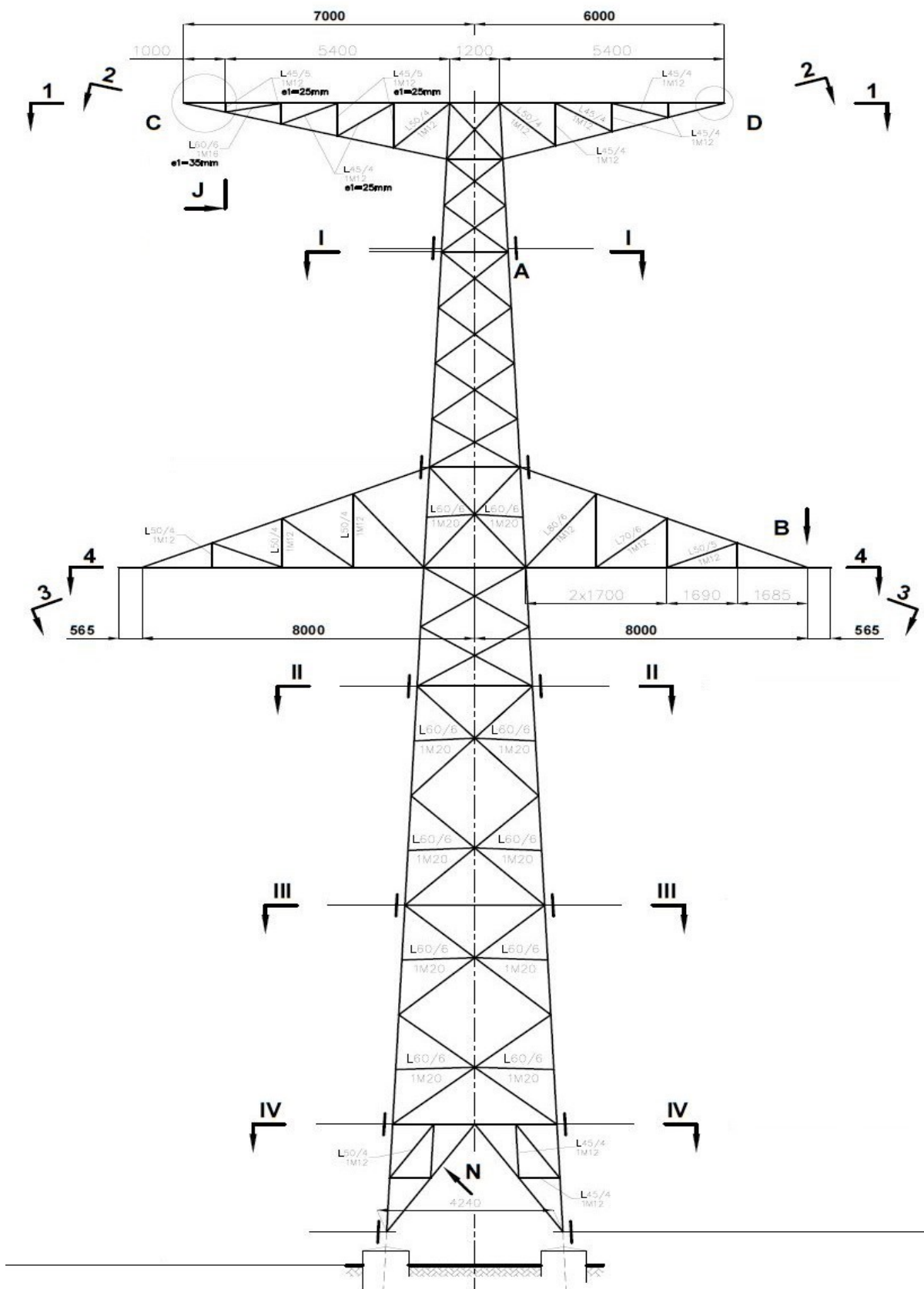
Obr. 29: Kotevní stožár typ DONAU - RII 120 [45]



Obr. 30: Speciální kotevní podchodový stožár typ DONAU [45]



Obr. 31: Základní rozměry nosného stožáru typ DELTA [32]



Obr. 32: Základní rozměry konstrukce kotevního stožáru typ DELTA [32]

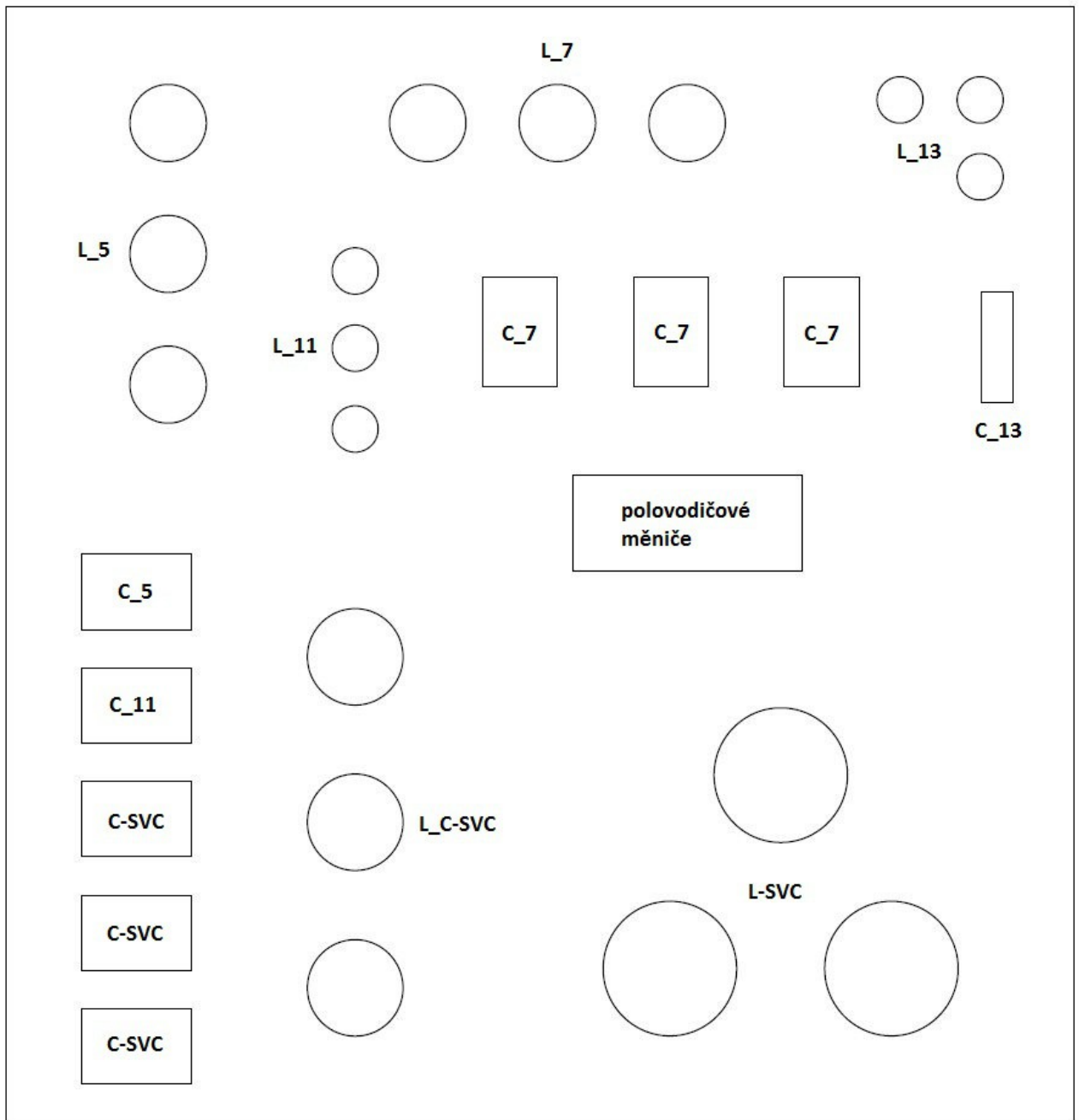
DONAU		Zemní lano		Fáze 1		Fáze 2		Fáze 3	
Typ stožáru	výška stožáru [m]	y [m]	x [m]	y [m]	x [m]	y [m]	x [m]	y [m]	x [m]
N1	46	45,5	6,6	33,5	11	22	14,5	22	7,5
N+0	46	45,5	8,5	33,9	10,7	22,4	14,5	22,4	7,5
N+2	48	47,5	8,5	35,9	10,7	24,4	14,5	24,4	7,5
N+4	49,9	49,4	8,5	37,8	10,7	26,3	14,5	26,3	7,5
N+6	51,9	51,4	8,5	39,8	10,7	28,3	14,5	28,3	7,5
N+8	53,9	53,4	8,5	41,8	10,7	30,3	14,5	30,3	7,5
N+10	55,8	55,3	8,5	43,7	10,7	32,2	14,5	32,2	7,5
N+12	57,8	57,3	8,5	45,7	10,7	34,2	14,5	34,2	7,5
RI170+0	44	44	8,5	32,5	10,7	22	14,5	22	7,5
RI170+2	46	46	8,5	34,5	10,7	24	14,5	24	7,5
RI170+4	48	48	8,5	36,5	10,7	26	14,5	26	7,5
RI170+6	49,9	49,9	8,5	38,4	10,7	27,9	14,5	27,9	7,5
RI170+8	51,9	51,9	8,5	40,4	10,7	29,9	14,5	29,9	7,5
RI170+10	53,9	53,9	8,5	42,4	10,7	31,9	14,5	31,9	7,5
RI170+12	55,8	55,8	8,5	44,3	10,7	33,8	14,5	33,8	7,5
RI150+0	44	44	9,1	32,5	11,4	22	15	22	7,8
RI150+2	46	46	9,1	34,5	11,4	24	15	24	7,8
RI150+4	48	48	9,1	36,5	11,4	26	15	26	7,8
RI150+6	49,9	49,9	9,1	38,4	11,4	27,9	15	27,9	7,8
RI150+8	51,9	51,9	9,1	40,4	11,4	29,9	15	29,9	7,8
RI150+10	53,9	53,9	9,1	42,4	11,4	31,9	15	31,9	7,8
RI150+12	55,8	55,8	9,1	44,3	11,4	33,8	15	33,8	7,8
RII120+0	44	44	10,2	32,5	12,7	22	16,7	22	8,7
RII120+2	46	46	10,2	34,5	12,7	24	16,7	24	8,7
RII120+4	48	48	10,2	36,5	12,7	26	16,7	26	8,7
RII120+6	49,9	49,9	10,2	38,4	12,7	27,9	16,7	27,9	8,7
RII120+8	51,9	51,9	10,2	40,4	12,7	29,9	16,7	29,9	8,7
RII120+10	53,9	53,9	10,2	42,4	12,7	31,9	16,7	31,9	8,7
RII120+12	55,8	55,8	10,2	44,3	12,7	33,8	16,7	33,8	8,7

Tab. 28: Vzdálenosti fázových vodičů a zemních lan od země a svislé osy stožáru DONAU, pro různé typy a základní výšky; N – nosný; R – kotevní [45]

DELTA		Zemní lano		Fáze 1		Fáze 2		Fáze 3	
Typ stožáru	výška stožáru [m]	y [m]	x [m]	y [m]	x [m]	y [m]	x [m]	y [m]	x [m]
NA + 0	33,85	33,35	6,6	27,15	0	17,15	8	17,15	8
NA + 3	36,8	36,3	6,6	30,1	0	20,1	8	20,1	8
NA + 6	39,75	39,25	6,6	33,05	0	23,05	8	23,05	8
NA + 9	42,7	42,2	6,6	36	0	26	8	26	8
NA + 12	45,65	45,15	6,6	38,95	0	28,95	8	28,95	8
NA + 15	48,6	48,1	6,6	41,9	0	31,9	8	31,9	8
NA + 18	51,55	51,05	6,6	44,85	0	34,85	8	34,85	8
NB + 0	33,85	33,35	6,6	27,15	0	17,15	9	17,15	9
NB + 3	36,8	36,3	6,6	30,1	0	20,1	9	20,1	9
NB + 6	39,75	39,25	6,6	33,05	0	23,05	9	23,05	9
NB + 9	42,7	42,2	6,6	36	0	26	9	26	9
NB + 12	45,65	45,15	6,6	38,95	0	28,95	9	28,95	9
RV180A + 0	31,3	31,3	6	27,3	0	18,8	8	18,8	8
RV180A + 3	34,3	34,3	6	30,3	0	21,8	8	21,8	8
RV180A + 9	40,2	40,2	6	36,2	0	27,7	8	27,7	8
RV175B + 0	31,3	31,3	6	27,3	0	18,8	9	18,8	9
RV150A + 0	31,3	31,3	6	27,3	0	18,8	8,3	18,8	8,3
RV150A + 0	34,3	34,3	6	30,3	0	21,8	8,3	21,8	8,3
RV150B + 0	31,3	31,3	6	27,3	0	18,8	9,3	18,8	9,3
RV120A + 0	31,3	31,3	6	27,3	0	18,8	9,2	18,8	9,2
RV120A + 3	34,3	34,3	6	30,3	0	21,8	9,2	21,8	9,2
RV120A + 6	37,2	37,2	6	33,2	0	24,7	9,2	24,7	9,2
RV120A + 9	40,2	40,2	6	36,2	0	27,7	9,2	27,7	9,2
RV120A + 12	43,1	43,1	6	39,1	0	30,6	9,2	30,6	9,2
RV120A + 0	31,3	31,3	6	27,3	0	18,8	10,4	18,8	10,4
RV120A + 3	34,3	34,3	6	30,3	0	21,8	10,4	21,8	10,4

Tab. 29: Vzdálenosti fázových vodičů a zemních lan od země a svislé osy stožáru DELTA, pro různé typy a základní výšky; N – nosný; R – kotevní [32]

11 Příloha F: Schéma rozvržení SVC



Obr. 33: Popsané schéma rozvržení SVC

L-SVC – Tyristory řízené tlumivky

C-SVC – kondenzátory SVC

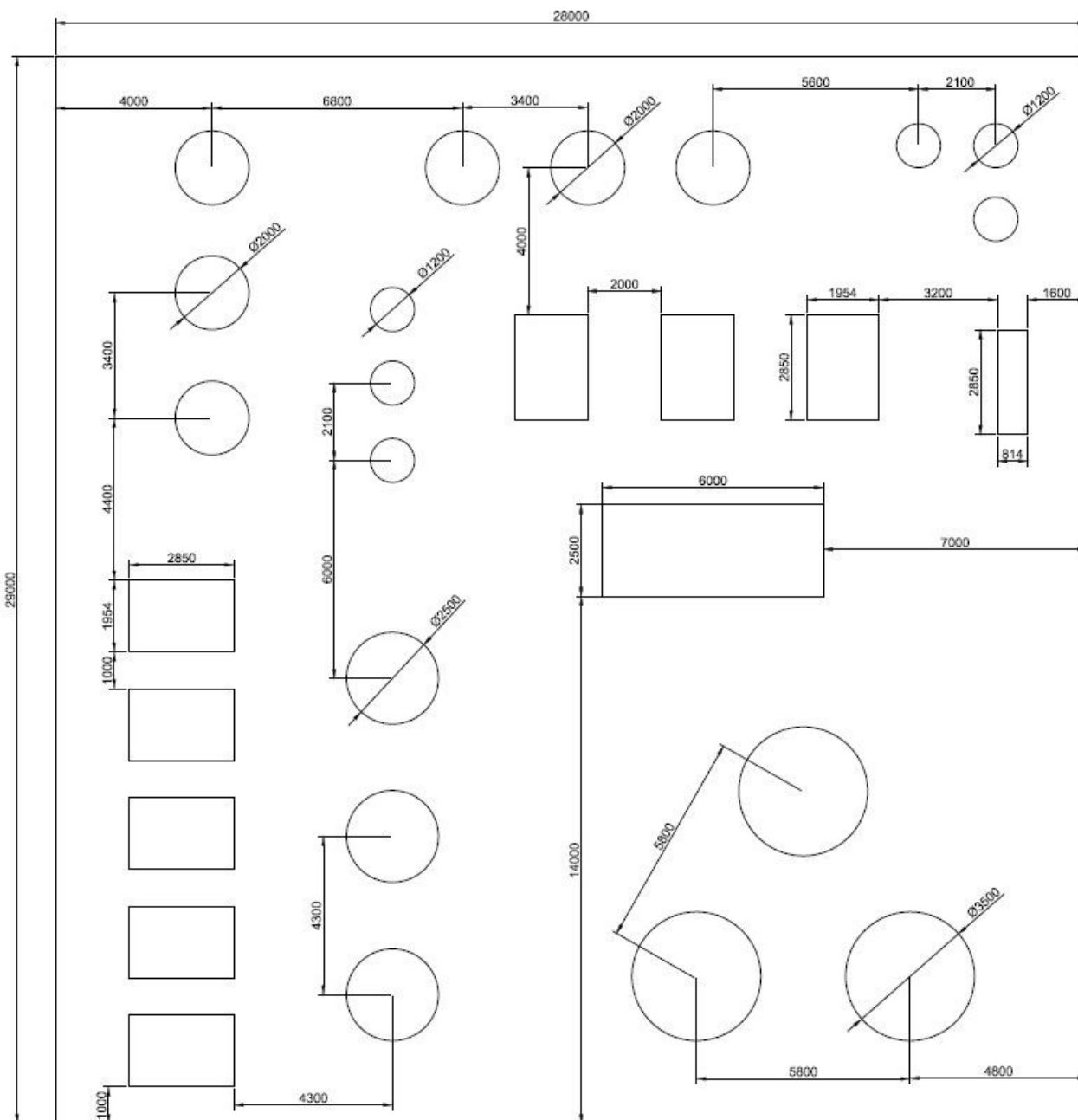
L_C-SVC – předředné tlumivky kondenzátorů SVC

C_5, L_5 – filtr 5. harmonické; kondenzátorové baterie pro jednotlivé fáze jsou umístěny na sobě

C_7, L_7 – filtr 7. harmonické

C_11, L_11 – filtr 11. harmonické; kondenzátorové baterie pro jednotlivé fáze jsou umístěny na sobě

C_13, L_13 – filtr 13. harmonické



Obr. 34: Schéma rozvržení SVC; s rozměry

Rozměry tlumivek z katalogů firem TRENCH Ltd., ALSTOM, SIEMENS a Nokian Capacitors. Tlumivky pro vyšší harmonické odhadnuty podle stávajících aplikací těchto firem.

Rozměry kondenzátorových baterií z katalogu ABB.

C-SVC – 74 x 1000 kVAR; uspořádání - QBANK-A pro 16 kondenzátorů

C_5 – 16 x 1000 kVAR; uspořádání - QBANK-A pro 16 kondenzátorů

C_7 – 26 x 1000 kVAR; uspořádání - QBANK-A pro 16 kondenzátorů

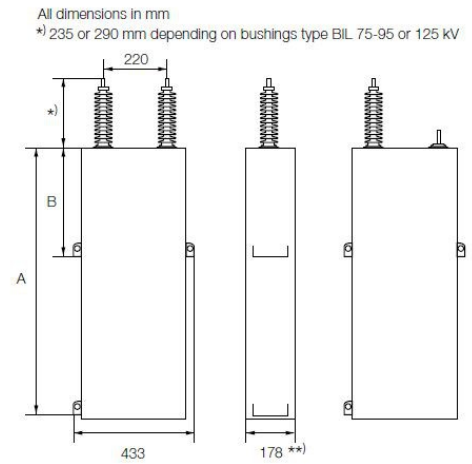
C_11 – 14 x 1000 kVAR; uspořádání - QBANK-A pro 16 kondenzátorů

C_13 – 6 x 1000 kVAR; uspořádání - QBANK-A pro 8 kondenzátorů

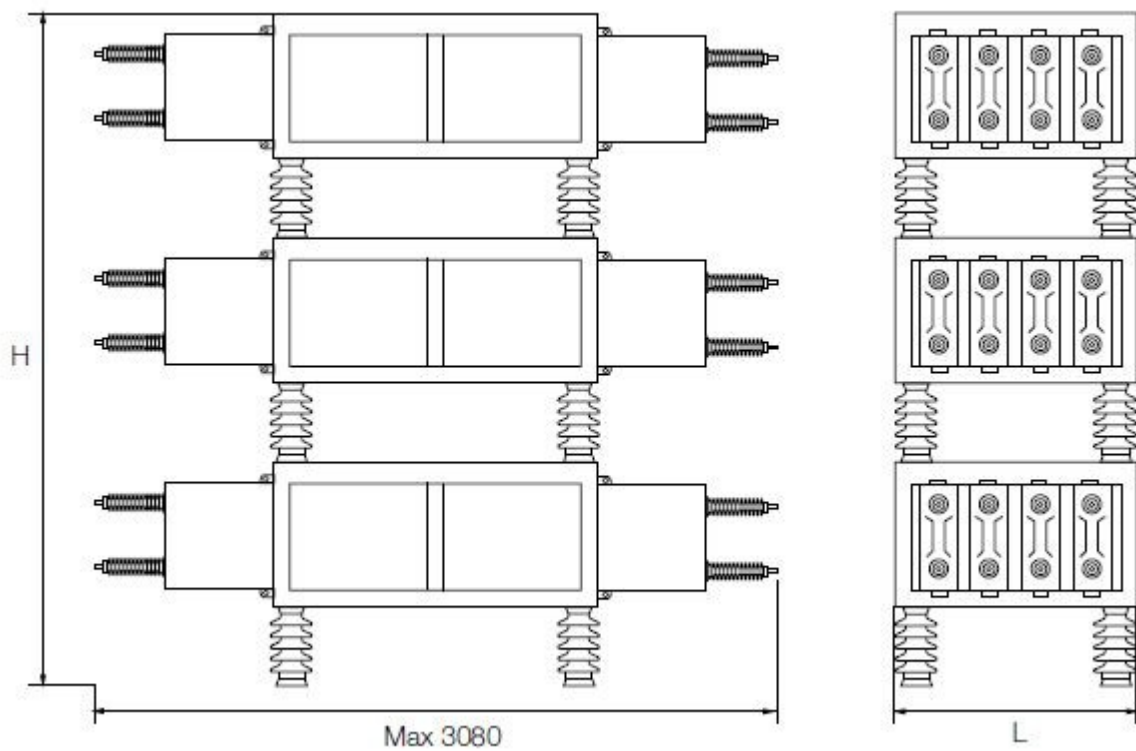
Dimensions and maximum power ratings

Size	A	B	Weight	Power	
				50 Hz	60 Hz
	mm	mm	kg	kvar	kvar
220	240	140	23	155	185
330	295	140	28	220	260
440	345	140	32	270	325
550	405	190	39	310	370
660	460	190	44	360	430
770	525	350	49	410	490
880	635	350	59	540	645
990	685	350	63	595	715
130	750	350	67	660	790
140	820	370	73	725	870
160	920	320	82	800	960
180	1030	430	90	900	1080
200	1140	535	100	1000	1200

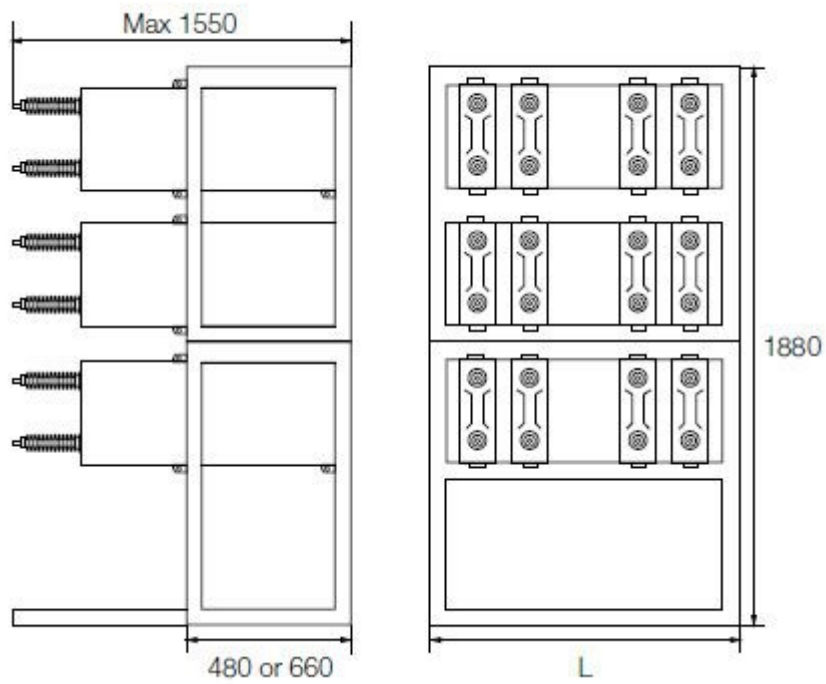
** The units can also be delivered in a 138 mm configuration (slim unit)



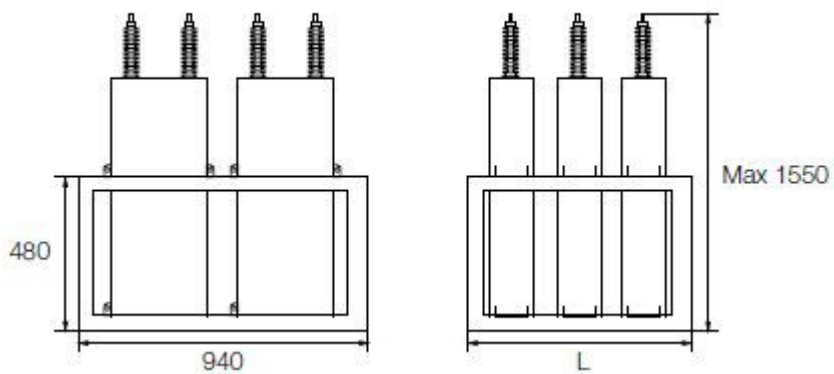
Obr. 35: Rozměry kondenzátorů [51]



Obr. 36: Uspořádání kondenzátorové baterie typ QBANK-A [51]



Obr. 37: Uspořádání kondenzátorové baterie typ QBANK-B [51]



Obr. 38: Uspořádání kondenzátorové baterie typ QBANK-C [51]