

České vysoké učení technické v Praze

Fakulta elektrotechnická

Katedra elektroenergetiky



**Vliv kompenzace kabelových sítí na stabilitu
zdrojů**

**Cable Network Compensation Influence on
Power Sources Stability**

Diplomová práce

MASTER'S THESIS

JOSEF NÁDVORNÍK

Vedoucí bakalářské práce: ING. MARTIN PISTORA

Obor: Aplikovaná elektrotechnika

2016

České vysoké učení technické v Praze
Fakulta elektrotechnická

Katedra elektroenergetiky

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

Student: **Josef Nádvorník**

Studijní program: Elektrotechnika, energetika a management
Obor: Elektroenergetika

Název tématu: **Vliv kompenzace kabelových sítí na stabilitu zdrojů**

Pokyny pro vypracování:

- 1) Teoreticky popsat problematiku stability strojů a soustavy.
- 2) Vytvořit dynamický model elektrizační soustavy.
- 3) Na vytvořeném modelu zhodnotit vliv rostoucí kabelizace na stabilitu zdrojů v ES.
- 4) Na vytvořeném modelu zhodnotit vliv kompenzace nabíjecího výkonu kabelových sítí na stabilitu zdrojů v ES.

Seznam odborné literatury:

- [1] Trojánek, Z.; Hájek, J.; Kvasnica, P.: Přejídné jevy v elektrizačních soustavách, Vysokoškolská učebnice. 1. vyd. Praha: SNTL, 1987.
- [2] Kolektiv autorů: Řízení a stabilita elektrizační soustavy. Asociace Energetických Manažerů, Praha, 2013. ISBN: 978-80-260-44671-1
- [3] Kundur, P.: Power System Stability and Control. McGraw-Hill Professional, 1. Vydání, 1994. ISBN: 978-0070359581
- [4] Kolcun, M., Griger, V.: Riadenie prevádzky elektrizačnej sústavy, Mercury – Smékal, Košice, 2003. ISBN 80-89061-57-5.
- [5] Toman, P.; Drápela, J.; Mišák, S.; Orságová, J.; Paar, M.; Topolánek, D.; Bok, J.; Novotný, J.; Škoda, J. Provoz distribučních soustav. České vysoké učení technické v Praze, 2011. ISBN: 978-80-01-04935-8.

Vedoucí: Ing. Martin Pistora

Platnost zadání: do konce letního semestru 2015/2016

L.S.

Ing. Jan Švec Ph.D.
vedoucí katedry

prof. Ing. Pavel Ripka, CSc.
děkan

V Praze dne 1.4.2015

Abstrakt

Diplomová práce se zabývá vlivy kabelizace a její kompenzace na stabilitu zdrojů v elektrizační soustavě. V teoretické části se práce zaměřuje na technický popis stability soustavy se zaměřením na úhlovou stabilitu. Praktická část práce se soustředí na tvorbu dynamického modelu elektrizační soustavy a hodnocení vlivu kabelizace soustavy pomocí CCT na stabilitu generátoru. Další cíl práce spočívá ve vyhodnocení vlivu kompenzace kabelových sítí na stabilitu stroje.

Klíčová slova

úhlová stabilita, dynamický model, kompenzace, zátěžný úhel, critical clearing time

Abstract

The thesis deals with the influences of the cabling and its compensation on the stability of the resources in the electricity grid. In the theoretical part of the work focuses on the technical description of the stability of the system, with a focus on the angular stability. The practical part of the thesis focuses on the creation of a dynamic model of the power system and the evaluation of the influence of the cabling system using the CCT on the stability of the generator. Another goal of the work consists in the evaluation of the impact of the compensation cable networks on the stability of the machine.

Keywords

angle stability, dynamic model, compensation, load angle, critical clearing time

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem předloženou práci vypracoval samostatně a že jsem uvedl veškeré použité informační zdroje v souladu s Metodickým pokynem o dodržování etických principů při přípravě vysokoškolských závěrečných prací.

V Praze dne

.....

Josef Nádvorník

Poděkování

Tímto bych rád poděkoval vedoucímu práce a konzultantovi Ing. Martinu Pistorovi ze společnosti ČEPS, a.s. za jeho cenné rady, vedení mé práce diplomové práce, čas a ochotu. Také děkuji svým nejbližším za podporu v době studia.

Obsah

1. Úvod	12
1.1 Cíle práce	12
2. Stabilita strojů a soustavy	13
2.1. Úhlová stabilita	14
2.1.1 Stabilita malých kyvů	14
2.1.1.1 Vliv rezistance	19
2.1.1.2 Vliv regulace buzení	20
2.1.1.3 Rovnice kývání	21
2.1.2 Přechodná stabilita	23
2.1.2.1 Metoda ploch	23
2.1.2.2 Critical Clearing Time	27
2.1.2.3 Vedení	28
3. Dynamický model soustavy	29
3.1 Vstupní data	30
3.2 Vypočtené hodnoty	32
3.3 Ustálený stav	34
4. Vliv kabelizace na stabilitu generátoru	36
4.1. Zkrat v soustavě	36
4.2. Kabelizace vedení	38
5. Vliv kompenzace kabelových sítí na stabilitu	43
6. Závěr	47
6.1 Porovnání cílů s výsledky	47
7. Použitá literatura	50
8. Přílohy	51
Seznam příloh	51
8.1 Příloha 1 - Průběhy zátěžného úhlu při různých stupních kompenzace v uzlu 2 (etapa 0)	52
8.2 Příloha 2 - Průběhy zátěžného úhlu při různých stupních kompenzace v uzlu 2 (etapa 1)	54

8.3 Příloha 3 - Průběhy zátěžného úhlu při různých stupních kompenzace v uzlu 2 (etapa 2)	56
8.4 Příloha 4 - Průběhy zátěžného úhlu při různých stupních kompenzace v uzlu 2 (etapa 3)	58
8.5 Příloha 5 - Průběhy zátěžného úhlu při různých stupních kompenzace v uzlu 2 (etapa 4)	60
8.6 Příloha 6 - Průběhy zátěžného úhlu při různých stupních kompenzace v uzlu 2 (etapa 5)	62
8.7 Příloha 7 - Průběhy zátěžného úhlu při různých stupních kompenzace v uzlu 2 (etapa 6)	64
8.8 Příloha 8 - Průběhy zátěžného úhlu při různých stupních kompenzace v uzlu 2 (etapa 7)	66
8.9 Příloha 9 - Průběhy zátěžného úhlu při různých stupních kompenzace v uzlu 2 (etapa 8)	68

Seznam obrázků

Obrázek 1 - rozdělení stability soustavy	13
Obrázek 2 - schéma jednoduché soustavy.....	14
Obrázek 3 - fázorový diagram jednoduché soustavy	15
Obrázek 4 - závislost výkonu na zátěžném úhlu	15
Obrázek 5 - stabilní a nestabilní část vnitřní charakteristiky	16
Obrázek 6 - závislost synchr. výkonu na úhlu δ	17
Obrázek 7 - průběhy výkonů v soustavě	19
Obrázek 8 - závislost činitele zmenšení na poměru R/X	20
Obrázek 9 - závislost $P=f(\delta)$ při regulaci buzení	20
Obrázek 10 - schématický náčrt synchronního generátoru.....	22
Obrázek 11 - jednopólová soustava	23
Obrázek 12 - schéma soustavy.....	23
Obrázek 13 - výkonové charakteristiky	24
Obrázek 14 – zkrat a vypnutí zkratu	26
Obrázek 15 - výkonové charakteristiky ke zkratu	26
Obrázek 16 - rychlé řízení ventilů	27
Obrázek 17 - průřez trojžilového kabelu se společným kovovým pláštěm	28
Obrázek 18 - model soustavy	29
Obrázek 19 - zátěžný úhel δ generátoru G_1 při ustáleném stavu sítě	34
Obrázek 20 - zkrat v soustavě	36
Obrázek 21 - průběh zátěžného úhlu při době zkratu $< CCT$	37
Obrázek 22 - průběh zátěžného úhlu při době zkratu $> CCT$	38
Obrázek 23 - kabelizace soustavy v jednotlivých etapách	40
Obrázek 24 - průběh CCT při vzrůstající kabelizaci	41
Obrázek 25 - průběh zátěžného úhlu	42
Obrázek 26 - průběhy CCT při různých stupních kompenzace v uzlu 2	46
Obrázek 27 - průběh CCT při vzrůstající kabelizaci	48
Obrázek 28 - průběhy CCT při různých stupních kompenzace v uzlu 2	49
Obrázek 29 - průběh zátěžného úhlu bez kompenzace	52
Obrázek 30 - průběh zátěžného úhlu s tlumivkou 50MVar.....	52
Obrázek 31 - průběh zátěžného úhlu s tlumivkou 105MVar.....	53
Obrázek 32 - průběh zátěžného úhlu s tlumivkou 210MVar.....	53
Obrázek 33 - průběh zátěžného úhlu bez kompenzace	54
Obrázek 34 - průběh zátěžného úhlu s tlumivkou 50MVar.....	54
Obrázek 35 - průběh zátěžného úhlu s tlumivkou 105MVar.....	55
Obrázek 36 - průběh zátěžného úhlu s tlumivkou 210MVar.....	55
Obrázek 37 - průběh zátěžného úhlu bez kompenzace.....	56
Obrázek 38 - průběh zátěžného úhlu s tlumivkou 50MVar.....	56
Obrázek 39 - průběh zátěžného úhlu s tlumivkou 105MVar.....	57

Obrázek 40 - průběh zátěžného úhlu s tlumivkou 210MVar.....	57
Obrázek 41 - průběh zátěžného úhlu bez kompenzace.....	58
Obrázek 42 - průběh zátěžného úhlu s tlumivkou 50MVar.....	58
Obrázek 43 - průběh zátěžného úhlu s tlumivkou 105MVar.....	59
Obrázek 44 - průběh zátěžného úhlu s tlumivkou 210MVar.....	59
Obrázek 45 - průběh zátěžného úhlu bez kompenzace.....	60
Obrázek 46 - průběh zátěžného úhlu s tlumivkou 50MVar.....	60
Obrázek 47 - průběh zátěžného úhlu s tlumivkou 105MVar.....	61
Obrázek 48 - průběh zátěžného úhlu s tlumivkou 210MVar.....	61
Obrázek 49 - průběh zátěžného úhlu bez kompenzace.....	62
Obrázek 50 - průběh zátěžného úhlu s tlumivkou 50MVar.....	62
Obrázek 51 - průběh zátěžného úhlu s tlumivkou 105MVar.....	63
Obrázek 52 - průběh zátěžného úhlu s tlumivkou 210MVar.....	63
Obrázek 53 - průběh zátěžného úhlu bez kompenzace (bez zkratu).....	64
Obrázek 54 - průběh zátěžného úhlu s tlumivkou 50MVar.....	64
Obrázek 55 - průběh zátěžného úhlu s tlumivkou 105MVar.....	65
Obrázek 56 - průběh zátěžného úhlu s tlumivkou 210MVar.....	65
Obrázek 57 - průběh zátěžného úhlu bez kompenzace (bez zkratu).....	66
Obrázek 58 - průběh zátěžného úhlu s tlumivkou 50MVar (bez zkratu).....	66
Obrázek 59 - průběh zátěžného úhlu s tlumivkou 105MVar.....	67
Obrázek 60 - průběh zátěžného úhlu s tlumivkou 210MVar.....	67
Obrázek 61 - průběh zátěžného úhlu s tlumivkou 105MVar (bez zkratu).....	68
Obrázek 62 - průběh zátěžného úhlu s tlumivkou 210MVar.....	68

Seznam tabulek

Tabulka 1 - zadané uzlové hodnoty	30
Tabulka 2 - zadané hodnoty pro větve.....	32
Tabulka 3 - parametry generátorů.....	32
Tabulka 4 - vztažné veličiny.....	32
Tabulka 5 - skutečné hodnoty pro větve	34
Tabulka 6 - skutečné hodnoty zadaného napětí uzlů	34
Tabulka 7 - parametry kabelového vedení	38
Tabulka 8 - parametry a nabíjecí výkony kabelů.....	39
Tabulka 9 - hodnoty CCT v jednotlivých etapách kabelizace	41
Tabulka 10 - kompenzační tlumivky.....	43
Tabulka 11 - výkony tlumivek pro úplnou kompenzaci nabíjecího výkonu	44
Tabulka 12 - kombinace tlumivek pro úplnou kompenzaci nabíjecího výkonu....	44

Seznam použitých zkratk a symbolů

a.....	vzdálenost vodiče od středu
B.....	součinitel tlumení
$B_{[p.u.]}$	susceptance venkovního vedení v poměrných jednotkách
B_{kab}	susceptance kabelového vedení
B_m	modifikovaný součinitel tlumení
B_{ved}	susceptance venkovního vedení
C.....	provozní kapacita kabelového vedení
$\cos(\phi)$	účinník
E.....	elektromotorické napětí
f.....	frekvence sítě
H_m	moment hybnosti
I.....	proud
J.....	moment setrvačnosti
k.....	činitel zmenšení
$k_{p\%}$	činitel rezervy výkonu
L.....	indukčnost
l.....	délka vedení
M_b	brzdny moment
M_e	brzdny moment
M_h	hnací moment
M_m	brzdny moment v ustáleném stavu
P.....	činný výkon
p.....	počet pólpárů
P_1	vnitřní výkon generátoru
P_2	výkon dodávaný do sítě
P_c	synchronizační výkon
P_{do}	dodávaný činný výkon do uzlu zdrojem
P_e	elektrický výkon
P_m	mechanický výkon turbíny
P_{max}	maximální přenášený výkon
$P_{max(x)}$	maximální výkon dodávaný do sítě při zanedbání rezistance
$P_{max(z)}$	maximální výkon dodávaný do sítě při respektování rezistance
P_{odb}	odebíraný činný výkon z uzlu

P_p	přirozený výkon
Q_{do}	dodávaný jalový výkon do uzlu zdrojem
Q_{nab}	nabíjecí výkon kabelových vedení
Q_{odb}	odebíraný jalový výkon z uzlu
R	odpor
r	poloměr vodiče
$R_{[p.u.]}$	odpor venkovního vedení v poměrných jednotkách
S^-	brzdící plocha
S^+	urychlující plocha
S_n	jmenovitý zdánlivý výkon
S_{vz}	vztažný zdánlivý výkon
T_m	časová konstanta
U	napětí
U_n	jmenovité napětí
U_{vz}	vztažné napětí
U_{zad}	zadané napětí
$U_{zad[p.u.]}$	zadané napětí v poměrných jednotkách
X	reaktance venkovního vedení
$X_{[p.u.]}$	reaktance venkovního vedení v poměrných jednotkách
X_d	podélná reaktance
X_q	příčná reaktance
X_x	reaktance venkovního vedení na kilometr
Y_{vz}	vztažná admitance
Z	impedance
Z_{vz}	vztažná impedance
α	úhel
δ	zátěžný úhel
δ_e	elektrický úhel
δ_m	mechanický úhel
δ_{max}	zátěžný úhel pro maximální přenášený výkon
ΔP	změna činného výkonu
$\Delta \delta$	změna zátěžného úhlu
ϵ_0	úhlové zrychlení
ϵ_r	relativní permitivita izolace
ω	úhlová rychlost
ω_s	synchronní úhlová rychlost

CCT.....	critical clearing time
ES.....	elektrizační soustava
PS.....	přenosová soustava

1. Úvod

Tématem diplomové práce je vliv kompenzace kabelových sítí na stabilitu zdrojů v soustavě. Kabelové sítě jsou nedílnou součástí elektrizační soustavy, především ve městech, kde není vhodné rozvádět elektrickou energii stožárovým vedením kvůli bezpečnosti. Aktuálnost práce spočívá v růstu kabelizace soustavy (ve městech) a tím i vlivu na stabilitu zdrojů v soustavě.

1.1 Cíle práce

1. Teoreticky popsat problematiku stability strojů a soustavy

V této části popíšeme stabilitu soustavy se zaměřením na úhlovou stabilitu, vysvětlíme princip stability malých kyvů a přechodnou stabilitu. Popíšeme metodu ploch a pojem critical clearing time.

2. Vytvořit dynamický model elektrizační soustavy

V této části pomocí získaných vstupních dat vytvoříme dynamický model elektrizační soustavy v programu, který dokáže simulovat krátkodobé dynamické děje. Vytvořený model se musí nacházet v ustáleném stavu.

3. Na vytvořeném modelu zhodnotit vliv rostoucí kabelizace na stabilitu zdrojů v ES

Tato část se zaměří na výpočet parametrů kabelů, vytvoření rozruchu v soustavě (zkrat) a určení první hodnoty CCT, jakožto hodnotitele přechodné stability. Dále budeme kabelizovat soustavu v jednotlivých etapách a určovat pro každou etapu zvlášť hodnotu CCT.

4. Na vytvořeném modelu zhodnotit vliv kompenzace nabíjecího výkonu kabelových sítí na stabilitu zdrojů v ES

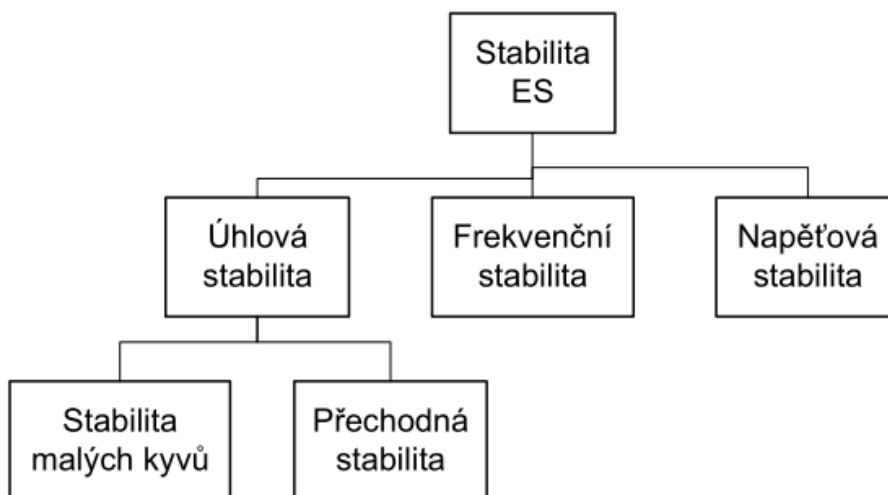
Tato pasáž bude zkoumat opět pomocí CCT vliv kompenzace nabíjecího výkonu kabelových sítí na stabilitu generátoru a určíme, v jakém uzlu je nejvhodnější umístit kompenzační tlumivku. Také zaznamenáme průběhy CCT pro částečnou kompenzaci nabíjecího výkonu v nejvhodnějším uzlu.

2. Stabilita strojů a soustavy

Stabilitu soustavy (provozu) rozumíme jako schopnost udržet rovnovážný stav během normálního provozu i po přechodných dějích způsobených vnějšími vlivy, dispečerským řízením či poruchovými výpadky (rozruchem). Jestliže dojde v soustavě k rozruhu, musí se soustava vrátit do rovnovážného stavu a jako celek zůstat nedotčena. Rozruch si můžeme představit jako změnu:

- změny provozního charakteru (změna odebíraného nebo dodávaného výkonu)
- změny topologie sítě (vypínání nebo zapínání vedení)
- poruchy zařízení (skryté vady či zrychlené stárnutí)
- poruchy způsobené počasím (úder blesku, silný vítr, vysoká teplota)
- poruchy, jejichž příčinou je lidský faktor

Protože elektrizační soustava představuje složitý systém, který je vystavován neustálým změnám zvnějšku a zevnitř, je užitečné z hlediska zkoumání odolnosti soustavy proti rozruhům rozdělit stabilitu do několika dílčích skupin. To při analýze umožňuje přijmout určité zjednodušení pro reprezentaci soustavy. Rozdělení stability můžeme vidět na obrázku 1.



Obrázek 1 - rozdělení stability soustavy [1]

Vzhledem k praktické části diplomové práce jsme se v teoretické části zaměřili na úhlovou stabilitu.

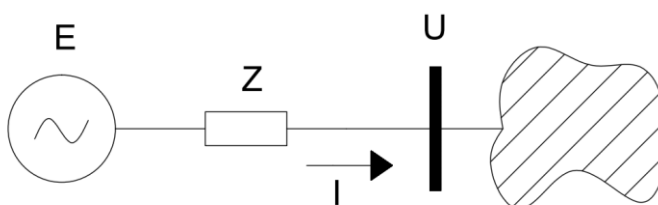
2.1. Úhlová stabilita

Úhlová stabilita souvisí s pohybem rotoru stroje, nejčastěji synchronního generátoru, protože se tento typ nejvíce podílí na výrobě elektrické energie. Úhlová stabilita se tedy vztahuje na schopnost synchronních generátorů zůstat po rozruhu v synchronním provozu se zbytkem propojené soustavy. Tato schopnost souvisí s udržováním rovnováhy mezi mechanickým momentem poháněcího stroje, nejčastěji turbína, a elektrickým momentem generátoru. Úhlová stabilita spadá do kategorie elektromechanické přechodové děje, tedy krátkodobé děje, které trvají řádově sekundy.

Úhlovou stabilitu dělíme na stabilitu malých kyvů a přechodnou stabilitu. Oba termíny jsou v české republice známy spíše pod názvy statická a dynamická stabilita, v této práci budeme používat pojmy stabilita malých kyvů (čili statická stabilita) a přechodná stabilita (dynamická stabilita). [1],[2]

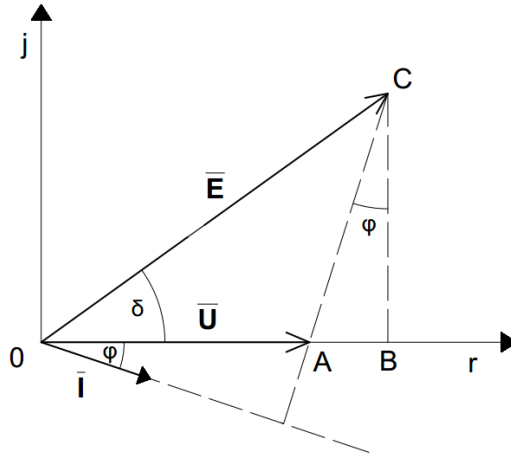
2.1.1 Stabilita malých kyvů

Stabilita malých kyvů řeší situace, kdy dochází pouze k malým odchylkám zátěžného úhlu a výkonu stroje. Stabilitu si vysvětlíme na jednoduché soustavě, viz. obrázek 2. Pro zjednodušení zanedbáváme ztráty a předpokládáme konstantní budící proud.



Obrázek 2 - schéma jednoduché soustavy

Indukované elektromotorické napětí E má konstantní velikost, ale v průběhu přechodného děje se bude měnit jeho frekvence, zatímco napětí U má nejen konstantní velikost, ale také i frekvenci, protože předpokládáme tvrdou síť. Za předpokladu, že se jedná o stroj s hladkým rotorem, platí pro soustavu fázorový diagram znázorněný na obrázku 3.



Obrázek 3 - fázorový diagram jednoduché soustavy

Pro dodávaný činný výkon P do tvrdé sítě platí vztah

$$P = U * I * \cos(\varphi) \quad (1)$$

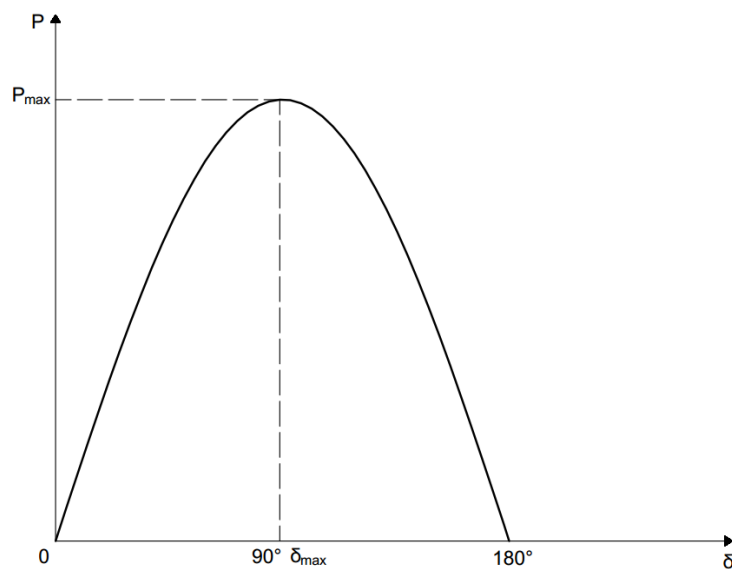
Z fázorového diagramu vypočítáme úsečku BC

$$\overline{BC} = I * X * \cos(\varphi) = E * \sin(\delta) \quad (2)$$

Po dosazení a úpravě dostáváme

$$P = \frac{E * U}{X} * \sin(\delta) \quad (3)$$

Tato rovnice vyjadřuje závislost výkonu P na zátěžném úhlu δ . Jelikož jsou hodnoty U , E a X konstantní, je graficky tato rovnice sinusovka. Tuto závislost, která se nazývá vnitřní charakteristikou, můžeme vidět na obrázku 4.



Obrázek 4 - závislost výkonu na zátěžném úhlu

Z průběhu je očividné, že naši zjednodušenou soustavu nelze zatížit libovolným výkonem. Maximální možný přenášený výkon je určen úhlem δ_{max} . Jestliže chceme zjistit maximum průběhu, rovnici derivujeme a pokládáme rovno nule:

$$\left(\frac{dP}{d\delta}\right)_{\delta=\delta_{max}} = \left(\frac{\frac{E*U}{X}*\sin(\delta)}{d\delta}\right)_{\delta=\delta_{max}} = 0 \quad (4)$$

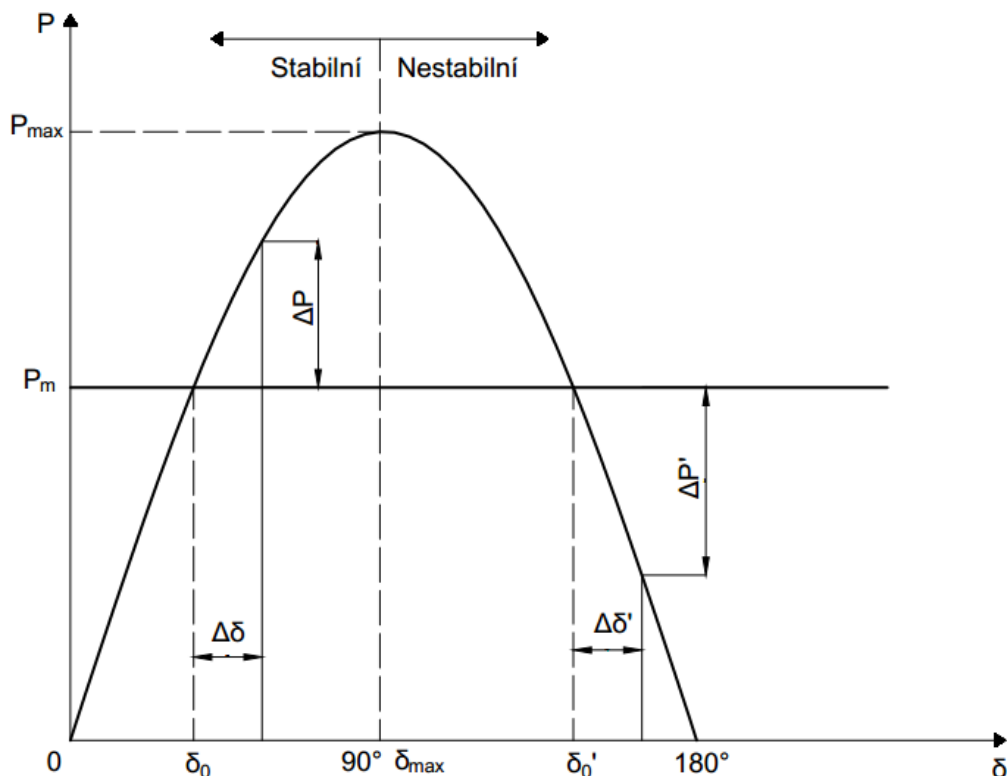
z čehož vyplývá

$$\cos(\delta_{max}) = 0 \quad (5); \quad \delta_{max} = 90^\circ \quad (6); \quad \sin(\delta_{max}) = 1 \quad (7)$$

Tedy pro maximální výkon platí

$$P_{max} = \frac{E*U}{X} \quad (8)$$

Rostoucí velikost X má za následek klesání hodnoty maximálního výkonu P_{max} , zatímco rostoucí velikost E či U má za následek zvyšování hodnoty maximálního výkonu P_{max} . Pomocí dlouhého vedení není možné bez určitých opatření přenášet tak velký výkon jako krátkým vedením. S rostoucí délkou vedení roste X a tím pádem také úhel δ . [4]



Obrázek 5 - stabilní a nestabilní část vnitřní charakteristiky

Mechanický výkon turbíny P_m je závislý na množství a parametrech proudícího média a nikoliv na úhlu δ , můžeme jej zakreslit do vnitřní charakteristiky vodorovnou čarou. Mohou nastat tři případy:

- Mechanický výkon turbíny P_m je větší než P_{max} vnitřní charakteristiky. Generátor nemůže za této podmínky fungovat.
- Mechanický výkon turbíny P_m je roven P_{max} .
- Mechanický výkon turbíny P_m je menší než P_{max} . [5]

Právě třetí případ ($P_m < P_{max}$) je znázorněn na obrázku 5. Ukážeme, že soustava je stabilní v intervalu $0 < \delta < 90^\circ$ a nestabilní v $90^\circ < \delta < 180^\circ$. Tato situace ovšem platí pouze u strojů s hladkým rotorem, protože u strojů s vyniklými póly jsou hodnoty podélné a příčné reaktance různé. Vnitřní charakteristika se „deformuje“ a δ_{max} je menší než 90° . Jestliže výkon závisí pouze na úhlu δ , platí v pracovním bodě $[P_0, \delta_0]$ vztah

$$\Delta P = \left(\frac{dP}{d\delta} \right)_{\delta=\delta_0} * \Delta \delta \quad (9)$$

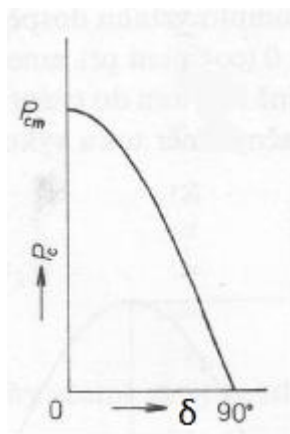
Při určité hodnotě úhlu δ je derivace výkonu podle úhlu δ rovna hodnotě P_c

$$\frac{dP}{d\delta} = P_c \quad (10)$$

Z předchozích dvou rovnic (9) a (10) dostaneme

$$\Delta \delta = \frac{\Delta P}{P_c} \quad (11)$$

Veličinu P_c nazýváme synchronizační výkon a můžeme jej interpretovat jako přírůstek přenášeného výkonu při zvětšení úhlu o 1° . Závislost synchronizačního výkonu P_c na úhlu δ je na obrázku 6.



Obrázek 6 - závislost synchr. výkonu na úhlu δ [4]

Úhel $\delta=90^\circ$ rozděluje charakteristiku na dva intervaly, $(0^\circ, 90^\circ)$ a $(90^\circ, 180^\circ)$. Pro každou hodnotu přenášeného výkonu P_0 existují dva možné úhly, a to δ_0 a δ'_0

(viz. Obrázek 5), ale pouze jeden z úhlů odpovídá stabilnímu chodu. Předpokládejme, že se úhel δ_0 zvětší o malou hodnotu $\Delta\delta$. V provozu tyto malé změny probíhají neustále (změna zatížení, napětí apod.). Této změně odpovídá i změna odebíraného výkonu o hodnotě ΔP . Jestliže se výkon turbíny nemění (konstantní mechanický příkon generátoru), je odebíraný výkon ze stroje větší o ΔP než výkon dodávaný do stroje. Tato situace zapříčiní pokles otáček rotoru generátoru. Úhel δ se tím pádem zmenší (ovšem pouze při provozu do dostatečně velké soustavy). Účinek působí proti příčině, která změnu vyvolala, klesá rozdíl mezi dodávaným a odebíraným výkonem. Generátor následkem setrvačnosti „přeběhne“ přes rovnovážný bod $[P_0, \delta_0]$ do oblasti pod bod δ_0 , kde je urychlován, to má za následek tlumené kývání generátoru, kterým se ustálí na původním bodu $[P_0, \delta_0]$. Pokud příčina změny úhlu $\Delta\delta$ nezanikla, regulační prvky turbíny (či generátoru) nastaví nový stav (rovnovážný bod) s jinými hodnotami $[P, \delta]$.

Obnovení rovnováhy nastává při hodnotě úhlu δ v intervalu $(0^\circ, 90^\circ)$. Z hlediska stability malých kyvů tento úsek představuje oblast stabilního provozu v ustáleném chodu soustavy. Tato oblast se také nazývá oblast přirozené stability.

Pokud změnu popsanou výše aplikujeme na pracovní bod soustavy se souřadnicemi $[P_0, \delta'_0]$, tak se při zvýšení úhlu o hodnotu $\Delta\delta'$ odebíraný výkon zmenší o hodnotu $\Delta P'$. Rotor generátoru zvýší své otáčky a tím pádem úhel δ poroste a rozdíl výkonů též. Nerovnováha se zvětšuje, následek nepůsobí proti příčině, proto nedojde k obnovení rovnovážného stavu. Otáčky generátoru by se zvyšovaly do té míry, než by mechanické ochrany odstavily soustrojí z provozu nebo by došlo k prokluzu pólů. Tudíž v bodě $[P_0, \delta'_0]$ není provoz možný a to platí pro celý interval $(90^\circ, 180^\circ)$. Tuto oblast nazýváme „oblast nestabilního provozu“ z hlediska stability malých kyvů.

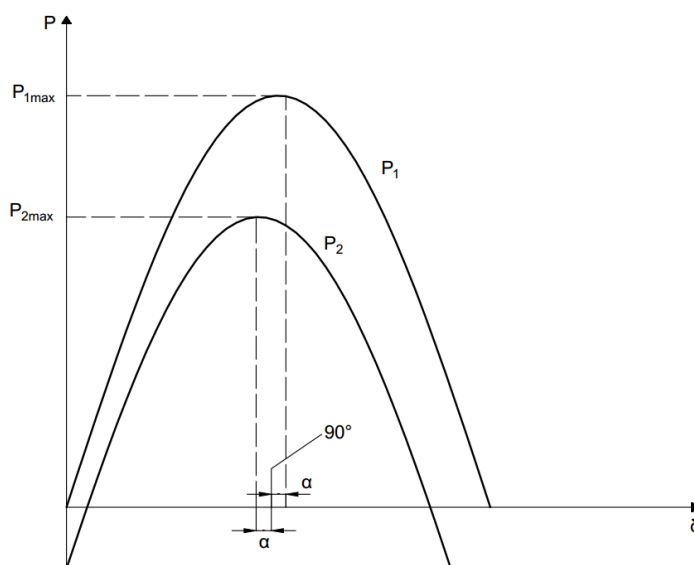
Překročení hodnoty úhlu $\delta=90^\circ$ znamená přechod do nestabilní oblasti provozu, proto se dodržuje určitá rezerva, aby při malých, náhodných změnách v soustavě nedošlo ke ztrátě stability.

$$k_{p\%} = \frac{P_{max} - P_0}{P_0} * 100 \quad (12)$$

Tento vzorec udává tzv. činitel rezervy výkonu $k_{p\%}$. Ten by podle zdroje [4] neměl v normálním provozu klesnout pod 20%. Při krátkodobých poruchových stávkách (např. vypnutí úseku s poruchou) může podle zdroje [4] činitel rezervy výkonu klesnout až na 8%.

2.1.1.1 Vliv rezistance

Rezistance v soustavě bývá poměrně malá, u transformátorů a synchronních generátorů je nepatrná, kdežto u elektrického vedení je nejvýraznější. Se vzrůstajícím napětím klesá významnost rezistance. Změna poměrů stability (u soustavy z obrázku 2 při respektování rezistance) je znázorněna na obrázku 7.

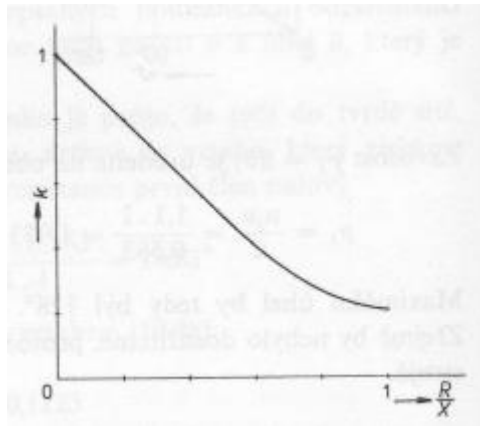


Obrázek 7 - průběhy výkonů v soustavě

Při zanedbání rezistance se obě křivky překrývají. \$P_1\$ je vnitřní výkon generátoru. Všimněme si, že úhel maxima výkonu \$P_{1max}\$ je \$\delta_{max}=90^\circ+\alpha\$, na rozdíl od přenosu bez rezistance se mez stability zvyšuje nad \$90^\circ\$. Křivka \$P_2\$ je výkon dodávaný do sítě, který je menší o ztráty vznikající na rezistanci \$R\$. Při úhlu nad \$90^\circ-\alpha\$ začíná křivka výkonu \$P_2\$ klesat, zatímco \$P_1\$ stále roste. Z průběhu \$P_2\$ můžeme vidět, že v porovnání s ideálním případem je hodnota maxima menší a tím pádem se mez stability také snížila. Rezistance tedy působí nepříznivě na dodávaný výkon do sítě. Poměrem maximální hodnoty výkonu \$P_2\$ při respektování rezistance k výkonu při zanedbání rezistance můžeme vyjádřit činitel zmenšení:

$$k = \frac{P_{\max(z)}}{P_{\max(x)}} = \frac{\frac{EU}{Z} - \frac{U^2}{Z} \sin(\alpha)}{\frac{EU}{X}} \quad (13)$$

\$P_{\max(z)}\$ je maximální výkon dodávaný do sítě bez zanedbání rezistance, zatímco \$P_{\max(x)}\$ rezistanci zanedbává. Na obrázku 8 vidíme závislost činitele \$k\$ na poměr rezistance a reaktance. Tento poměr je obvykle velmi malý a proto i zmenšení výkonu vlivem rezistance bývá nepatrné.

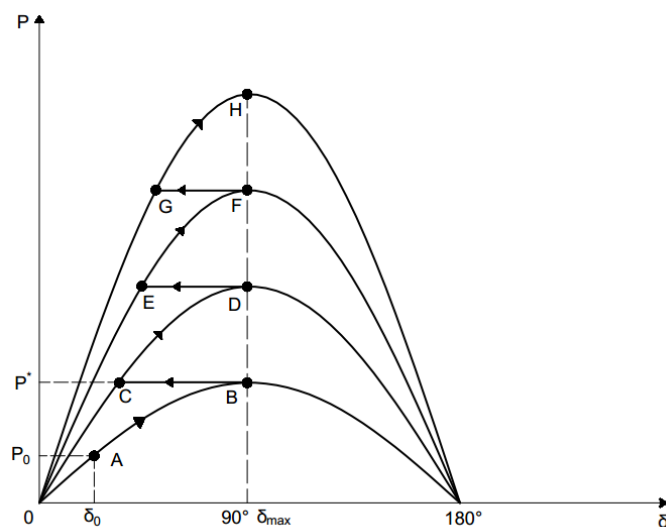


Obrázek 8 - závislost činitele zmenšení na poměru R/X [14]

2.1.1.2 Vliv regulace buzení

Protože při provozu soustavy dochází neustále ke změnám zatížení, mění se i proud synchronního generátoru, což vyvolává změnu úbytku napětí na impedanci generátoru. Tento úbytek by při konstantním indukovaném elektromotorickém napětí způsoboval kolísání svorkového napětí. Větší kolísání svorkového napětí je nepřijatelné, proto je třeba měnit budící proud, který mění indukované elektromotorické napětí tak, aby bylo svorkové napětí generátoru konstantní.

Jestliže se bude zatížení zvyšovat, musíme zvyšovat výkon turbíny (příkon generátoru). Nakonec se můžeme dostat až na zátěžný úhel 90° , který z důvodu stability nesmíme překročit. Pomůžeme si změnou buzení. Situaci znázorňuje obrázek 9.



Obrázek 9 - závislost $P=f(\delta)$ při regulaci buzení

Beze změny buzení (křivka 1) můžeme z výchozího bodu A pokračovat až do bodu B, kde se nachází mez stability. V bodě B zvětšíme buzení a díky tomu se dostaneme na křivku 2 s vyšším maximem. Přechod z bodu B do C je rovnoběžný s osou δ , jelikož se činný výkon s regulací buzení nemění. Z bodu C můžeme pokračovat dále při stálém buzení do bodu D, kde opět zvětšíme buzení, čímž nastane přechod do bodu E (křivka 3), kde se situace opakuje. Vidíme, že výsledný přenášený výkon (teoreticky v bodě D) je podstatně větší než původní přenášený výkon P^* . V reálném případě dochází k přechodu na křivku 2 dříve než v bodě B z důvodu poklesu svorkového napětí generátoru pod dovolenou hodnotu. Předpokladem pro zvyšování budícího proudu je dostatečné dimenzování buzení generátoru. [4]

2.1.1.3 Rovnice kývání

Rovnice kývání má zásadní význam pro popis dynamiky rotoru. Obecná pohybová rovnice rotující hmotnosti je popsána následujícím vztahem

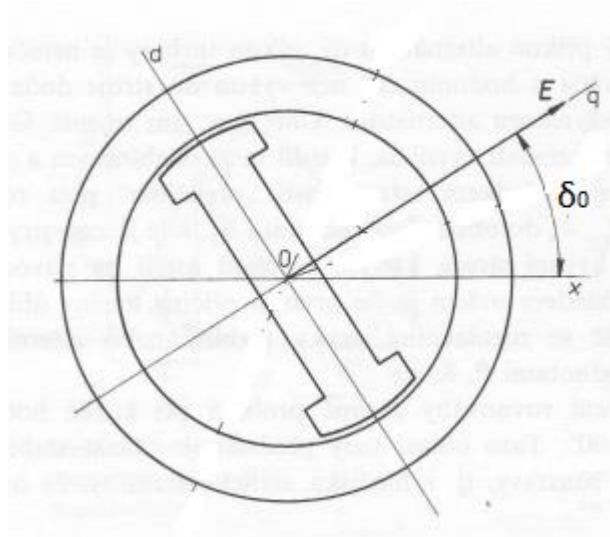
$$J * \frac{d\omega}{dt} + B * \omega = M_h - M_b \quad (14)$$

Veličina J je moment setrvačnosti roztočených hmot, ω úhlová rychlost, B součinitel tlumení, M_h hnací moment a M_b brzdny moment, který má opačný smysl (působí proti hnacímu momentu). Hnací moment představuje moment vytvářený turbínou, M_b elektromagnetický moment synchronního generátoru. V našem případě M_b budeme nadále značit jako M_e . Hnací moment turbíny se obvykle mění pomalu kvůli velkým časovým konstantám kotle a turbíny, elektromagnetický moment M_e se může měnit rychle, téměř okamžitě. Soustava se v ustáleném stavu otáčí synchronní rychlostí ω_s . Hnací moment lze pak vyjádřit jako

$$M_h = M_m + B * \omega_s \quad (15)$$

M_m představuje mechanický brzdny moment v ustáleném stavu, součin $B * \omega_s$ vyjadřuje tlumení. Jestliže je hnací moment větší než M_m a $B * \omega_s$, rotující hmoty se urychlují, zatímco v opačném případě se zpomalují. Elektrický úhel δ_e , který se u dvojpólového generátoru rovná úhlu mechanickému δ_m , svírá úhel mezi polohou rotoru vůči synchronně rotující referenční osou (viz obrázek 10). Tento úhel může být proměnný v čase, proto mechanickou úhlovou rychlost rotoru vyjádříme vztahem

$$\omega = \omega_s + \frac{d\delta_m}{dt} \quad (16)$$



Obrázek 10 - schématický náčrt synchronního generátoru [5]

Jestliže dosadíme tento vzorec a vztah hnacího momentu do základní rovnice (14), dostáváme

$$J * \frac{d^2 \delta_m}{dt^2} + B * \frac{d\delta_m}{dt} = M_m - M_e \quad (17)$$

Tuto rovnici přenásobíme synchronní úhlovou rychlostí ω_s a přijmeme předpoklad, že poměr okamžité a synchronní rychlosti je prakticky roven jedné, můžeme rovnici upravit do tvaru

$$H_m * \frac{d^2 \delta_m}{dt^2} + B_m * \frac{d\delta_m}{dt} = P_m - P_e \quad (18)$$

H_m je moment hybnosti a B_m je modifikovaný součinitel tlumení. V praxi se moment hybnosti rotoru vyjadřuje pomocí normalizované setrvačné konstanty stroje H . Veličinu H_m můžeme vyjádřit pomocí časové konstanty T_m , která vyjadřuje dobu, kdy rotor soustrojí dosáhne jmenovitých otáček, pokud je roztáčen konstantním momentem o velikosti S_n/ω_s .

$$T_m = \frac{J\omega_s^2}{S_n} \quad (19)$$

Pokud chceme předchozí rovnici (18) vyjádřit v elektrických veličinách, zavedeme

$$\delta_e = \delta_m * \frac{p}{2} \quad (20) \quad \omega_{es} = \omega_s * \frac{p}{2} \quad (21) \quad \omega_e = \omega * \frac{p}{2} \quad (22) \quad B_e = \frac{2B_m}{p} \quad (23),$$

kde p značí počet pólpárů. Výsledná rovnice má tedy tvar

$$\frac{T_m * S_n}{\omega_{es}} * \frac{d^2 \delta_e}{dt^2} + B_e * \frac{d\delta_e}{dt} = P_m - P_e \quad (24) \quad [5]$$

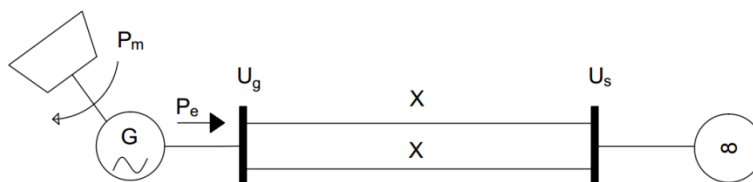
2.1.2 Přechodná stabilita

Stabilita malých kyvů se uplatňuje při malých změnách zátěžného úhlu, v praxi ovšem existuje velké množství náhlých změn stavu soustavy, které způsobují nerovnováhu dodávaného a odebíraného výkonu a tím pádem i velkých změn zátěžného úhlu. Mezi ně patří např. spínací pochody (vypnutí vedení) a zkratky. Změna impedance je skoková, soustava přechází do nového stavu elektromechanickými kmity, jelikož setrvačnost soustrojí nedovoluje okamžitou změnu úhlu δ . Průběh kmitů může probíhat tak, že se úhel ustálí na nové konstantní hodnotě nebo že bude stále narůstat. Pokud bude úhel neustále narůstat, znamená to ztrátu stability. V průběhu krátkého přechodného elektromechanického jevu můžeme z výše popsaných důvodů pokládat mechanický příkon generátoru za konstantní.

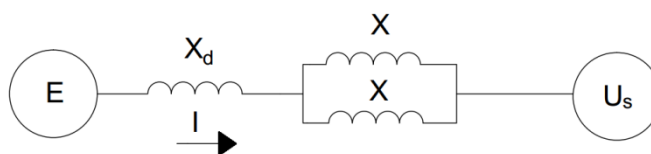
Vyšetřováním přechodné stability zjišťujeme průběh elektromechanického přechodného jevu. Posouzení přechodné stability umožňuje tzv. „pravidlo ploch“, kterým lze určit kritickou hodnotu zátěžného úhlu. V praxi je nutné znát kritickou dobu trvání stavu soustavy (např. zkratu), po jejímž překročení dochází ke ztrátě stability generátoru. [4]

2.1.2.1 Metoda ploch

Tuto metody si vysvětlíme na následující jednoduché jednopólové soustavě, viz. Obrázek 11. Synchronní generátor poháněn turbínou dodává elektrický výkon P_e . Výkon je přenášen přes dvojitě vedení o reaktanci X do tvrdé sítě, která je charakterizována konstantním napětím U_s . V ustáleném, výchozím stavu je elektrický výkon P_e roven mechanickému výkonu turbíny P_m . V tomto příkladě zanedbáváme elektrické a mechanické ztráty kvůli zjednodušení. Schéma soustavy je na obrázku 12. [1]

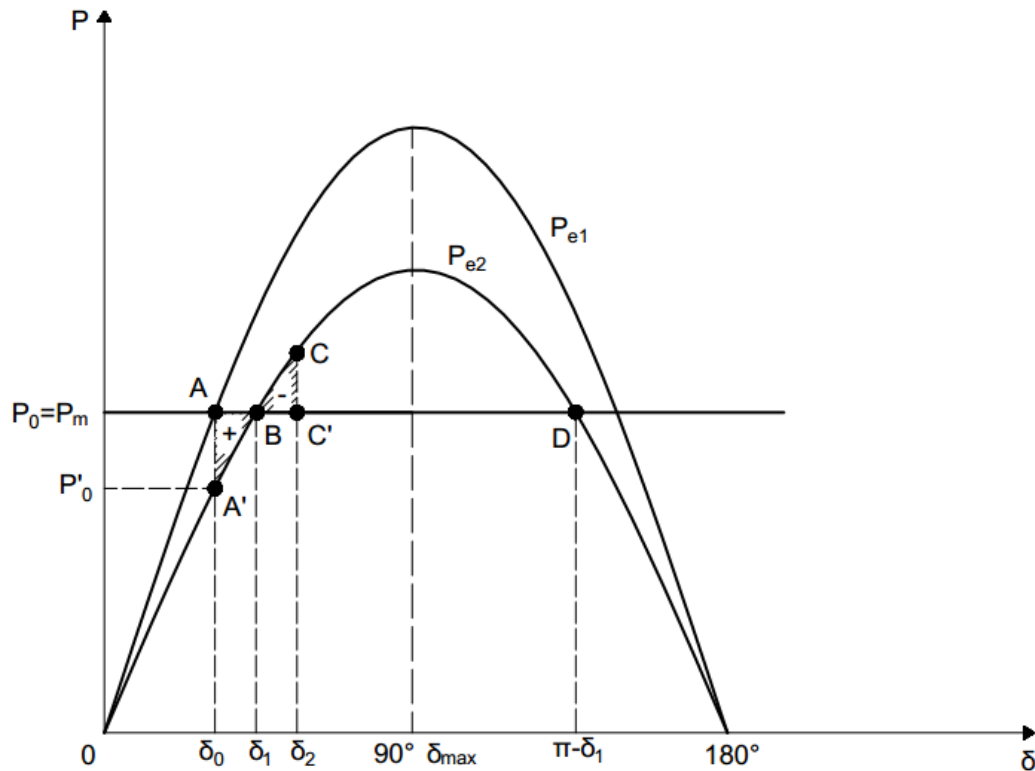


Obrázek 11 - jednopólová soustava



Obrázek 12 - schéma soustavy

Závislost výkonu na úhlu δ je podobná jako u stability malých kyvů, má tedy tvar sinusovky. Provoz s oběma paralelními vedeními je znázorněn jako průběh P_{e1} na obrázku 13.



Obrázek 13 - výkonové charakteristiky

Jestliže dojde v soustavě k vypnutí jednoho z paralelního vedení, impedance se oproti ustálenému stavu zvětší. To má za následek zmenšení amplitudy výkonové charakteristiky, znázorněná křivkou P_{e2} na obrázku 13. V bodě A byla rovnováha mezi výkonem turbíny P_m a výkonem P_0 , odebíraným z generátoru při úhlu δ_0 . Při skokové změně impedance se zátěžný úhel nemůže změnit okamžitě v důsledku setrvačnosti turbíny a zůstává na hodnotě δ_0 . Výkon odebíraný z generátoru se ovšem změní na hodnotu P'_0 , který odpovídá stále úhlu δ_0 na křivce P_{e2} (bod A' na obrázku 13). Dodávaný výkon P_m , který považujeme za konstantní, je větší než odebíraný výkon P'_0 . Dochází ke vzniku urychlujícího výkonu ΔP_0 , který má hodnotu v okamžiku vypnutí vedení

$$\Delta P_0 = P_0 - P'_0 > 0 \quad (25)$$

Přebytek výkonu se podle zákonů mechaniky projeví zvyšováním úhlové rychlosti stroje. Z rovnice kývání můžeme určit úhlové zrychlení

$$\varepsilon_0 = \frac{\omega_0 \Delta P_0}{T_m S_n} \quad (26)$$

Jelikož je $\Delta P_0 > 0$, bude i $\varepsilon_0 > 0$, rotor generátoru bude tedy urychlován. Z urychlování generátoru vyplývá zvětšování úhlu δ . Proces bude probíhat z bodu A' po křivce P_{e2} k bodu B. Z obrázku vidíme, že hodnota ΔP_0 v bodě A' klesá. V bodě B bude urychlující výkon roven nule a tím pádem nastane rovnováha dodávaného a odebíraného výkonu (při úhlu δ_1). Při dalším vzrůstu úhlu převyšuje odebíraný výkon mechanický. Vznikne tím záporný urychlující výkon, tedy brzdící. Za bodem B bude úhlové zrychlení záporné, úhlová rychlost rotoru generátoru začne klesat. V bodě C klesne na hodnotu synchronní úhlové rychlosti. Kinetická energie soustrojí získaná zrychlením v úseku A'B se v úseku BC spotřebuje brzdícím výkonem. Nicméně v bodě C nenastane rovnováha výkonů, protože odebíraný výkon převyšuje dodávaný. Generátor bude přibrzďován, úhel δ se začne zmenšovat, úhlové zrychlení je záporné, tím pádem úhlová rychlost klesá po synchronní úhlovou rychlost. Tento stav trvá, dokud nedojde k rovnováze výkonů – bod B a úhel δ_1 . V bodě B se brzdící výkon změnil na urychlující a úhlová rychlost opět vzrůstá. Dochází ke kývání rotoru okolo rovnovážného bodu B. Díky tlumení se amplituda kyvů zmenšuje, až se úhel ustálí na δ_1 a úhlová rychlost bude rovna synchronní.

Vyšrafovanou plochu na obrázku 13 můžeme popsat jako:

$$\int_{\delta_0}^{\delta_2} \Delta P d\delta = 0 \quad (27)$$

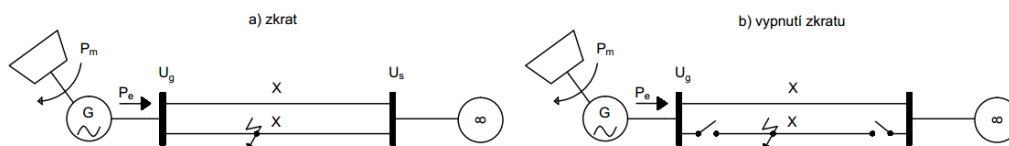
Interval (δ_0, δ_2) můžeme rozdělit na intervaly dva, (δ_0, δ_1) a (δ_1, δ_2) . S ohledem na záporný ΔP v druhém intervalu dostáváme rovnici:

$$\int_{\delta_0}^{\delta_1} \Delta P d\delta = - \int_{\delta_1}^{\delta_2} \Delta P d\delta \quad (28)$$

Levá strana rovnice (28) představuje vyšrafovanou plochu AA'BA (označena jako +), tedy urychlující plocha. Pravá strana rovnice (28) představuje plochu BC'CB (označena jako -), tedy brzdící plocha. „Pravidlo ploch“ udává, že na hranici stability je urychlující plocha S^+ rovna brzdící ploše S^- . Podmínkou stabilního provozu je nerovnost:

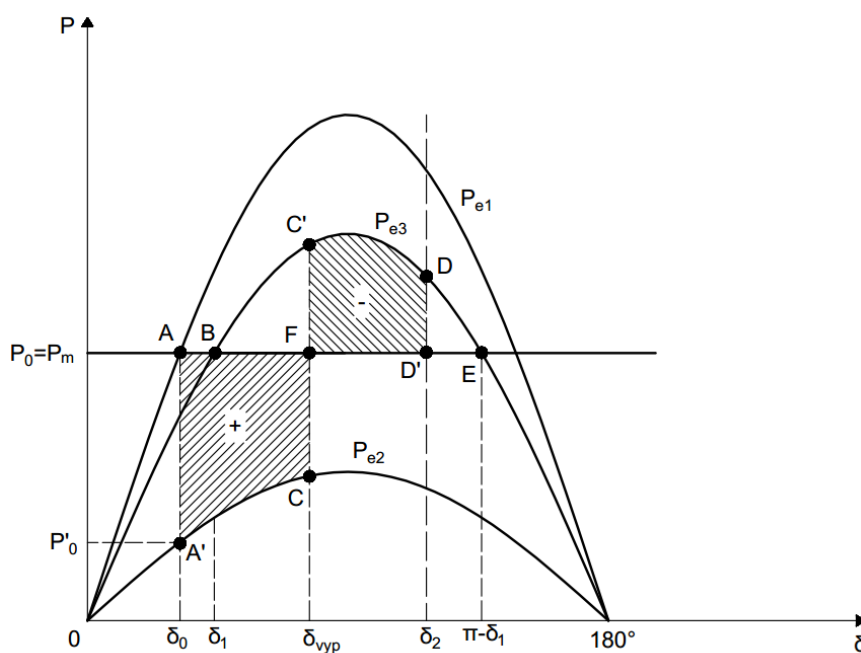
$$S^+ < S^-$$

Daleko větší změny stavu soustavy nastávají při zkratech. Přenášený výkon během zkratu z důvodu velkého vzrůstu impedance a poklesu napětí značně poklesne. Na velikost poklesu má vliv druh a místo zkratu. Přechodný děj bude mít dvě fáze. Zkrat (viz. obrázek 14) a vypnutí zkratu i s postiženým vedením.



Obrázek 14 – zkrat a vypnutí zkratu

Každá fáze má vlastní výkonovou charakteristiku, jak můžeme vidět na obrázku 15.



Obrázek 15 - výkonové charakteristiky ke zkratu

Pro vyšetření stability platí obdobná logika jako u vypínání vedení. Při zkratu klesne výkonová charakteristika z P_{e1} na P_{e2} , to znamená pokles odebíraného výkonu na P'_0 (z bodu A do bodu A'). Vzhledem ke konstantnímu výkonu turbíny P_m vzniká urychlující výkon, úhel δ narůstá a přesouvá se z bodu A' do bodu C. Při úhlu δ_{vyp} vypíná ochrana vadné vedení, což znamená přechod z bodu C do C' (přesun na křivku P_{e3}) až do bodu D, kde došlo k rovnosti urychlující (AA'CFA) a brzdící (FC'DD'F) plochy. Jestliže proces nepřekročí bod E, zůstane přechodová stabilita zachována. Po dokývnání rotoru se provoz ustálí v rovnovážném bodě B. [4]

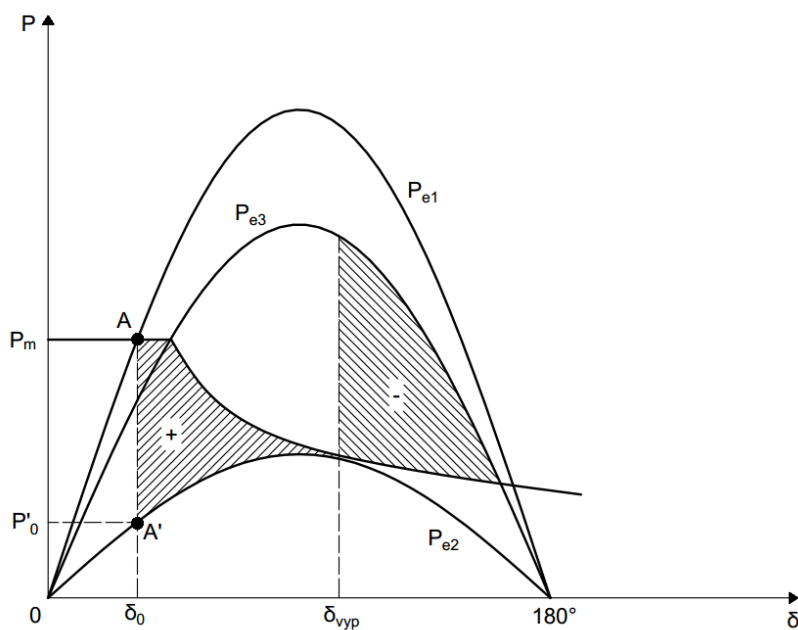
2.1.2.2 Critical Clearing Time

Critical Clearing Time (zkráceně CCT) je důležitým ukazatelem přechodné stability, jeho zjištěním můžeme posuzovat přechodnou stabilitu synchronního generátoru. CCT vyjadřuje, jak dlouho je generátor schopen při zkratu pracovat a přitom po vypnutí zkratu zůstat ve stabilním provozu. CCT je tedy doba trvání zkratu, kdy se brzdící plocha rovná urychlující. Jestliže doba zkratu je menší než CCT, nedojde ke ztrátě stability. Ovšem pokud je doba zkratu větší než CCT, ke ztrátě stability dojde.

Na délku CCT má vliv několik faktorů. Mezi ně např. patří:

- Zkratový výkon rozvodny, do které je generátor připojen
- Úroveň napětí rozvodny, do které je generátor připojen
- Stav generátor (podbuzený či přebuzení stav)
- Regulační prvky (rychlé řízení ventilů) [6]

Princip rychlého řízení ventilů můžeme vidět na obrázku 16. Pomocí regulačních prvků se při zkratu sníží dodávaný výkon turbíny a tím zmenší urychlující plochu a brzdící zvětší.



Obrázek 16 - rychlé řízení ventilů

2.1.2.3 Vedení

Venkovní vedení

Venkovní vedení představuje zdroj nebo spotřebitel jalového výkonu. U třífázového vedení je přirozený výkon dán vzorcem:

$$P_p = \frac{U_s^2}{\sqrt{\frac{L}{C}}} [W; V; H; F] \quad (29)$$

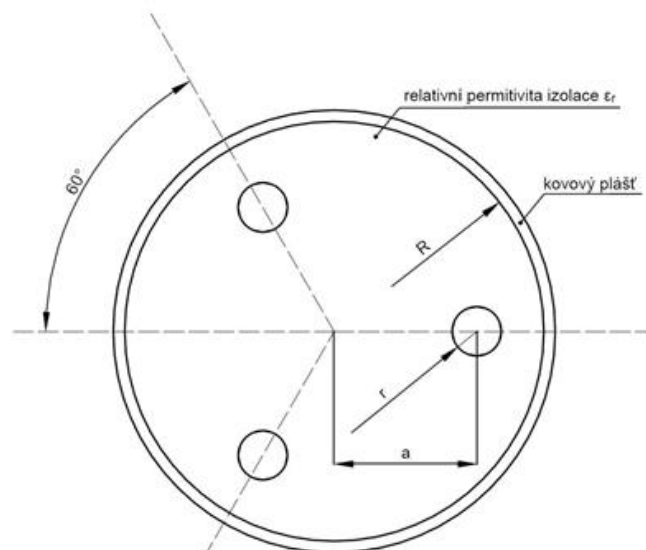
Jestliže se přenáší výkon menší než přirozený, u vedení převažuje kapacitní proud a tím pádem se vedení jeví jako zdroj jalového výkonu. Bude-li přenášený výkon větší než přirozený, u vedení bude převažovat induktivní proud. Vedení se bude tedy jevit jako spotřebič jalového výkonu.

Kabelové vedení

Kabelové vedení má výrazně větší provozní kapacitu, než je tomu u venkovního vedení, tudíž bude generovat mnohem větší jalový výkon. Provozní kapacita trojžilového kabelu se společným kovovým pláštěm se vypočítá:

$$C = \frac{0,242 \cdot \epsilon_r}{\log \frac{R \cdot r}{R \cdot r \left[1 + \left(\frac{R}{a} \right)^2 + \left(\frac{a}{R} \right)^2 \right]}} \left[\frac{\mu F}{km}; -, m; m \right] \quad (30)$$

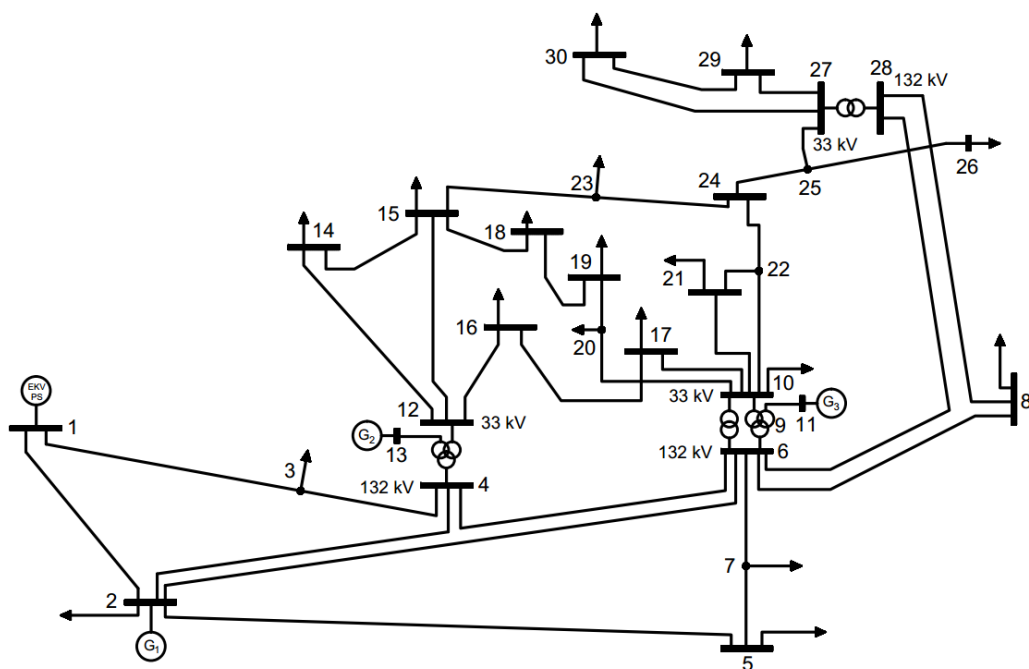
Hlavní příčinou velké provozní kapacity jsou malé vzdálenosti fázových vodičů. Provozní kapacita též roste se zvětšujícím se průřezem žil. Uspořádání kabelu můžeme vidět na obrázku 17. [3], [7]



Obrázek 17 - průřez trojžilového kabelu se společným kovovým pláštěm[7]

3. Dynamický model soustavy

Model elektrizační soustavy byl vytvořen v programu MODES, který se používá pro simulaci krátkodobých, střednědobých a dlouhodobých dynamických dějů. Schéma modelu vidíme na obrázku 18. Tento model představuje část elektrizační soustavy Středozápadu USA. Schéma modelu bylo převzato ze zdroje [13].



Obrázek 18 - model soustavy

Třicetiuzlový model tvoří přenosová soustava s jmenovitým napětím 132 kV a na ní napojenou distribuční soustavu s jmenovitým napětím 33 kV. Model obsahuje 30 uzlů (rozveden), 34 vedení, 2 trojvinuťové transformátory a dva přenosové transformátory. Do uzlu 2 je vyveden výkon generátoru, na kterém budeme sledovat vliv kabelizace (a její pozdější kompenzace) na jeho stabilitu. Uzel 1 představuje bilanční uzel, na kterém je připojen zbytek soustavy. Model také obsahuje dva synchronní kompenzátory, jakožto zdroje (či spotřebitele) jalového výkonu, které jsou připojeny na terciár transformátorů (uzel 11 a 13). Všechna vedení jsou prozatím vedení venkovní. Model, kromě strojů, neobsahuje žádnou další regulaci jalového výkonu (kompenzační tlumivky a statické kondenzátory).

3.1 Vstupní data

Vstupní data jsme získali ze zdroje [14]. Zadané hodnoty pro uzly můžeme vidět v tabulce 1.

Uzly						
číslo uzlu	U_n [kV]	$U_{zad[p.u.]}$ [p.u.]	P_{odb} [MW]	Q_{odb} [MVar]	P_{do} [MW]	Q_{do} [MVar]
1	132	1,060	0,0	0,0	260,2	-16,1
2	132	1,043	21,7	12,7	40,0	50,0
3	132	-	2,4	1,2	0,0	0,0
4	132	-	7,6	1,6	0,0	0,0
5	132	-	94,2	19,0	0,0	0,0
6	132	-	0,0	0,0	0,0	0,0
7	132	-	22,8	10,9	0,0	0,0
8	132	-	30,0	30,0	0,0	0,0
9	100	-	0,0	0,0	0,0	0,0
10	33	-	5,8	2,0	0,0	0,0
11	11	1,082	0,0	0,0	0,0	16,2
12	33	-	11,2	7,5	0,0	0,0
13	11	1,071	0,0	0,0	0,0	10,6
14	33	-	6,2	1,6	0,0	0,0
15	33	-	8,2	2,5	0,0	0,0
16	33	-	3,5	1,8	0,0	0,0
17	33	-	9,0	5,8	0,0	0,0
18	33	-	3,2	0,9	0,0	0,0
19	33	-	9,5	3,4	0,0	0,0
20	33	-	2,2	0,7	0,0	0,0
21	33	-	17,5	11,2	0,0	0,0
22	33	-	0,0	0,0	0,0	0,0
23	33	-	3,2	1,6	0,0	0,0
24	33	-	8,7	6,7	0,0	0,0
25	33	-	0,0	0,0	0,0	0,0
26	33	-	3,5	2,3	0,0	0,0
27	33	-	0,0	0,0	0,0	0,0
28	132	-	0,0	0,0	0,0	0,0
29	33	-	2,4	0,9	0,0	0,0
30	33	-	10,6	1,9	0,0	0,0

Tabulka 1 - zadané uzlové hodnoty

U_n jsou jmenovitá napětí uzlů, U_{zad} zadaná napětí. P_{odb} a Q_{odb} jsou odebírané činné a jalové výkony z uzlu (ve schématu znázorněno šipkou). P_{do} a Q_{do} jsou dodávané činné a jalové výkony do uzlů ze zdrojů. Uzly 1, 2, 11 a 13 jsou PU uzly, které jsou definovány dodávaným činným výkonem ze zdroje a zadaným

napětím. Zbytek jsou PQ uzly, které jsou definovány odebíraným činným a jalovým výkonem z uzlu. Můžeme si povšimnout, že z některých uzlů se žádný výkon neodebírání (např. uzel 27).

Větve						
Název	Z uzlu č.	Do uzlu č.	$R_{[p.u.]}$ [p.u.]	$X_{[p.u.]}$ [p.u.]	$B_{[p.u.]} [p.u.]$	převod [-]
VED1	1	2	0,0192	0,0575	0,0528	-
VED2	1	3	0,0452	0,1652	0,0408	-
VED3	2	4	0,0570	0,1737	0,0368	-
VED4	2	5	0,0472	0,1983	0,0418	-
VED5	2	6	0,0581	0,1763	0,0374	-
VED6	3	4	0,0132	0,0379	0,0084	-
VED7	4	6	0,0119	0,0414	0,0090	-
VED8	4	12	0,0000	0,2560	0,0000	0,9320
VED9	5	7	0,0460	0,1160	0,0204	-
VED10	6	7	0,0267	0,0820	0,0170	-
VED11	6	8	0,0120	0,0420	0,0090	-
VED12	6	9	0,0000	0,2080	0,0000	0,9780
VED13	6	10	0,0000	0,5560	0,0000	0,9690
VED14	6	28	0,0169	0,0599	0,0130	-
VED15	8	28	0,0636	0,2000	0,0428	-
VED16	9	10	0,0000	0,1100	0,0000	0,0000
VED17	9	11	0,0000	0,2080	0,0000	0,0000
VED18	10	17	0,0324	0,0845	0,0000	-
VED19	10	20	0,0936	0,2090	0,0000	-
VED20	10	21	0,0348	0,0749	0,0000	-
VED21	10	22	0,0727	0,1499	0,0000	-
VED22	12	13	0,0000	0,1400	0,0000	0,0000
VED23	12	14	0,1231	0,2559	0,0000	-
VED24	12	15	0,0662	0,1304	0,0000	-
VED25	12	16	0,0945	0,1987	0,0000	-
VED26	14	15	0,2210	0,1997	0,0000	-
VED27	15	18	0,1073	0,2185	0,0000	-
VED28	15	23	0,1000	0,2020	0,0000	-
VED29	16	17	0,0524	0,1923	0,0000	-
VED30	18	19	0,0639	0,1292	0,0000	-
VED31	19	20	0,0340	0,0680	0,0000	-
VED32	21	22	0,0116	0,0236	0,0000	-
VED33	22	24	0,1150	0,1790	0,0000	-
VED34	23	24	0,1320	0,2700	0,0000	-
VED35	24	25	0,1885	0,3292	0,0000	-
VED36	25	26	0,2544	0,3800	0,0000	-

VED37	25	27	0,1093	0,2087	0,0000	-
VED38	27	29	0,2198	0,4153	0,0000	-
VED39	27	30	0,3202	0,6027	0,0000	-
VED40	28	27	0,0000	0,3960	0,0000	0,9680
VED41	29	30	0,2399	0,4533	0,0000	-

Tabulka 2 - zadané hodnoty pro větve

Parametry větví jsou dány v poměrných jednotkách, proto je musíme přepočítat, abychom dostali skutečné hodnoty vedení. Susceptance distribučních vedení jsou zanedbatelné oproti přenosovému, proto mají hodnotu nula. Převody transformátorů jsou vztaženy na vztažné napětí.

Parametry generátorů vidíme v tabulce 3.

Generátory						
Název	Uzel	U_n [kV]	S_n [MVA]	Budič	X_d [-]	X_q [-]
EKV_PS	1	17,5	40x235	-	2,5	2,5
G ₁	2	15	80	AC	2,7	2,6
G ₂	11	6,3	42	AC	1,73	1,65
G ₃	13	6,3	42	AC	1,73	1,65

Tabulka 3 - parametry generátorů

Bilanční uzel představuje zbytek elektrizační soustavy se 40-ti generátory o výkonu 235MVA. Generátory mají hladký rotor (vzhledem k podobným hodnotám podélné a příčné reaktance) a střídavé budiče.

3.2 Vypočtené hodnoty

Abychom mohli provést simulace na našem modelu elektrizační soustavy, je třeba převést parametry větví a uzlů v poměrných jednotkách na skutečné, proto zavádíme vztažné veličiny, které jsou v tabulce 4.

Vztažné veličiny			
S_{vz} [MVA]	U_{vz} [kV]	Z_{vz} [Ω]	Y_{vz} [μS]
100	132	174,24	5739
	100	100,00	10000
	33	10,89	91827
	11	1,21	826446

Tabulka 4 - vztažné veličiny

Po zvolení hodnot vztažného výkonu a napětí (pro jednotlivé napěťové hladiny), můžeme vypočítat hodnoty vztažné impedance a admittance, jak nám ukazují následující rovnice:

$$Z_{vz} = \frac{U_{vz}^2}{S_{vz}} \quad (31) \quad ; \quad Y_{vz} = \frac{1}{Z_{vz}} \quad (32) \quad ; \quad U_{zad} = U_{vz} * U_{zad[p.u.]} \quad (33)$$

Jestliže známe vztažné impedance, dokážeme vypočítat odpor, reaktanci a susceptanci venkovního vedení podle vzorců:

$$R = R_{[p.u.]} * Z_{vz} \quad (34) \quad ; \quad X = X_{[p.u.]} * Z_{vz} \quad (35) \quad ; \quad B_{ved} = B_{[p.u.]} * Y_{vz} \quad (36)$$

Skutečné parametry vedení a uzlů můžeme pozorovat v tabulce 5 a 6.

Větve					
Název	Z uzlu č.	Do uzlu č.	R [Ω]	X [Ω]	B _{ved} [μS]
VED1	1	2	3,345	10,019	303
VED2	1	3	7,876	28,784	234
VED3	2	4	9,932	30,265	211
VED4	2	5	8,224	34,552	240
VED5	2	6	10,123	30,719	215
VED6	3	4	2,300	6,604	48
VED7	4	6	2,073	7,214	52
VED8	4	12	0,000	2,788	0
VED9	5	7	8,015	20,212	117
VED10	6	7	4,652	14,288	98
VED11	6	8	2,091	7,318	52
VED12	6	9	0,000	20,800	0
VED13	6	10	0,000	6,055	0
VED14	6	28	2,945	10,437	75
VED15	8	28	11,082	34,848	246
VED16	9	10	0,000	1,198	0
VED17	9	11	0,000	0,252	0
VED18	10	17	0,353	0,920	0
VED19	10	20	1,019	2,276	0
VED20	10	21	0,379	0,816	0
VED21	10	22	0,792	1,632	0
VED22	12	13	0,000	0,169	0
VED23	12	14	1,341	2,787	0
VED24	12	15	0,721	1,420	0
VED25	12	16	1,029	2,164	0
VED26	14	15	2,407	2,175	0
VED27	15	18	1,168	2,379	0
VED28	15	23	1,089	2,200	0
VED29	16	17	0,571	2,094	0
VED30	18	19	0,696	1,407	0

VED31	19	20	0,370	0,741	0
VED32	21	22	0,126	0,257	0
VED33	22	24	1,252	1,949	0
VED34	23	24	1,437	2,940	0
VED35	24	25	2,053	3,585	0
VED36	25	26	2,770	4,138	0
VED37	25	27	1,190	2,273	0
VED38	27	29	2,394	4,523	0
VED39	27	30	3,487	6,563	0
VED40	28	27	0,000	4,312	0
VED41	29	30	2,613	4,936	0

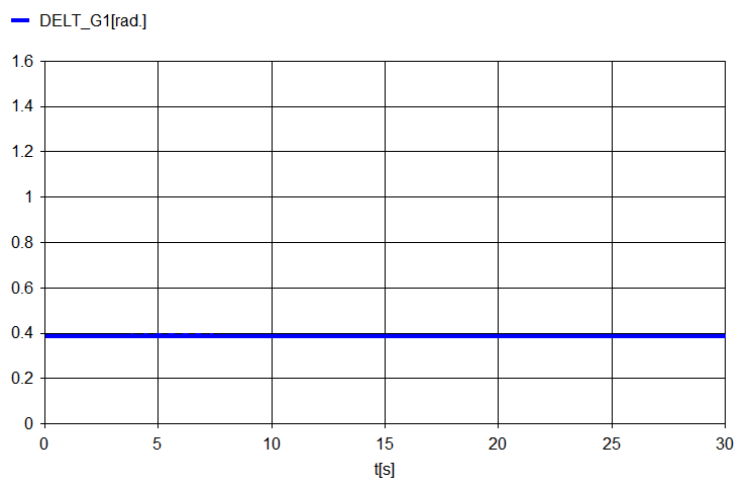
Tabulka 5 - skutečné hodnoty pro větve

Uzly		
číslo uzlu	U_n [kV]	U_{zad} [kV]
1	132	139,920
2	132	137,676
11	11	11,902
13	11	11,781

Tabulka 6 - skutečné hodnoty zadaného napětí uzlů

3.3 Ustálený stav

Po zadání parametrů větví, uzlů a generátorů do programu jsme provedli přepočítání chodu sítě a dynamickou simulaci. Grafický výstup můžeme vidět na obrázku 19.



Obrázek 19 - zátěžný úhel δ generátoru G_1 při ustáleném stavu sítě

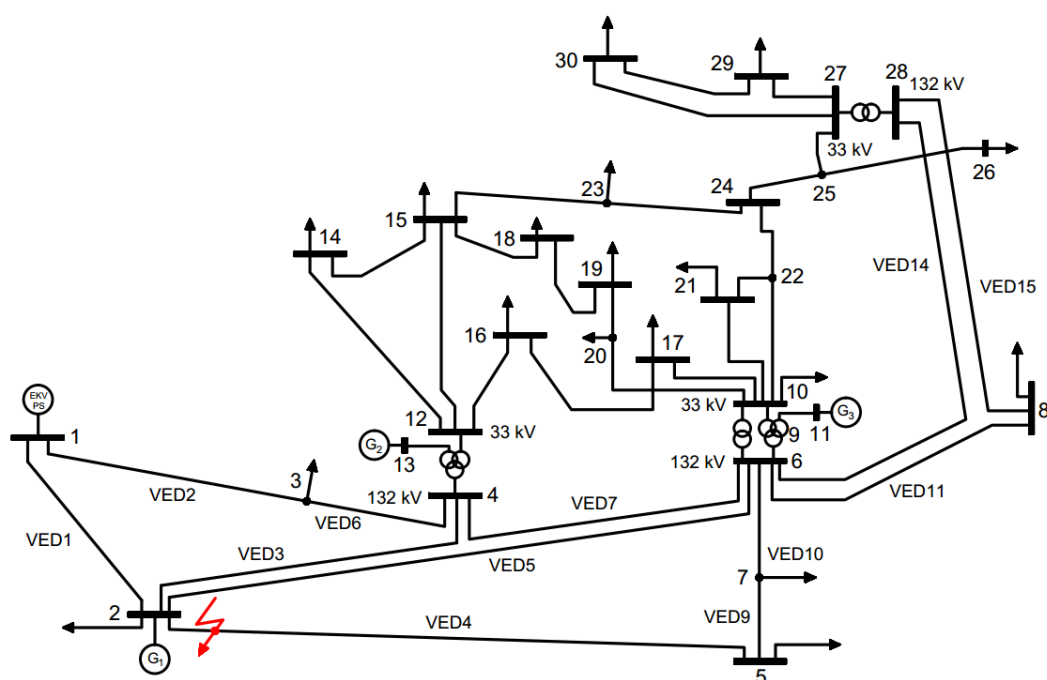
Zátěžný úhel generátoru G_1 je ustálen na hodnotě 0,4 radiánů, čemuž odpovídá přibližně 23° . V této chvíli se zátěžný úhel nemění, protože jsme v modelu nevytvořili rozruch (zkrat).

4. Vliv kabelizace na stabilitu generátoru

Vliv kabelizace (a její následná kompenzace) na stabilitu generátoru G_1 budeme hodnotit pomocí CCT. Abychom mohli CCT určit, je třeba vytvořit v modelu soustavy rozruch. V momentě, kdy dojde k rozruchu, přestává soustava být v ustáleném stavu a nastává přechodný děj.

4.1. Zkrat v soustavě

V ustáleném stavu modelu soustavy jsme vytvořili trojfázový zkrat na vedení 4, jak můžeme vidět na obrázku 20.

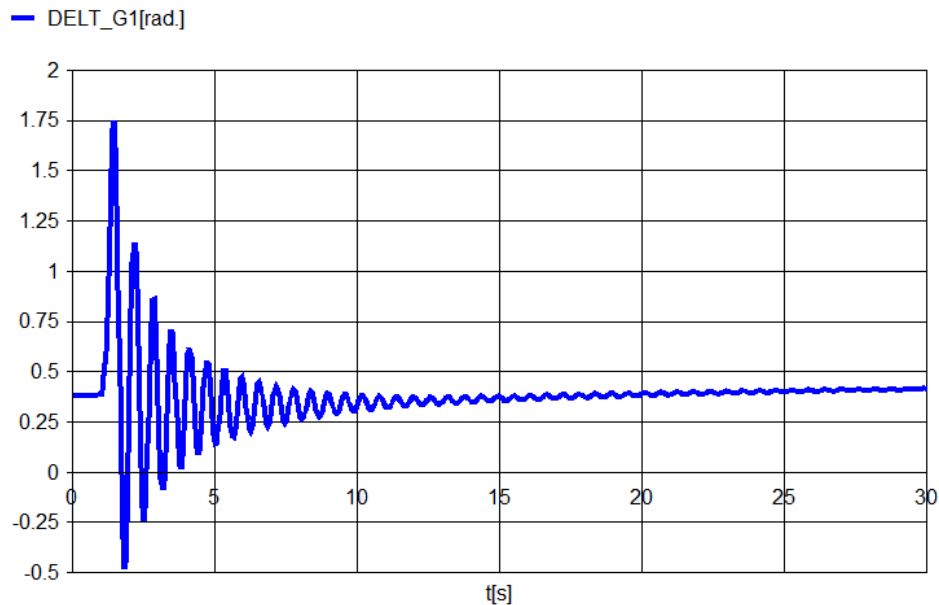


Obrázek 20 - zkrat v soustavě

V praxi se zkrat vytváří v nejbližší rozvodně generátoru, protože příspěvek zkratového proudu od generátoru je maximální (z důvodu prakticky nulové impedance vedení generátor – zkrat). Náš zkrat jsme vytvořili blízko uzlu 2, přesněji 1 procentní vzdálenost od uzlu 2.

V našem případě zkrat vzniká v čase 1 sekunda, poté následuje doba, kdy zkrat působí a nakonec ochrany zkrat vypnou včetně postiženého vedení. V závislosti na době zkratu mohou nastat tyto případy:

- *Doba zkratu je menší než CCT*

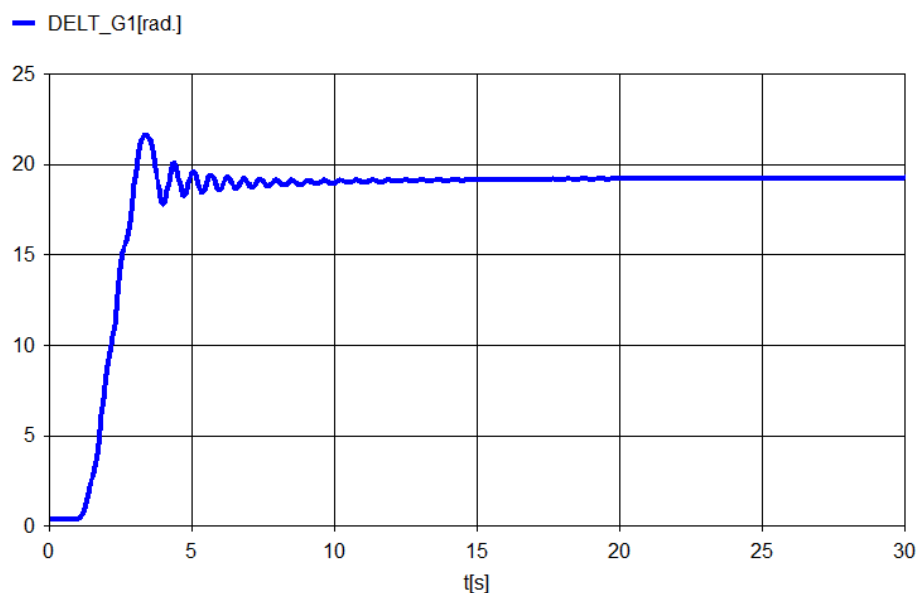


Obrázek 21 - průběh zátěžného úhlu při době zkratu < CCT

Na obrázku 21 můžeme vidět, že po odeznění děje se zátěžný úhel ustálil v novém, rovnovážném bodě, který je menší než 90° - podmínka přechodné stability. V tomto případě jsme zvolili dobu trvání zkratu 350ms.

- *Doba zkratu je větší než CCT*

Stavu, který nastal na obrázku 22, říkáme prokluz pólů. I v tomto případě došlo nakonec k ustálení zátěžného úhlu, ovšem již není splněna podmínka, kdy se zátěžný úhel má ustálit pod 90° , tudíž u generátoru došlo ke ztrátě stability. U prokluzu pólů se stroj ustálí při 2π násobku úhlu. Je vidět, že rotor generátoru provedl 3 otáčky (6π), než se mu podařilo ustálit. V tomto případě jsme zvolili dobu trvání zkratu 500ms.



Obrázek 22 - průběh zátěžného úhlu při době zkratu > CCT

Změnou doby trvání zkratu jsme schopni nakonec určit CCT. Pro model soustavy pouze s venkovním vedením (obrázek 20) je critical clearing time roven 468ms.

4.2. Kabelizace vedení

V této části budeme postupně nahrazovat venkovní vedení kabely, ze zdroje [11] jsme vybrali nejvhodnější kabelové vedení, parametry jsou dány v tabulce 7.

Kabelové vedení	
U _n [kV]	C [μS/km]
132	0,13
30	0,16

Tabulka 7 - parametry kabelového vedení

K výpočtu susceptance kabelů potřebujeme určit délku vedení. Ze znalosti reaktance venkovního vedení na kilometr, která činí $X_x=0,4\Omega/\text{km}$ [12], jsme schopni vypočítat:

$$l = \frac{X}{X_x} \quad (37)$$

Po určení délky vedení můžeme přejít na výpočet susceptance kabelů a jejich nabíjecích výkonů:

$$B_{kab} = 2\pi * f * C * l \quad (38) \quad ; \quad Q_{nab} = 2\pi * f * C * l * U_S^2 \quad (39)$$

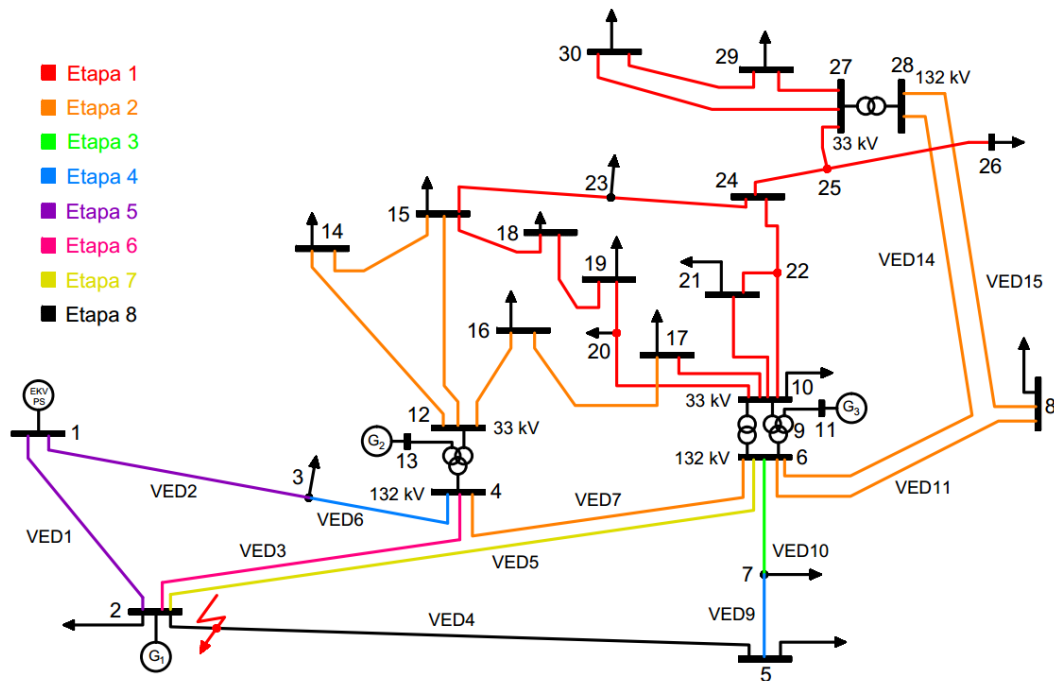
Nové parametry větví jsou zaznamenány v tabulce 8.

Větve				
Název	délka [km]	B _{kab} [μS]	Q _{nab} [MVar]	Etapa
VED1	25,0	1023	17,824	5
VED2	72,0	2939	51,208	5
VED3	75,7	3090	53,843	6
VED4	86,4	3528	61,468	8
VED5	76,8	3136	54,649	7
VED6	16,5	674	11,748	4
VED7	18,0	737	12,833	2
VED9	50,5	2064	35,957	4
VED10	35,7	1459	25,418	3
VED11	18,3	747	13,019	2
VED14	26,1	1066	18,568	2
VED15	87,1	3558	61,995	2
VED18	2,3	116	0,126	1
VED19	5,7	286	0,311	1
VED20	2,0	102	0,112	1
VED21	4,1	205	0,223	1
VED23	7,0	350	0,381	2
VED24	3,6	178	0,194	2
VED25	5,4	272	0,296	2
VED26	5,4	273	0,298	2
VED27	5,9	299	0,326	1
VED28	5,5	276	0,301	1
VED29	5,2	263	0,287	2
VED30	3,5	177	0,193	1
VED31	1,9	93	0,101	1
VED32	0,6	32	0,035	1
VED33	4,9	245	0,267	1
VED34	7,4	369	0,402	1
VED35	9,0	451	0,491	1
VED36	10,3	520	0,566	1
VED37	5,7	286	0,311	1
VED38	11,3	568	0,619	1
VED39	16,4	825	0,898	1
VED41	12,3	620,331	0,676	1

Tabulka 8 - parametry a nabíjecí výkony kabelů

Z tabulky je patrný výrazný nárůst susceptance oproti venkovnímu vedení. Nabíjecí výkony jsou pouze orientační, protože výpočet nezahrnuje činné zatížení kabelů. Po součtu jednotlivých délek vedení zjistíme, že celková délka všech vedení je 723,6km.

Vzhledem k tomu, že nyní disponujeme všemi potřebnými parametry, začneme model soustavy kabelizovat a sledovat vliv na úhlovou stabilitu generátoru G_1 . Kabelizaci soustavy jsme rozdělili do etap. Z tabulky 8 můžeme zjistit, která kabelová vedení spadají do jednotlivých etap. Pro přehlednost je kabelizace znázorněna na obrázku 23.



Obrázek 23 - kabelizace soustavy v jednotlivých etapách

V každé etapě kabelizace budeme vyhodnocovat CCT generátoru G_1 . Předpokládáme, že s rostoucí kabelizací bude CCT klesat. Při kabelizaci můžeme postupovat různými způsoby. My jsme si vybrali následující – kabelizujeme v co možná největší možné vzdálenosti od generátoru G_1 a s co nejmenším nabíjecím výkonem (resp. Nejkratší délkou kabelového vedení). V etapě 1 jsme nainstalovali kabely v distribuční části soustavy (červená vedení). V etapě 2 jsme dokončili kabelizaci distribuční části a přidali navíc pár kabelů v přenosové části (červená + oranžová). Takto systematicky postupujeme až do kompletní kabelizace soustavy (etapa 8).

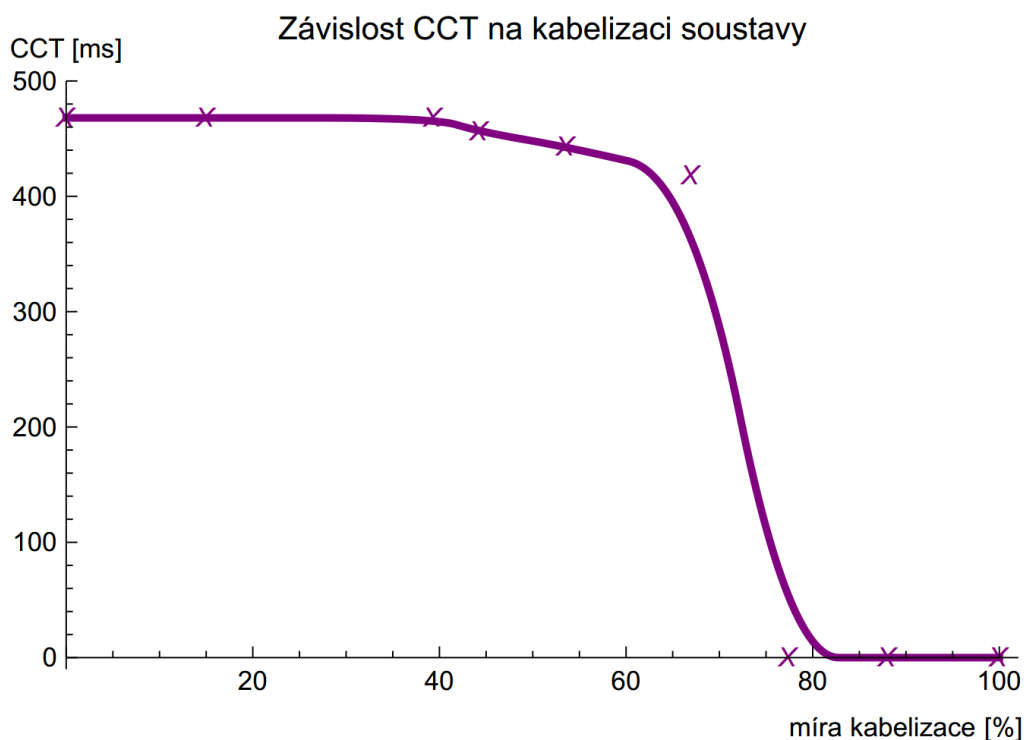
Hodnoty CCT v jednotlivých etapách byly zaznamenány do tabulky 9.

Kabelizace			
etapa	délka kabelů [km]	délka kabelů [%]	CCT [ms]
0	0,0	0,0	468
1	108,8	15,0	468

2	285,0	39,4	468
3	320,7	44,3	456
4	387,7	53,6	443
5	484,7	67,0	418
6	560,4	77,4	0
7	637,2	88,1	0
8	723,6	100,0	0

Tabulka 9 - hodnoty CCT v jednotlivých etapách kabelizace

Vidíme, že maximální doba působení zkratu, kdy je generátor ještě schopen po rozruchu dodržet úhlovou stabilitu, opravdu klesá. Průběh CCT vidíme na obrázku 24.

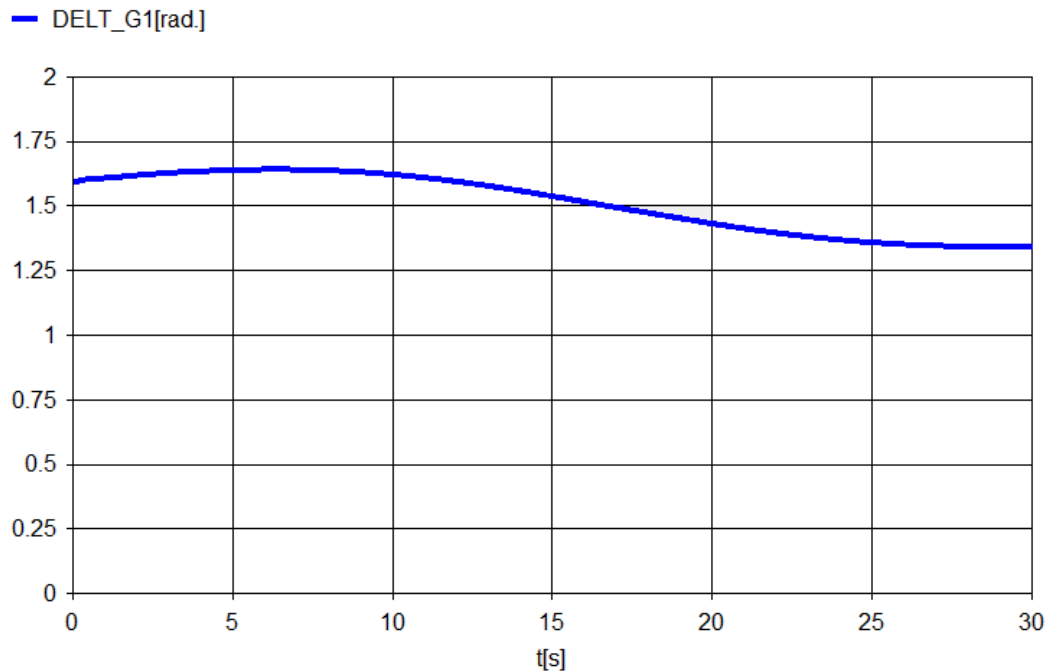


Obrázek 24 - průběh CCT při vzrůstající kabelizaci

Hodnoty CCT v jednotlivých etapách závisejí na zvolené strategii kabelizace. Jestliže bychom nejdříve začali instalovat kabely co nejbližší u generátoru G₁ a s co největším nabíjecím výkonem, průběh CCT by hned zpočátku prudce klesal a poté by klesal už jen pozvolně.

V etapě 6 (a také v následujících etapách) je critical clearing time roven nule. Kabely jsou již blízko generátoru G₁ a mají velký nabíjecí výkon, generátor odbuzuje, tím se zvětšuje zátěžný úhel, až nakonec dojde k situaci, kdy zátěžný úhel překročí 90°. Nevytvoří se rovnovážný bod a tím pádem není soustava za těchto podmínek schopna udržet se v ustáleném stavu. Tento jen je vyobrazen

na obrázku 25. Z grafu je patrné, že zátěžný úhel na počátku má hodnotu přes 91° .



Obrázek 25 - průběh zátěžného úhlu

Ustálený stav nemusí nastat ani v případě, kdy je zátěžný úhel menší než 90° , ale blíží se k této hodnotě. Z hlediska stability malých kyvů dochází k malým odchylkám zátěžného úhlu a může se stát, díky velké hodnotě zátěžného úhlu, že se „přehoupne“ přes 90° a dojde ke ztrátě stability.

5. Vliv kompenzace kabelových sítí na stabilitu

V této části jsme se zabývali kompenzací kabelových sítí pomocí kompenzačních tlumivek. Vzhledem k tomu, že majoritní část nabíjecího výkonu se vyskytuje v přenosové části modelu soustavy, rozhodli jsme se umísťovat kompenzační tlumivky pouze do uzlů s jmenovitým napětím 132 kV. Vliv kompenzace jsme hodnotili opět pomocí CCT v jednotlivých etapách.

Ze zdroje [7] jsme získali parametry jednotlivých kompenzačních tlumivek, které si můžeme prohlédnout v tabulce 10.

Kompenzační tlumivky	
Napěťová hladina [kV]	Výkon tlumivky [MVA _r]
132	20
	30
	35
	40
	45
	50
	55
	60
	65
	70
	75
	80
	85
	90
	95
	100
110	
120	
130	

Tabulka 10 - kompenzační tlumivky

V následující tabulce 11 jsou zaznamenány výkony tlumivek pro úplnou kompenzaci nabíjecího výkonu soustavy v jednotlivých etapách. Výkony kompenzačních tlumivek jsme určili pro každý uzel (kromě bilančního) v PS. Z těchto výkonů můžeme poté odvodit nejstrategičtější umístění kompenzační tlumivky.

Výkony tlumivek pro úplnou kompenzaci [MVar]						
Uzel	Etapa					
	3	4	5	6	7	8
Uzel2	10	35	65	105	150	210
Uzel3	15	85	120	215	315	430
Uzel4	10	70	100	185	250	335
Uzel5	10	45	70	120	195	270
Uzel6	10	65	110	155	220	295
Uzel7	10	55	80	140	210	295
Uzel8	10	65	90	160	230	315
Uzel28	10	65	110	165	230	320

Tabulka 11 - výkony tlumivek pro úplnou kompenzaci nabíjecího výkonu

Kompenzace pomocí tlumivky v etapách 1 a 2 není třeba, jelikož tuto kompenzaci provedly zdroje v soustavě a bilanční uzel beze změny CCT generátoru G₁, zatímco v dalších etapách již CCT poklesl. Je třeba zmínit, že se nejedná o kombinaci tlumivek. Například tlumivka s výkonem 100MVar v uzlu číslo 4 dokáže v etapě 5 provést úplnou kompenzaci nabíjecího výkonu, stejně tak jako tlumivka o výkonu 120MVar v uzlu číslo 3.

Po porovnání výkonů jsme dospěli k závěru, že nejideálnější místo pro umístění kompenzační tlumivky je uzel č.2, jako druhé nejlepší místo se jeví uzel č.5. Výkon kompenzační tlumivky v uzlu 2 pro etapy 7 a 8 je ovšem větší, než největší výkon tlumivky z tabulky 10. Bylo tedy nutné výkon tlumivky v uzlu 2 snížit na 135MVar a zbývající kompenzační výkon nahradit druhou tlumivkou, která se umístila do uzlu 5. Výsledek můžeme pozorovat v tabulce 12.

Výkony tlumivek pro úplnou kompenzaci [MVar]						
Uzel	Etapa					
	3	4	5	6	7	8
Uzel2	10	35	65	105	135	135
Uzel5	-	-	-	-	20	80

Tabulka 12 - kombinace tlumivek pro úplnou kompenzaci nabíjecího výkonu

Při úplné kompenzaci v jednotlivých etapách zůstává CCT neměnné, má stejnou hodnotu jako v etapě 0 (bez kabelový model). Můžeme ovšem také provést pouze částečnou kompenzaci v jednotlivých etapách. V tabulce 13 jsou zaznamenány zjištěné CCT při různých výkonech kompenzačních tlumivek.

Kompenzace					
Bez kompenzace			Výkon tlumivky 50MVA _r v uzlu 2		
etapa	délka kabelů [%]	CCT [ms]	etapa	délka kabelů [%]	CCT [ms]
0	0,0	468	0	0,0	456
1	15,0	468	1	15,0	456
2	39,4	468	2	39,4	468
3	44,3	456	3	44,3	468
4	53,6	443	4	53,6	468
5	67,0	418	5	67,0	456
6	77,4	0	6	77,4	431
7	88,1	0	7	88,1	0
8	100,0	0	8	100,0	0

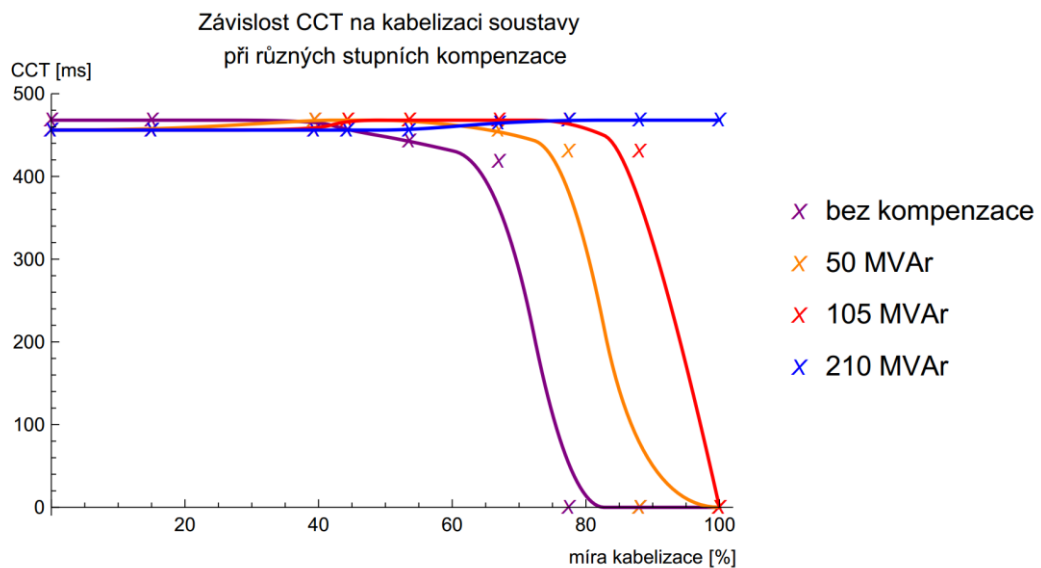
Výkon tlumivky 105MVA _r v uzlu 2			Výkon tlumivky 210MVA _r v uzlu 2		
etapa	délka kabelů [%]	CCT [ms]	etapa	délka kabelů [%]	CCT [ms]
0	0,0	456	0	0,0	456
1	15,0	456	1	15,0	456
2	39,4	456	2	39,4	456
3	44,3	468	3	44,3	456
4	53,6	468	4	53,6	456
5	67,0	468	5	67,0	465
6	77,4	468	6	77,4	468
7	88,1	431	7	88,1	468
8	100,0	0	8	100,0	468

Tabulka 13 - hodnoty CCT v jednotlivých etapách při různých stupních kompenzace

Bez jakékoli kompenzace není soustava schopná existovat v ustáleném stavu pro etapy 6,7 a 8. Už při použití kompenzační tlumivky 50MVA_r můžeme vidět, že CCT klesá na nulu až při 88% kabelizaci soustavy (etapa 7). Pokud budeme kompenzační výkon tlumivky zvětšovat, může dojít k situaci, kdy CCT neklesne k nule ani při 100% kabelizaci soustavy. Průběhy CCT jsou vyobrazeny na obrázku 26.

S vkládáním kompenzačních tlumivek do uzlu 2 vzniká zajímavý jev. V prvotních etapách je CCT menší 468ms. Vysvětlení plyne z rovnice (3). V případě, kdy do uzlu 2 není zapojená kompenzační tlumivka, jsou hodnoty E a U zprvu konstantní. V etapě 3 začíná generátor odbuzovat, zmenšuje se hodnota E a tím pádem i vnitřní charakteristika stroje. To způsobuje menší brzdící plochu a critical clearing time klesá (nakonec až k nule). V případě zapojení tlumivky je hodnota U zpočátku menší, kvůli přenosovým ztrátám z uzlu 1. Hodnota E zůstává (prozatím) konstantní. Jak roste nabíjecí výkon soustavy, zmenšuje se úbytek napětí v uzlu 2. Pokud je tlumivka schopna vykompenzovat i v dalších etapách nabíjecí výkon soustavy, zůstává generátor G₁ přebuzen (hodnota E stále

konstantní, stejně tak už i napětí U v uzlu 2). Jestliže toho není schopna, generátor začne odbuzovat, hodnota U zůstává konstantní, ale hodnota E se zmenšuje.



Obrázek 26 - průběhy CCT při různých stupních kompenzace v uzlu 2

Z grafu je patrné, že vliv kompenzace kabelového vedení na CCT je značný. S rostoucím výkonem kompenzační tlumivky se křivka ohýbá vzhůru, až do té míry, kdy je CCT roven 468ms.

Můžeme si všimnout, že optimum, kdy se CCT rovná 468ms, se s rostoucím výkonem tlumivky posouvá směrem doprava. Optimum bez kompenzace je v rozmezí etap 0-2, s tlumivkou 50MVAR v etapách 2-4, pro 105MVAR etapy 3-6 a pro tlumivku s výkonem 210MVAR je to v rozmezí etap 6-8.

6. Závěr

Cílem této práce bylo teoreticky popsat problematiku stability zdrojů a soustavy, vytvořit dynamický model elektrizační soustavy a poté na vytvořeném modelu zhodnotit vliv rostoucí kabelizace na stabilitu strojů v ES a zhodnotit vliv kompenzace nabíjecího výkonu kabelových sítí na stabilitu zdrojů v ES.

6.1 Porovnání cílů s výsledky

1. Teoreticky popsat problematiku stability strojů a soustavy

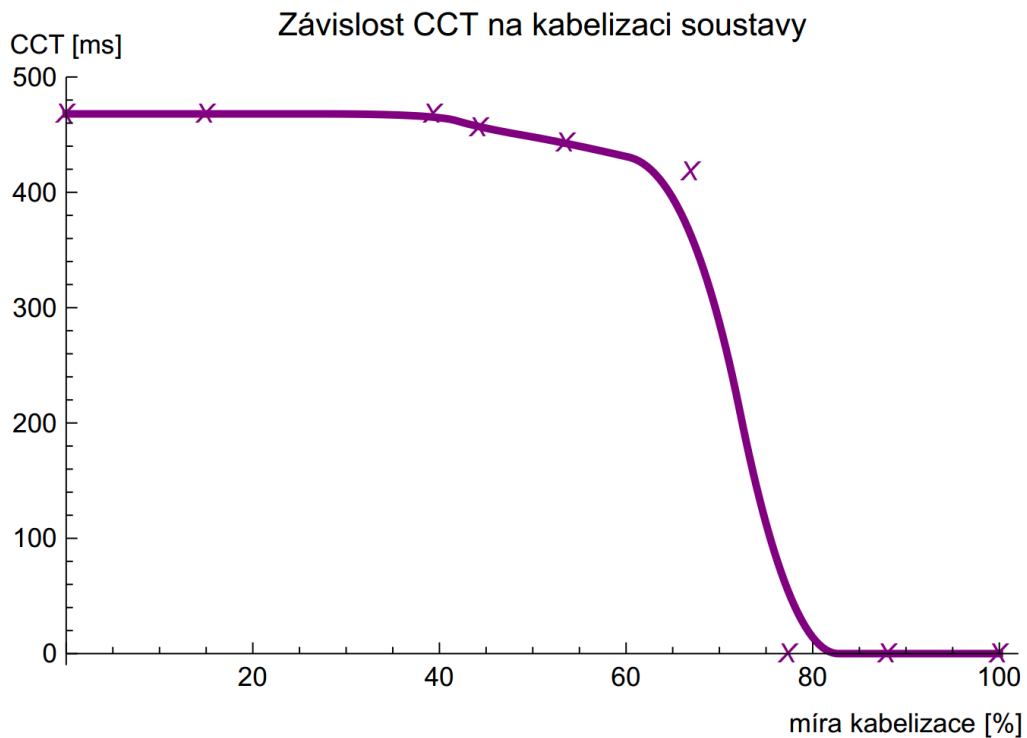
V této části jsme popsali rozdělení stability, přičemž v dalších částech jsme se zaměřili na úhlovou stabilitu. Popsali jsme princip stability malých kyvů (známé též pod název statická stabilita), do které jsme zahrnuli vliv rezistance a regulace buzení. Dále jsme objasnili problematiku přechodné stability (známé též jako dynamická stabilita), vysvětlili si princip metody ploch na jednoduchých příkladech a popsali důležitý ukazatel critical clearing time.

2. Vytvořit dynamický model elektrizační soustavy

Zde jsme se zaměřili na tvorbu dynamického modelu elektrizační soustavy v programu MODES. Představili jsme schéma modelu, její jednotlivé části a její vstupní data, která jsme museli převést z poměrných jednotek. Výsledkem nám byl ustálený dynamický model elektrizační soustavy.

3. Na vytvořeném modelu zhodnotit vliv rostoucí kabelizace na stabilitu zdrojů v ES

V této části jsme na ustáleném modelu vytvořili rozruch (zkrat) a určili dobu trvání zkratu, kdy se brzdící plocha rovná urychlující (critical clearing time). Po výpočtech, kterými jsme zjistili důležité parametry kabelů, jsme začali v etapách kabelizovat model soustavy. V jednotlivých etapách jsme určili CCT generátoru. Výsledný graf závislosti CCT na míře kabelizace můžeme vidět na obrázku 27.

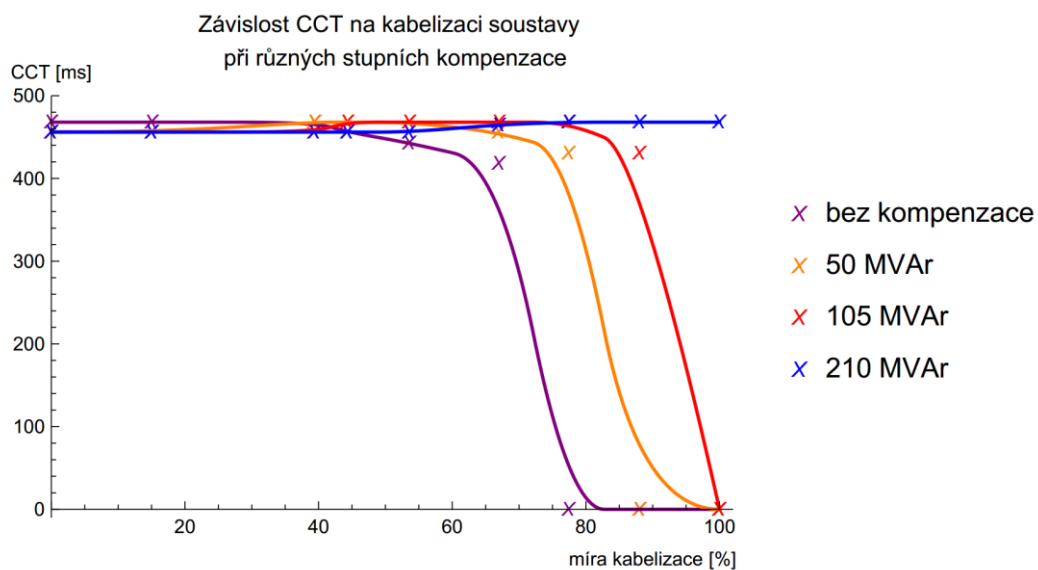


Obrázek 27 - průběh CCT při vzrůstající kabelizaci

Vliv kabelizace je patrný. Protože jsme začali kabelizovat soustavu od nejvzdálenějšího místa vzhledem k testovanému generátoru G_1 , se vliv projevil až v etapě 3. Od toho okamžiku CCT nadále klesá až k nule, kde v etapách 6-8 došlo ke ztrátě stability ještě před vytvořením zkratu, soustava tedy není schopná existovat v ustáleném stavu.

4. Na vytvořeném modelu zhodnotit vliv kompenzace nabíjecího výkonu kabelových sítí na stabilitu zdrojů v ES

V této části jsme nejdříve pomocí simulaci určili nejvhodnější umístění kompenzační tlumivky v přenosové části modelu z hlediska výkonu tlumivky. Vyšlo najevo, že nejlepší umístění je v uzlu 2, kde se také nachází námi testovaný generátor. Vliv kompenzace s umístěním tlumivky do uzlu 2 na CCT generátoru můžeme pozorovat na obrázku 28.



Obrázek 28 - průběhy CCT při různých stupních kompenzace v uzlu 2

Vidíme, že vliv kompenzace je značný. S kompenzační tlumivkou 50MVAR v uzlu 2 jsme schopni soustavu nadále provozovat i v etapě 6, kdy to bez kompenzace nebylo možné. S rostoucím výkonem tlumivky se průběh posouvá směrem doprava a při plné kompenzaci je průběh takřka rovnoběžný s osou x, tedy i při kompletní kabelizaci soustavy je CCT rovno CCT v etapě 0 (soustava bez kabelových sítí).

V této práci se nám podařilo zhodnotit vliv kabelizace soustavy a její následnou kompenzaci na stabilitu synchronního generátoru (potažmo soustavy). Splnili jsme všechny části zadání diplomové práce.

7. Použitá literatura

- [1] Kolektiv autorů: *Řízení a stabilita elektrizační soustavy*. Asociace Energetických Manažerů Praha, 2013. ISBN 978-80-260-44671-1.
- [2] Kundur, P.: *Power System Stability and Control*. McGraw-Hill Professional, 1. vydání, 1994. ISBN 978-0070359581.
- [3] Toman, P., Drápela, J., Mišák, S., Orságová, J., Paar, M., Topolánek, D., Bok, J., Novotný, J., Škoda, J.: *Provoz distribučních soustav*. ČVUT Praha, 2011. ISBN 978-80-01-04935-8.
- [4] Trojánek, Z., Hájek, J., Kvasnica, P.: *Přechodné jevy v elektrizačních soustavách*. 1. vydání, SNTL Praha, 1987.
- [5] Doležel, I.: *Elektromechanické jevy v soustavě*. [PDF]. Dostupné z: <http://www.powerwiki.cz/attach/PRE/PRE_Dolezel_4.pdf>.
- [6] Cintula, B.: *Analýza dynamickej stability synchronneho generátora*. [online] 2011. Dostupné z: <<http://www.posterus.sk/?p=11726>>.
- [7] Nádvorník, J.: *Vliv kabelových sítí VN a VVN na provoz PS a DS: bakalářská práce*. Praha, 2013.
- [8] Christie, R.: *Scanned 30 bus diagram*. [JPEG] 1993. Dostupné z: <https://www.ee.washington.edu/research/pstca/pf30/pg_tca30fig.htm>.
- [9] Christie, R.: *Data in Common Data Format*. [TXT] 1993. Dostupné z: <<https://www.ee.washington.edu/research/pstca/pf30/ieee30cdf.txt>>.
- [10] Nohac, K.: *Cvičení z předmětu: Přechodné jevy v elektrizačních soustavách*. [PDF]. Dostupné z: <<http://home.zcu.cz/~nohac/PJS/CviceniPJS2.pdf>>.
- [11] ABB Group: *XLPE Land Cable Systems*. [PDF]. Dostupné z: <[http://www04.abb.com/global/seitp/seitp202.nsf/0/badf833d6cb8d46dc1257c0b002b3702/\\$file/XLPE+Submarine+Cable+Systems+2GM5007+.pdf](http://www04.abb.com/global/seitp/seitp202.nsf/0/badf833d6cb8d46dc1257c0b002b3702/$file/XLPE+Submarine+Cable+Systems+2GM5007+.pdf)>.
- [12] Švec, J.: *Parametry vedení RLG: materiály k předmětu Elektroenergetika 2*. [PDF] 2014. Dostupné z: <http://www.powerwiki.cz/attach/EN2/EN2_pr01_parametryRLG.pdf>.
- [13] Kostka, T.: *Přenos elektrické energie*. [PDF] 2009. Dostupné z: <http://www.outech-havirov.cz/skola/files/knihovna_eltech/ee/prenos_ee.pdf>.

8. Přílohy

Seznam příloh

Příloha 1 - Průběhy zátěžného úhlu při různých stupních kompenzace v uzlu 2 (etapa 0)

Příloha 2 - Průběhy zátěžného úhlu při různých stupních kompenzace v uzlu 2 (etapa 1)

Příloha 3 - Průběhy zátěžného úhlu při různých stupních kompenzace v uzlu 2 (etapa 2)

Příloha 4 - Průběhy zátěžného úhlu při různých stupních kompenzace v uzlu 2 (etapa 3)

Příloha 5 - Průběhy zátěžného úhlu při různých stupních kompenzace v uzlu 2 (etapa 4)

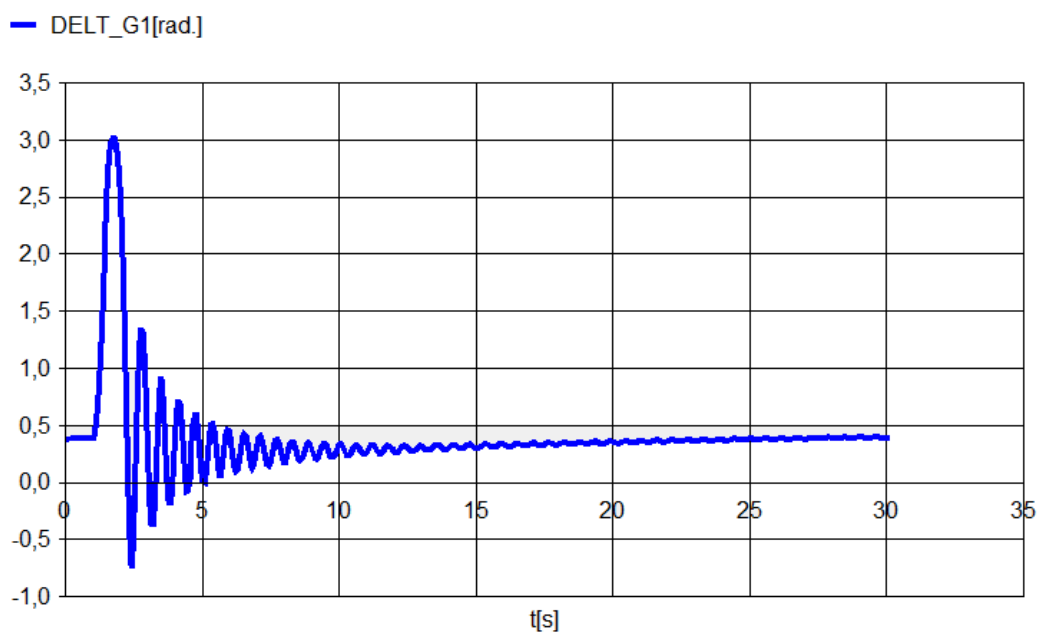
Příloha 6 - Průběhy zátěžného úhlu při různých stupních kompenzace v uzlu 2 (etapa 5)

Příloha 7 - Průběhy zátěžného úhlu při různých stupních kompenzace v uzlu 2 (etapa 6)

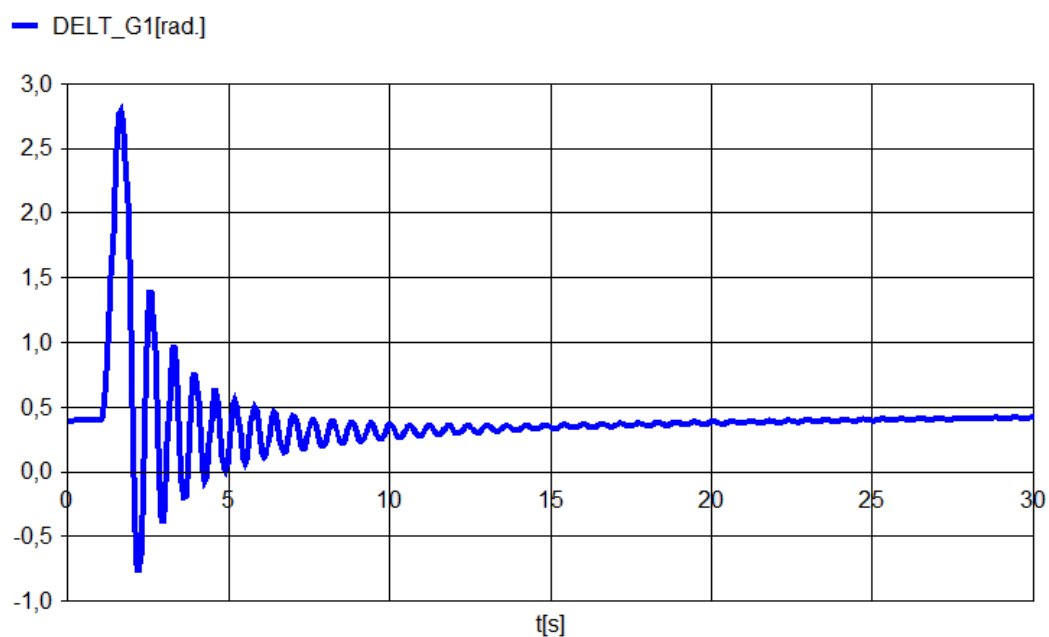
Příloha 8 - Průběhy zátěžného úhlu při různých stupních kompenzace v uzlu 2 (etapa 7)

Příloha 9 - Průběhy zátěžného úhlu při různých stupních kompenzace v uzlu 2 (etapa 8)

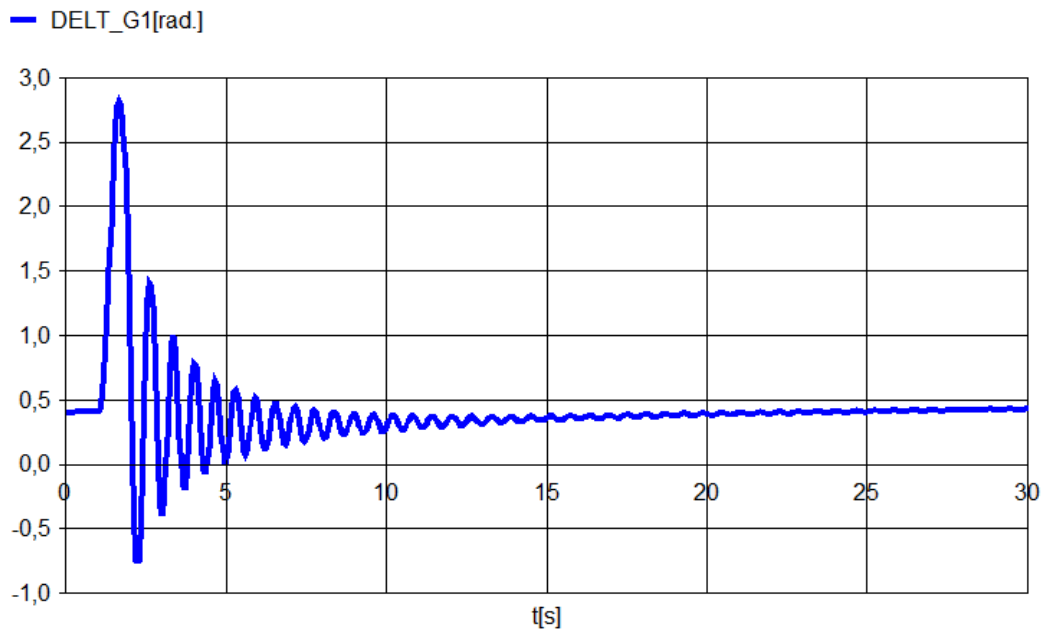
8.1 Příloha 1 - Průběhy zátěžného úhlu při různých stupních kompenzace v uzlu 2 (etapa 0)



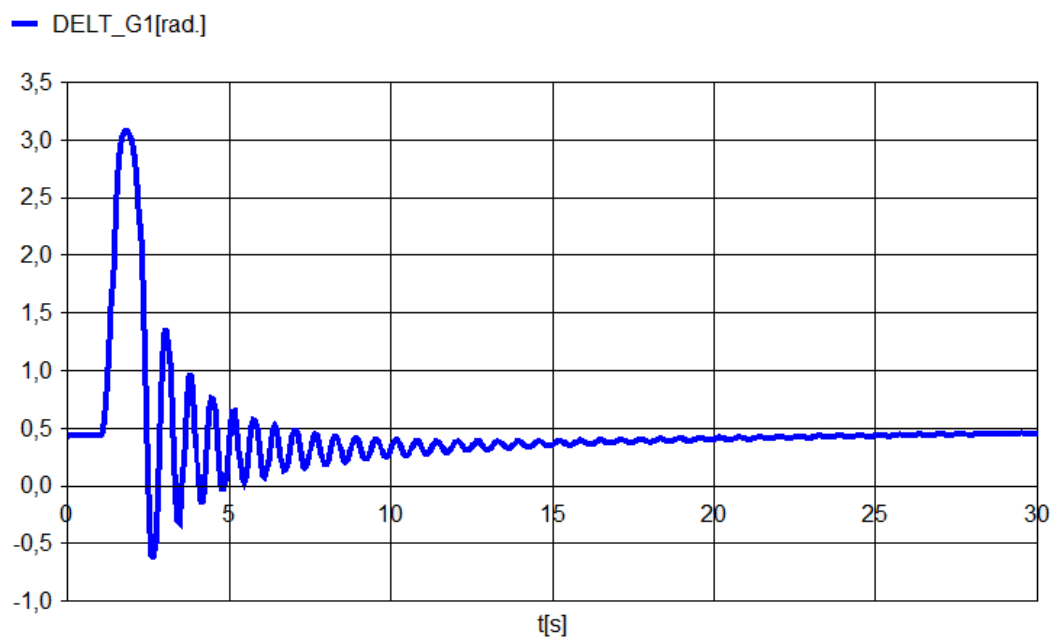
Obrázek 29 - průběh zátěžného úhlu bez kompenzace



Obrázek 30 - průběh zátěžného úhlu s tlumivkou 50MVAR

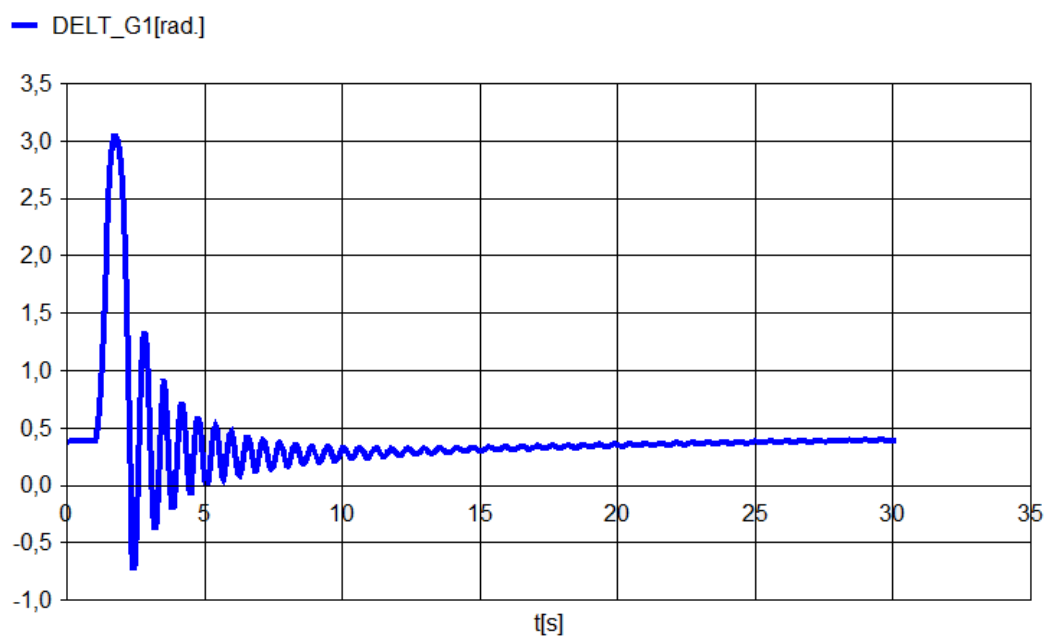


Obrázek 31 - průběh zátěžného úhlu s tlumivkou 105MVAR

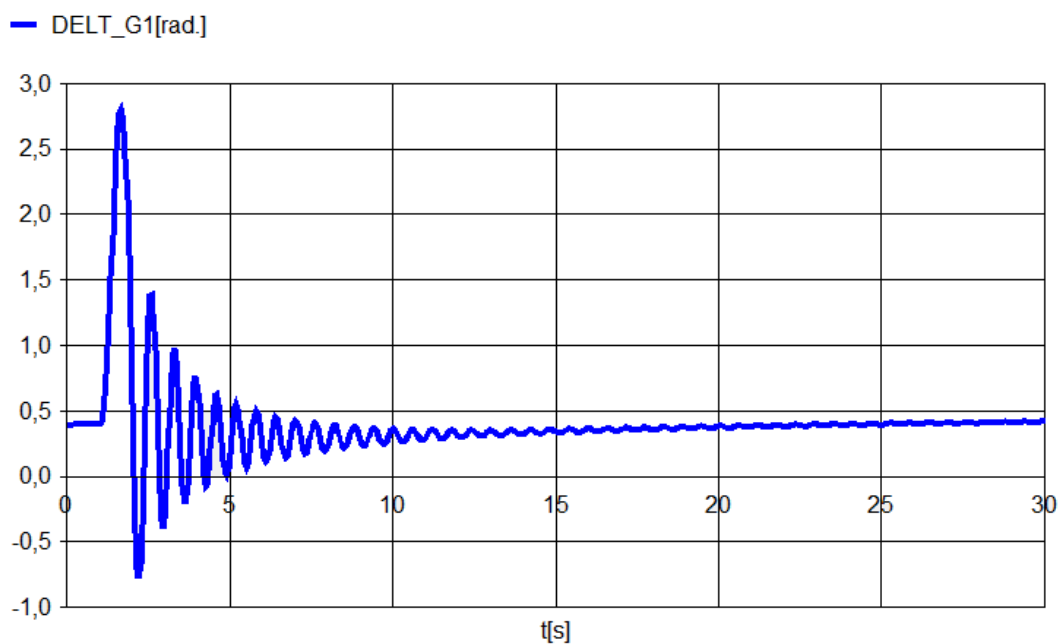


Obrázek 32 - průběh zátěžného úhlu s tlumivkou 210MVAR

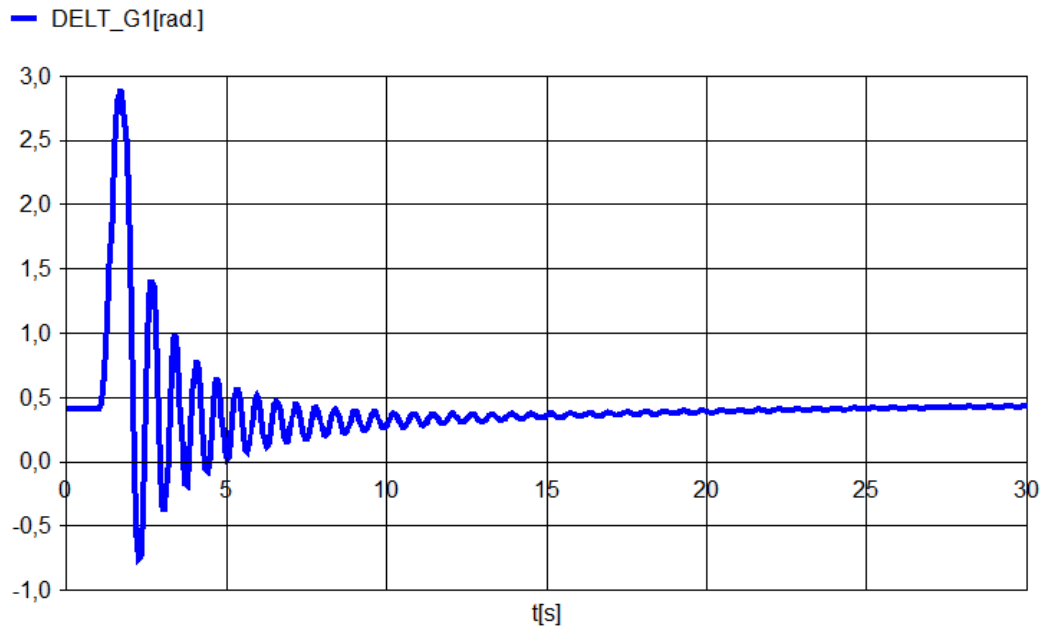
8.2 Příloha 2 - Průběhy zátěžného úhlu při různých stupních kompenzace v uzlu 2 (etapa 1)



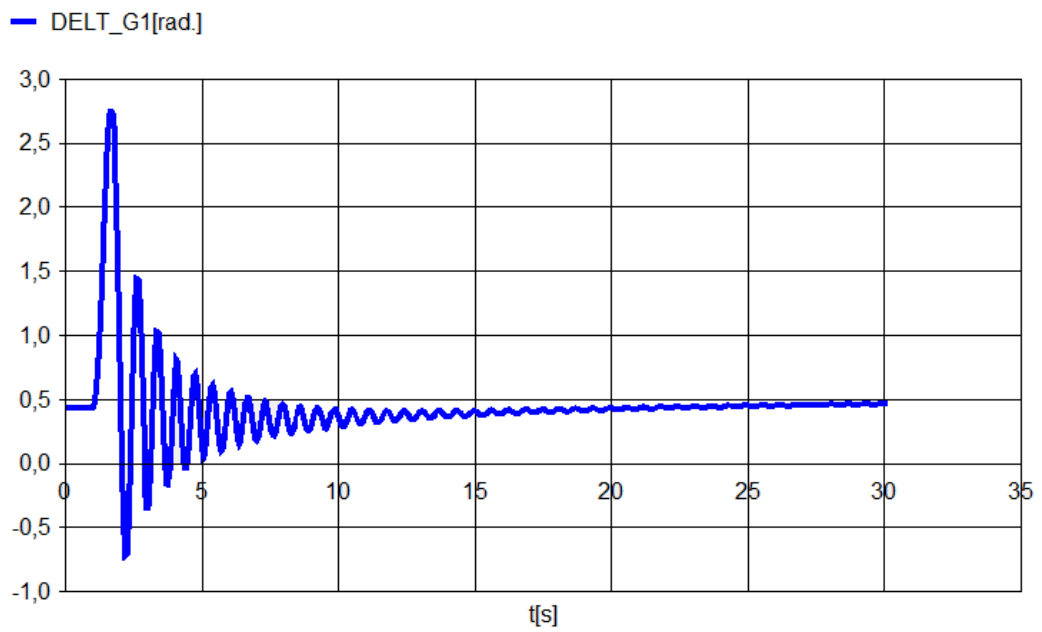
Obrázek 33 - průběh zátěžného úhlu bez kompenzace



Obrázek 34 - průběh zátěžného úhlu s tlumivkou 50MVAR

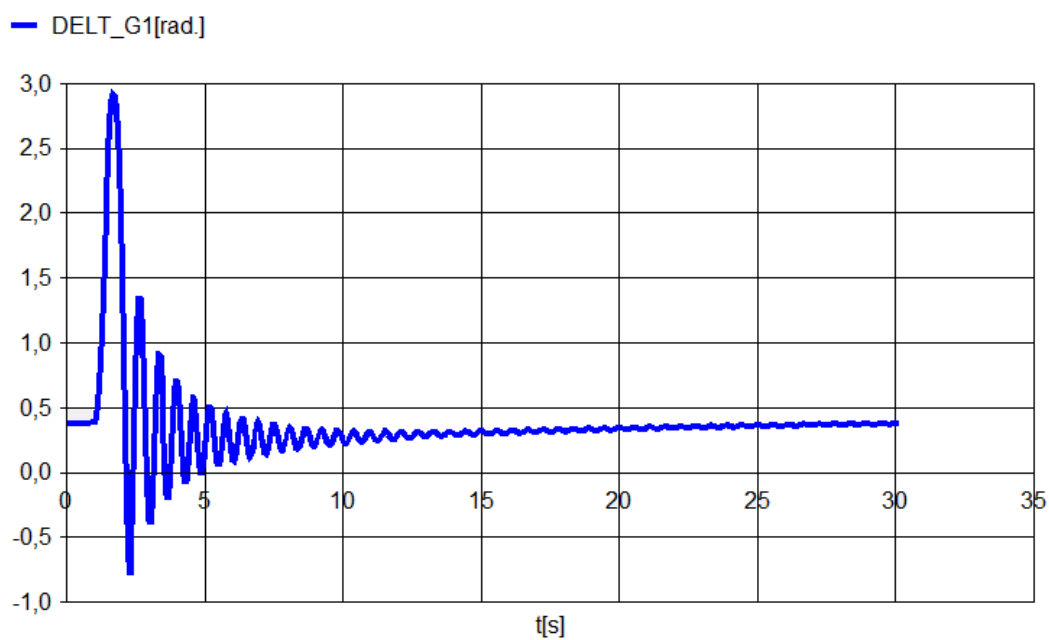


Obrázek 35 - průběh zátěžného úhlu s tlumivkou 105MVar

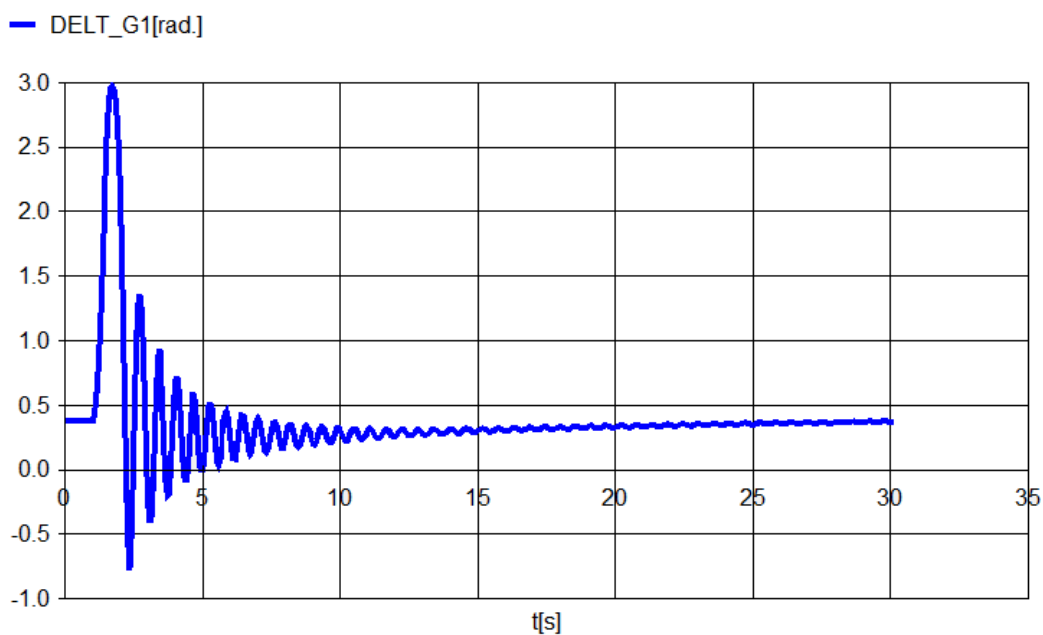


Obrázek 36 - průběh zátěžného úhlu s tlumivkou 210MVar

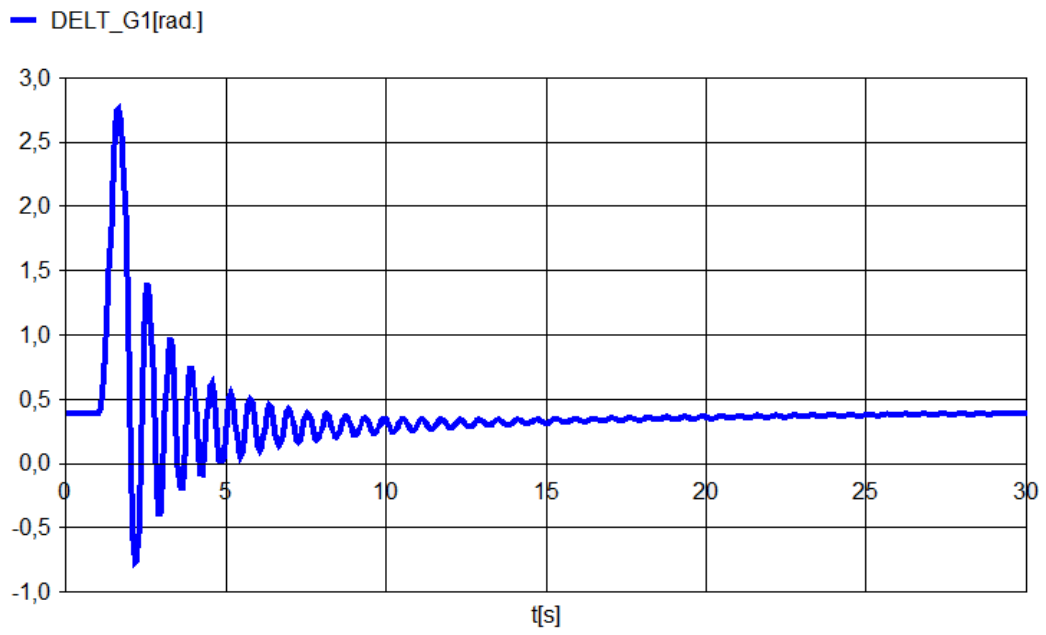
8.3 Příloha 3 - Průběhy zátěžného úhlu při různých stupních kompenzace v uzlu 2 (etapa 2)



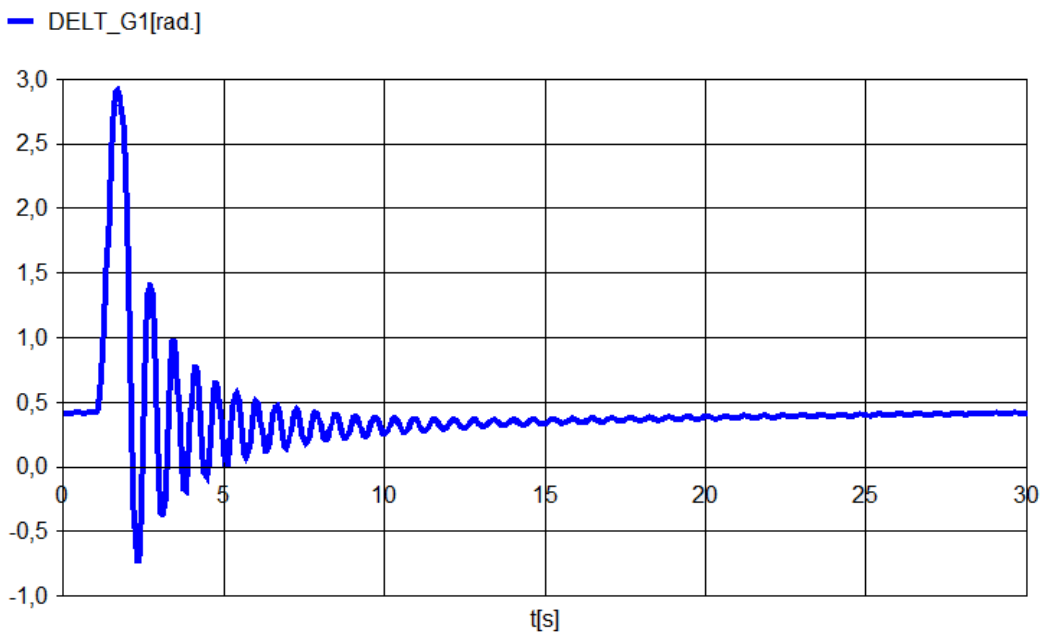
Obrázek 37 - průběh zátěžného úhlu bez kompenzace



Obrázek 38 - průběh zátěžného úhlu s tlumivkou 50MVAR

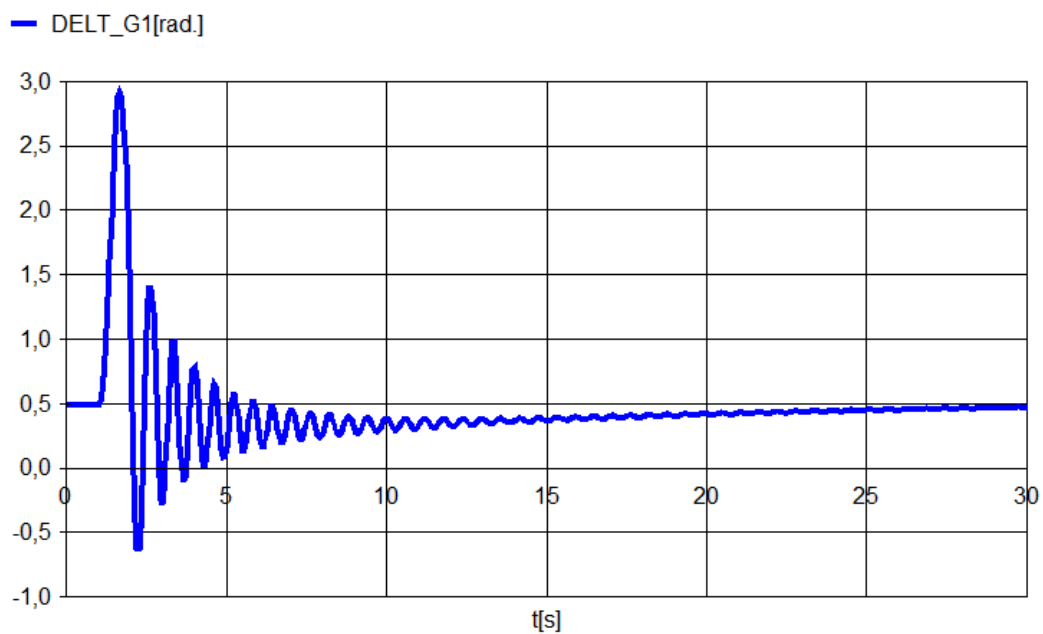


Obrázek 39 - průběh zátěžného úhlu s tlumivkou 105MVA_r

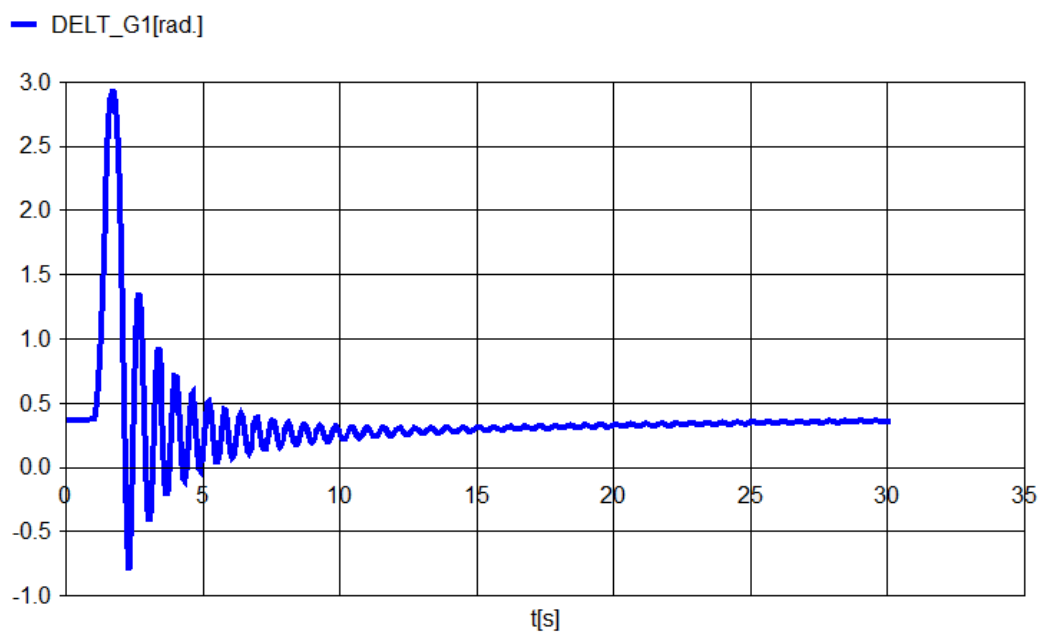


Obrázek 40 - průběh zátěžného úhlu s tlumivkou 210MVA_r

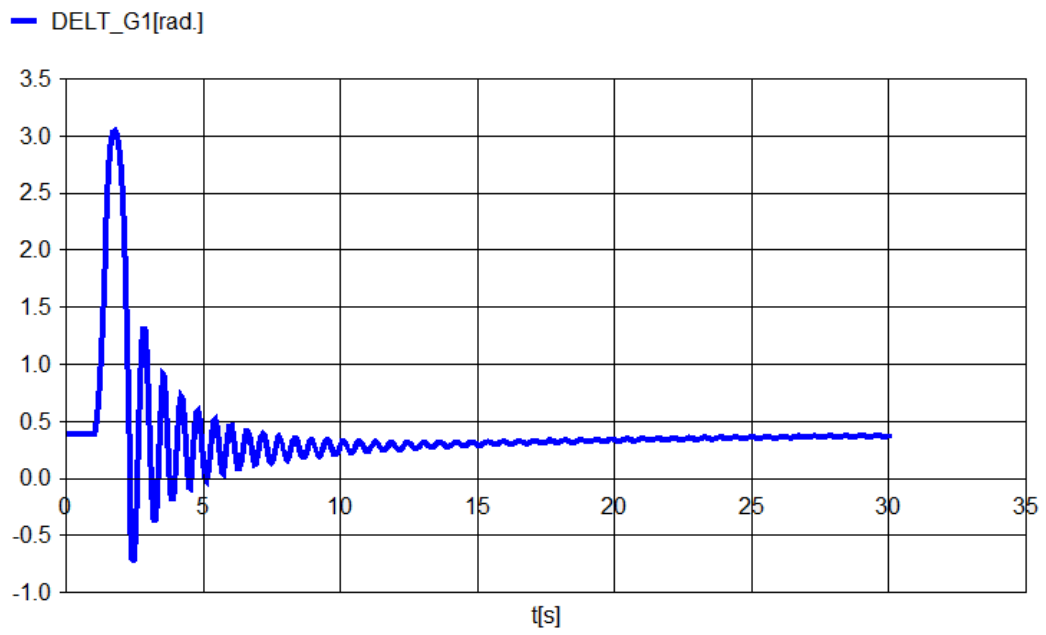
8.4 Příloha 4 - Průběhy zátěžného úhlu při různých stupních kompenzace v uzlu 2 (etapa 3)



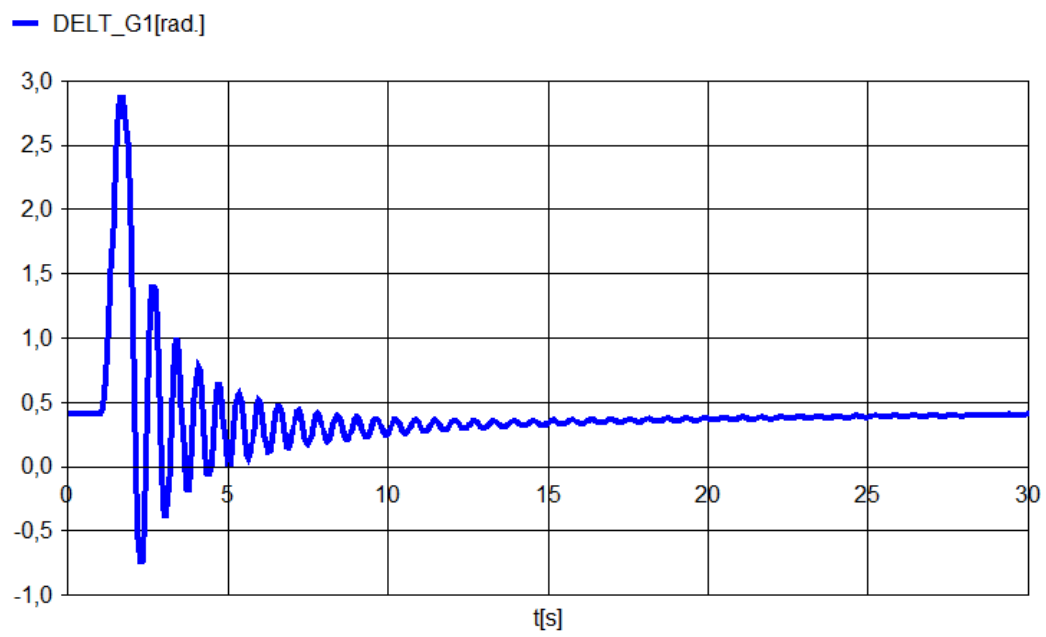
Obrázek 41 - průběh zátěžného úhlu bez kompenzace



Obrázek 42 - průběh zátěžného úhlu s tlumivkou 50MVAR

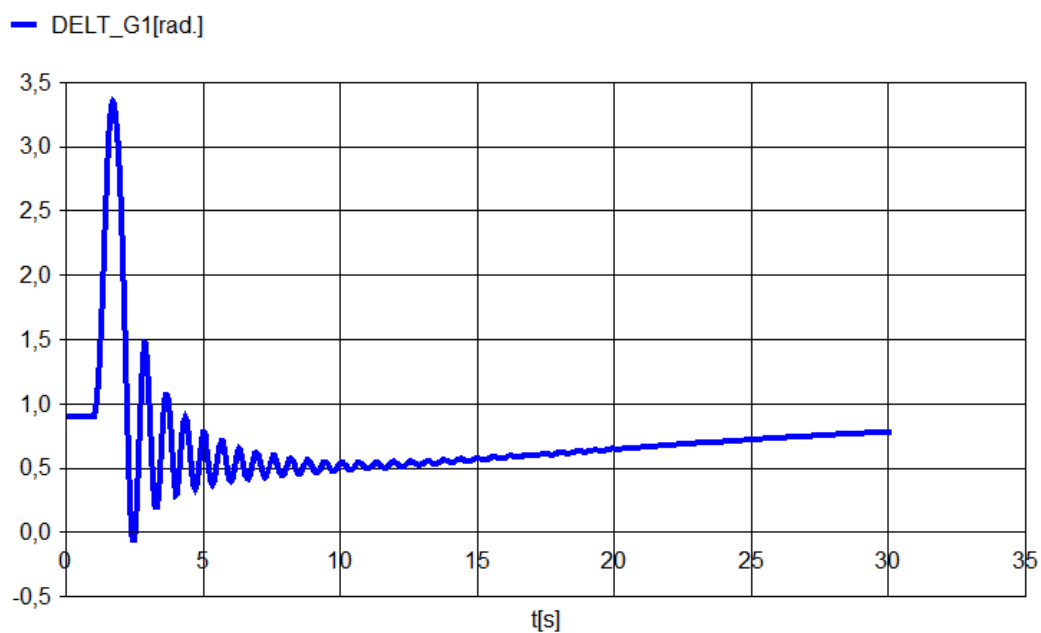


Obrázek 43 - průběh zátěžného úhlu s tlumivkou 105MVar

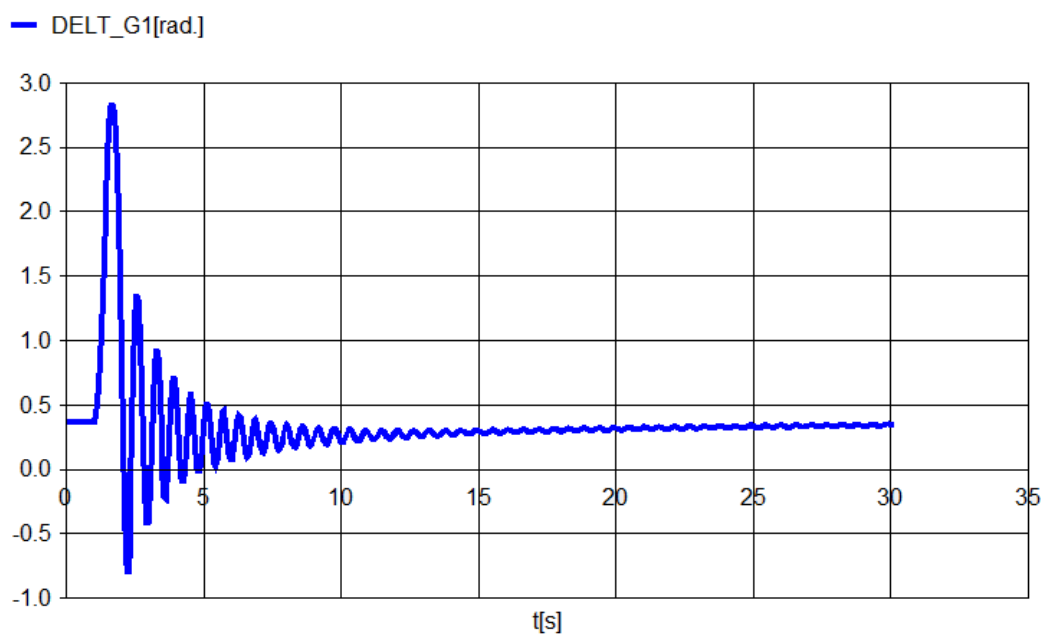


Obrázek 44 - průběh zátěžného úhlu s tlumivkou 210MVar

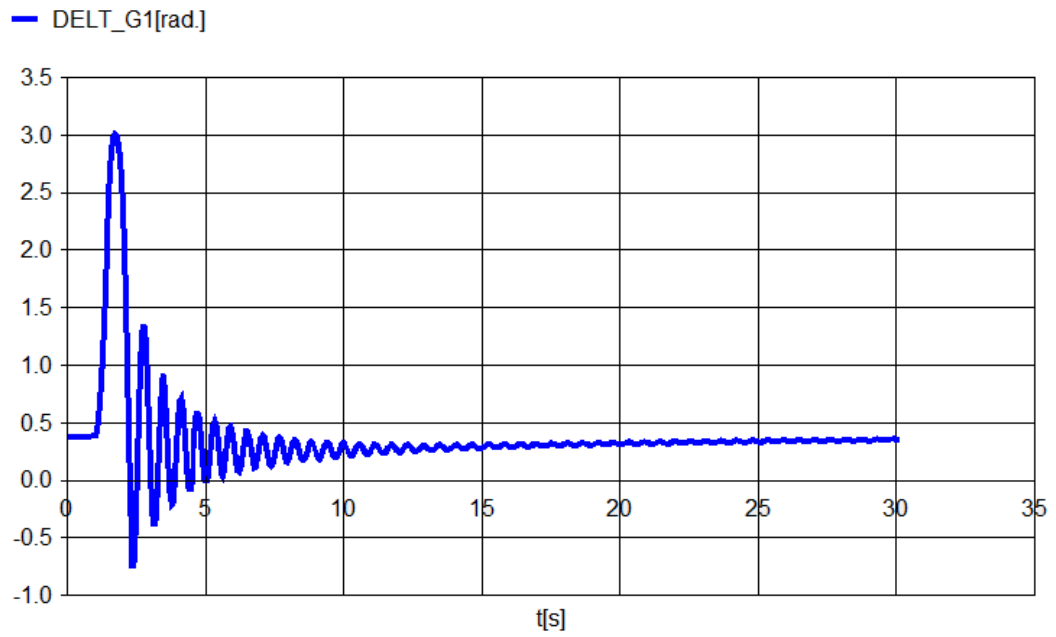
8.5 Příloha 5 - Průběhy zátěžného úhlu při různých stupních kompenzace v uzlu 2 (etapa 4)



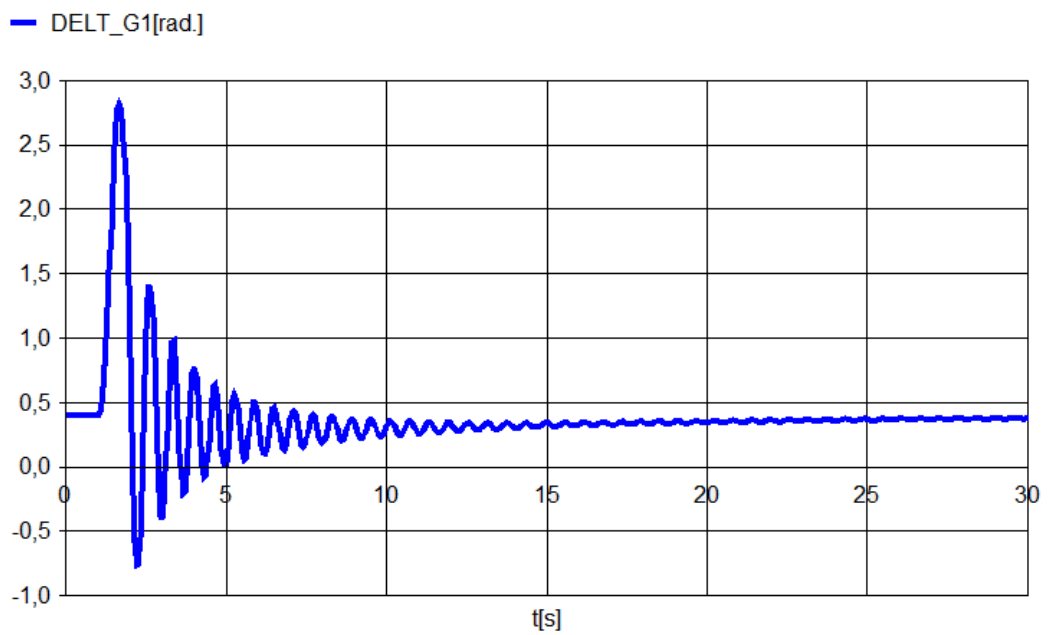
Obrázek 45 - průběh zátěžného úhlu bez kompenzace



Obrázek 46 - průběh zátěžného úhlu s tlumivkou 50MVAR

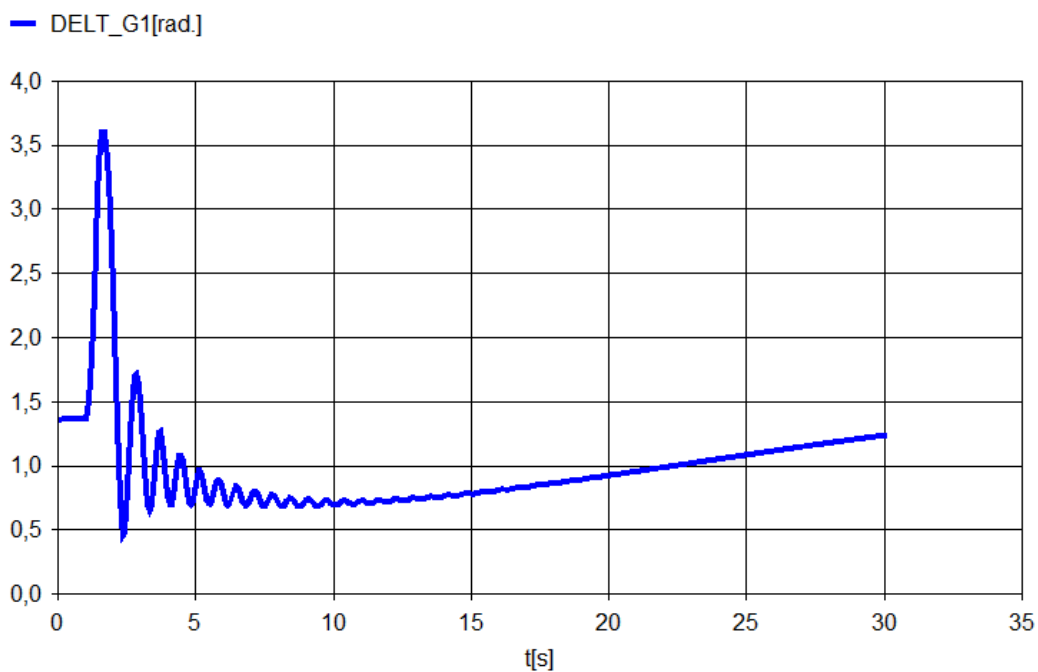


Obrázek 47 - průběh zátěžného úhlu s tlumivkou 105MVar

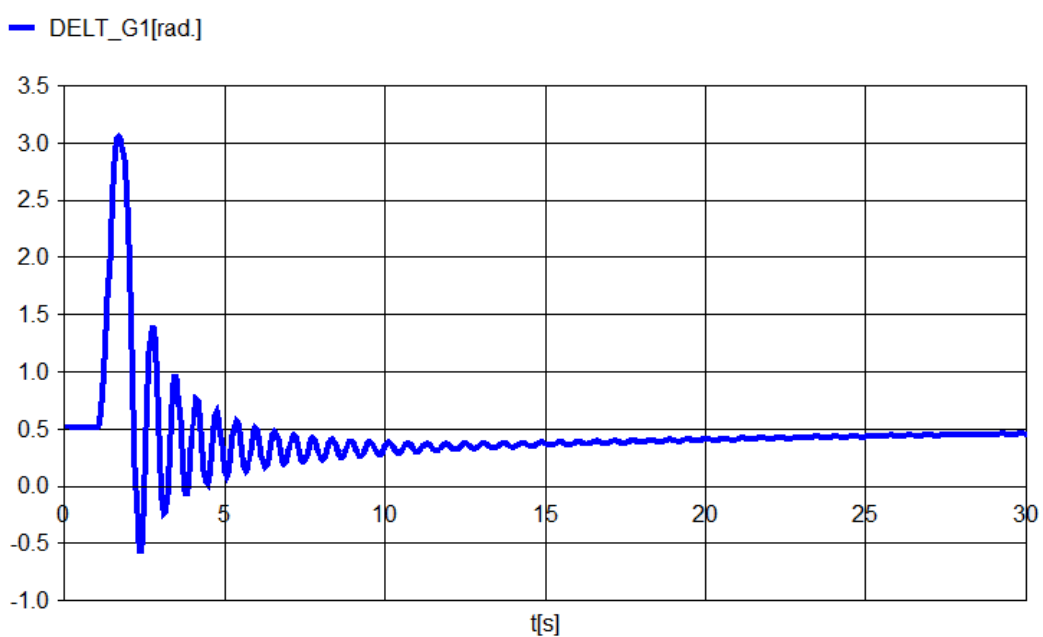


Obrázek 48 - průběh zátěžného úhlu s tlumivkou 210MVar

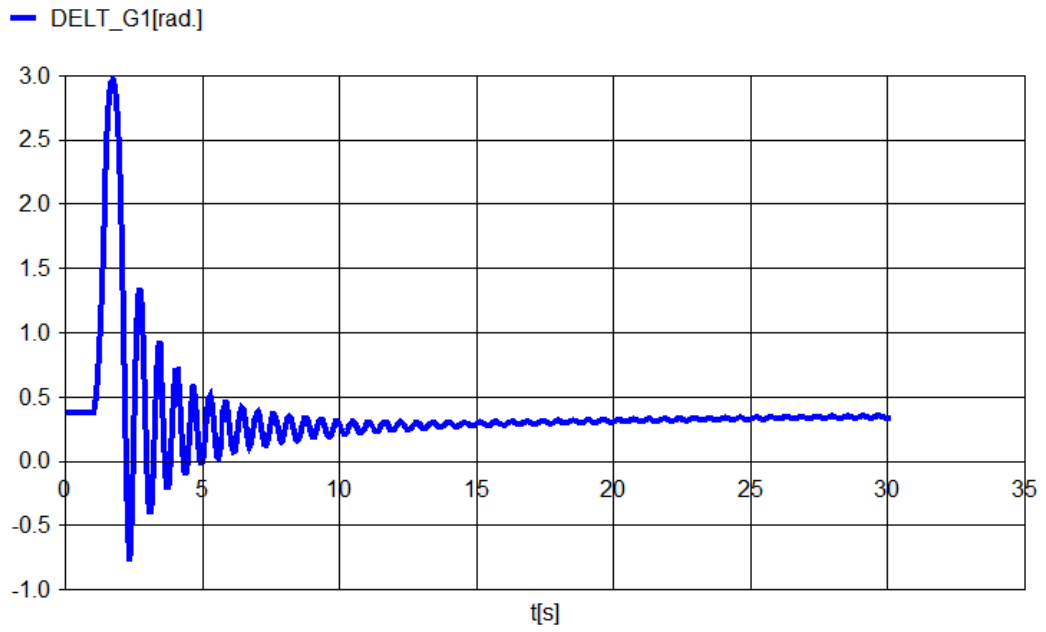
8.6 Příloha 6 - Průběhy zátěžného úhlu při různých stupních kompenzace v uzlu 2 (etapa 5)



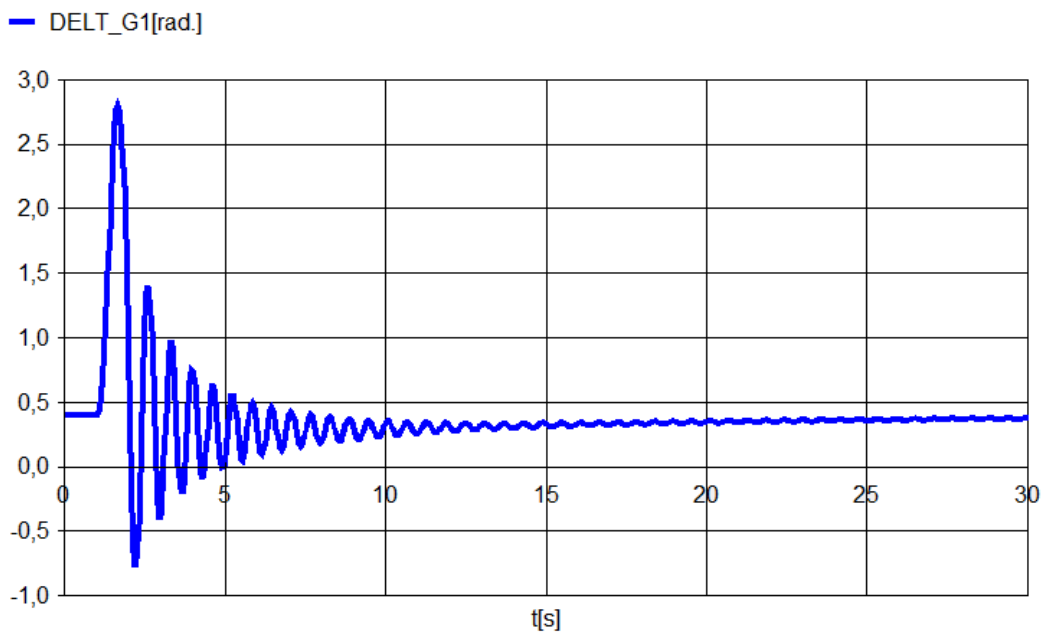
Obrázek 49 - průběh zátěžného úhlu bez kompenzace



Obrázek 50 - průběh zátěžného úhlu s tlumivkou 50MVAR

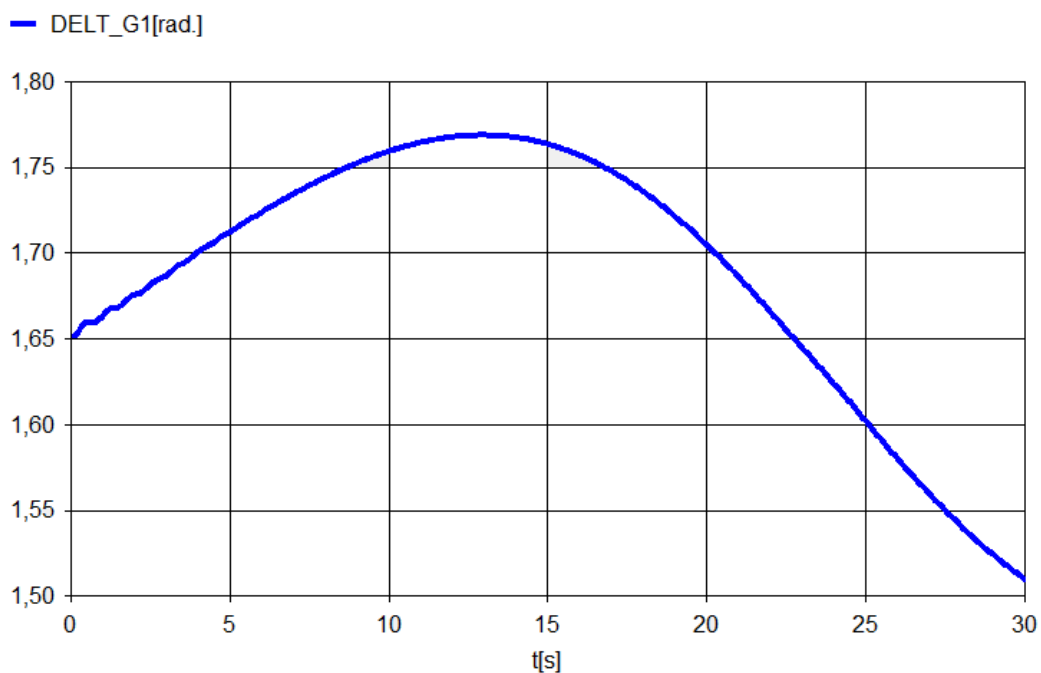


Obrázek 51 - průběh zátěžného úhlu s tlumivkou 105MVAR

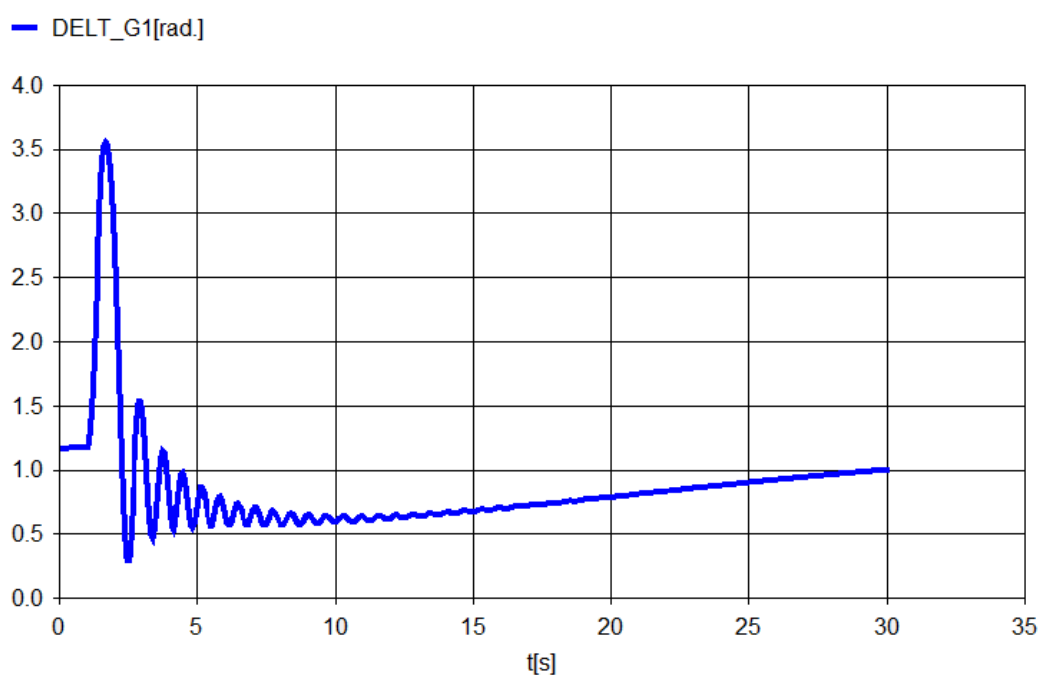


Obrázek 52 - průběh zátěžného úhlu s tlumivkou 210MVAR

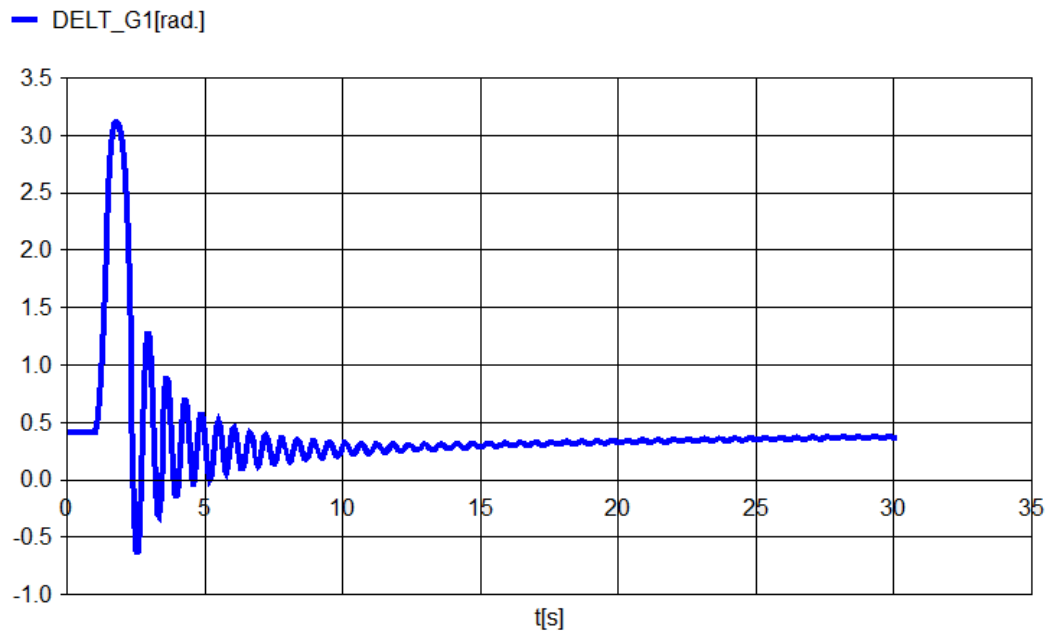
8.7 Příloha 7 - Průběhy zátěžného úhlu při různých stupních kompenzace v uzlu 2 (etapa 6)



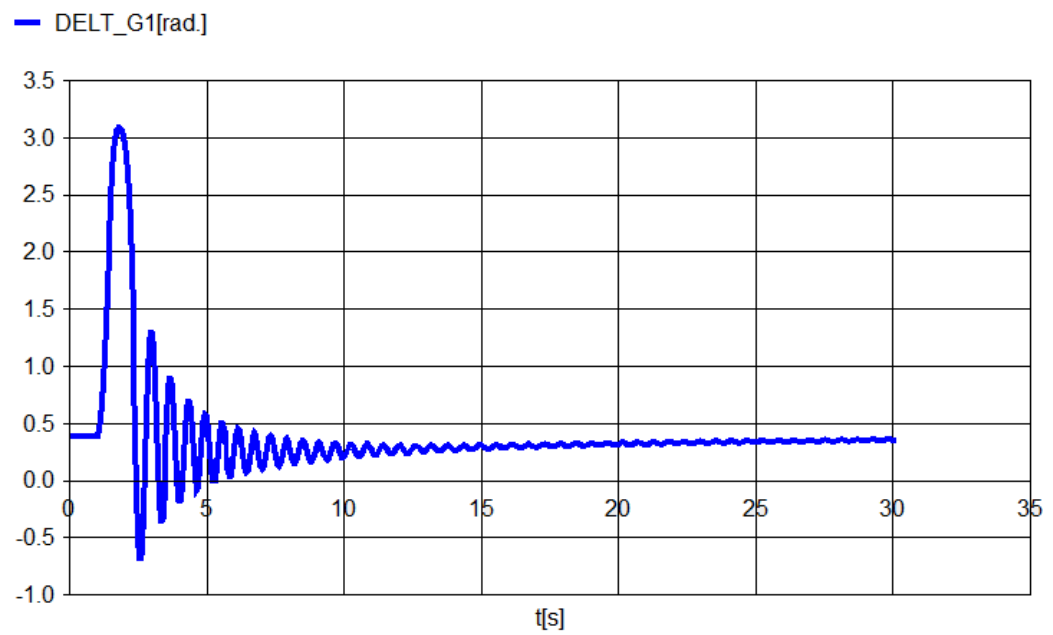
Obrázek 53 - průběh zátěžného úhlu bez kompenzace (bez zkratu)



Obrázek 54 - průběh zátěžného úhlu s tlumivkou 50MVAR

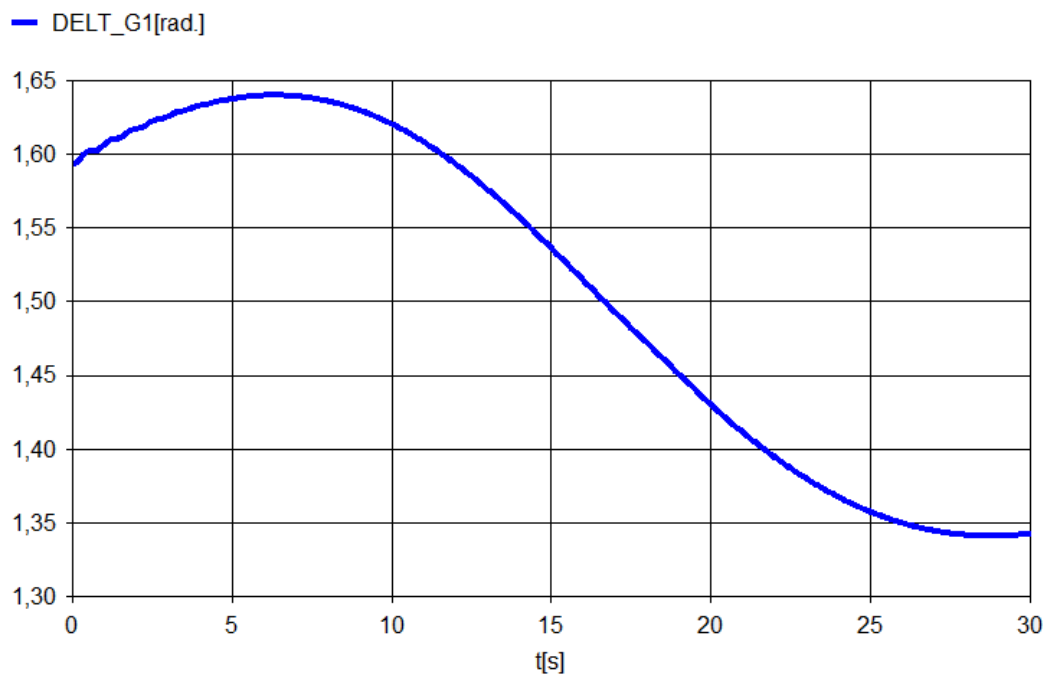


Obrázek 55 - průběh zátěžného úhlu s tlumivkou 105MVA_r

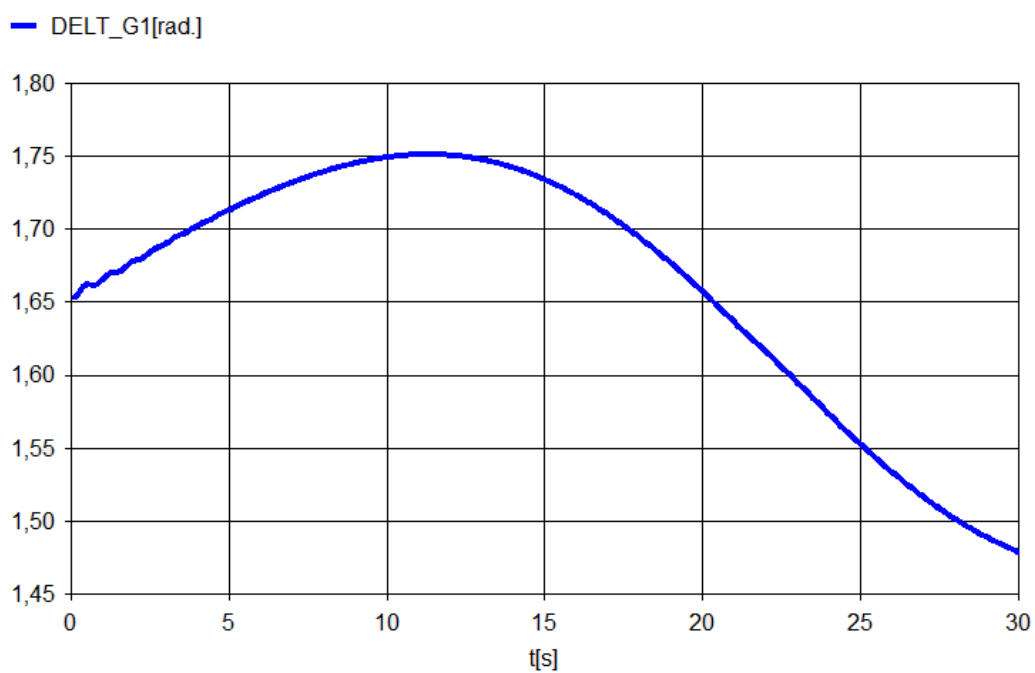


Obrázek 56 - průběh zátěžného úhlu s tlumivkou 210MVA_r

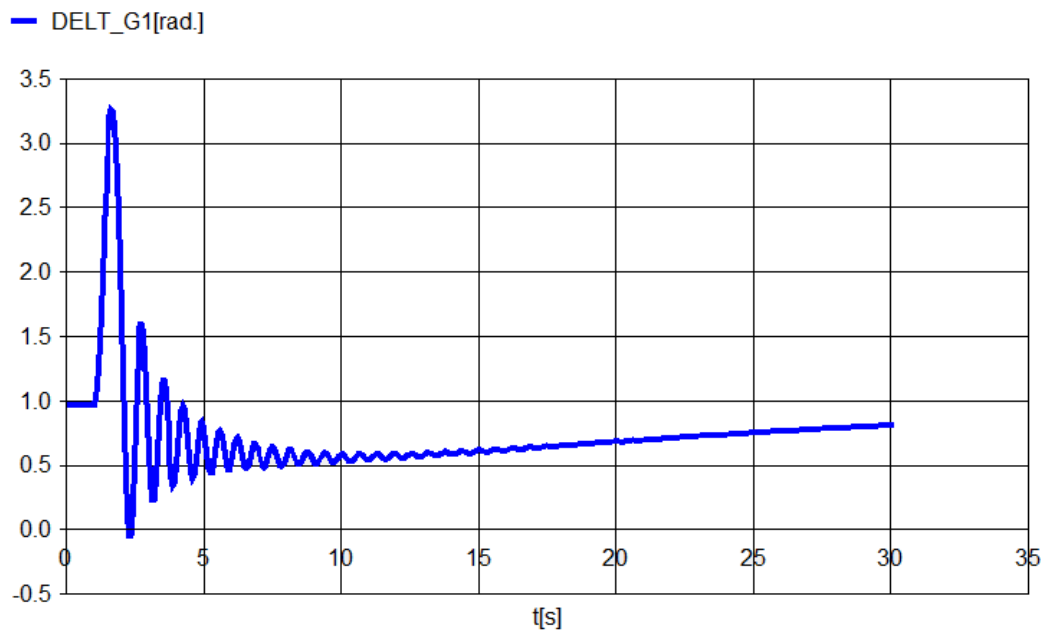
8.8 Příloha 8 - Průběhy zátěžného úhlu při různých stupních kompenzace v uzlu 2 (etapa 7)



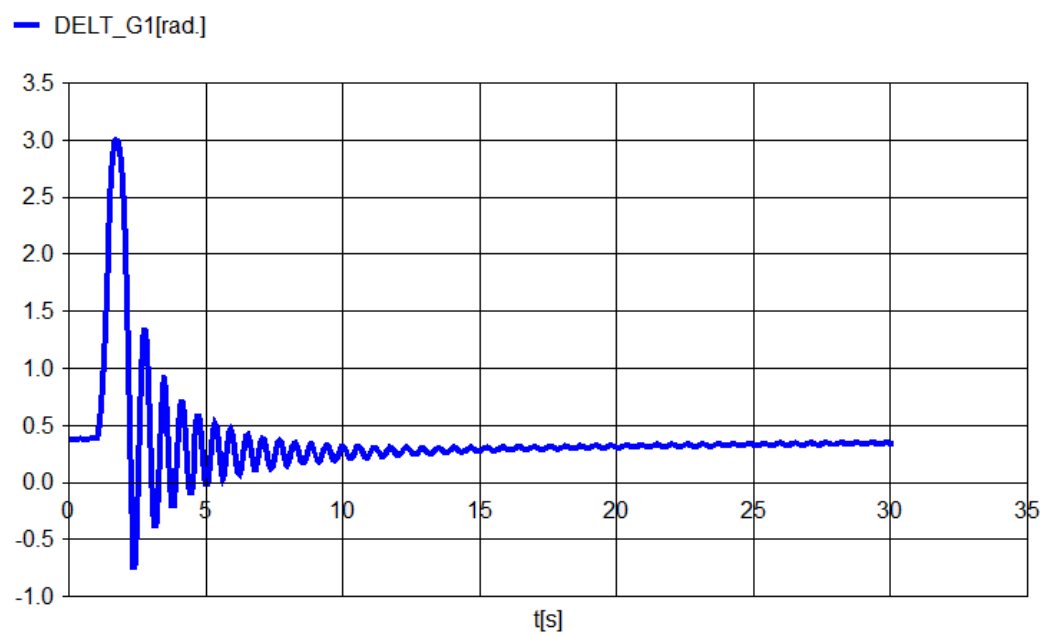
Obrázek 57 - průběh zátěžného úhlu bez kompenzace (bez zkratu)



Obrázek 58 - průběh zátěžného úhlu s tlumivkou 50MVAR (bez zkratu)

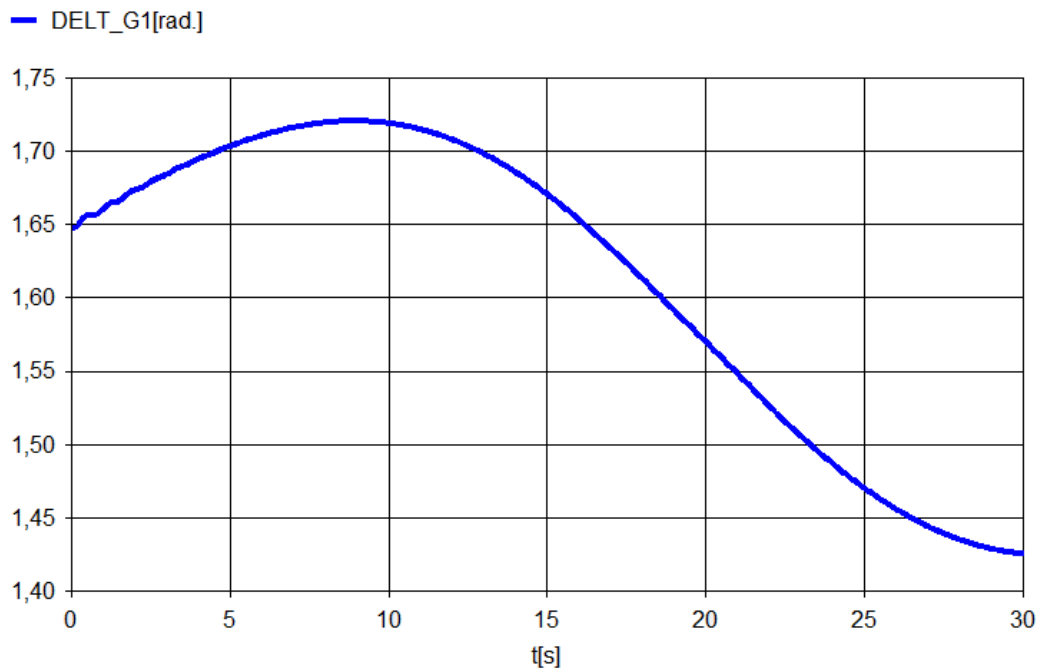


Obrázek 59 - průběh zátěžného úhlu s tlumivkou 105MVAR

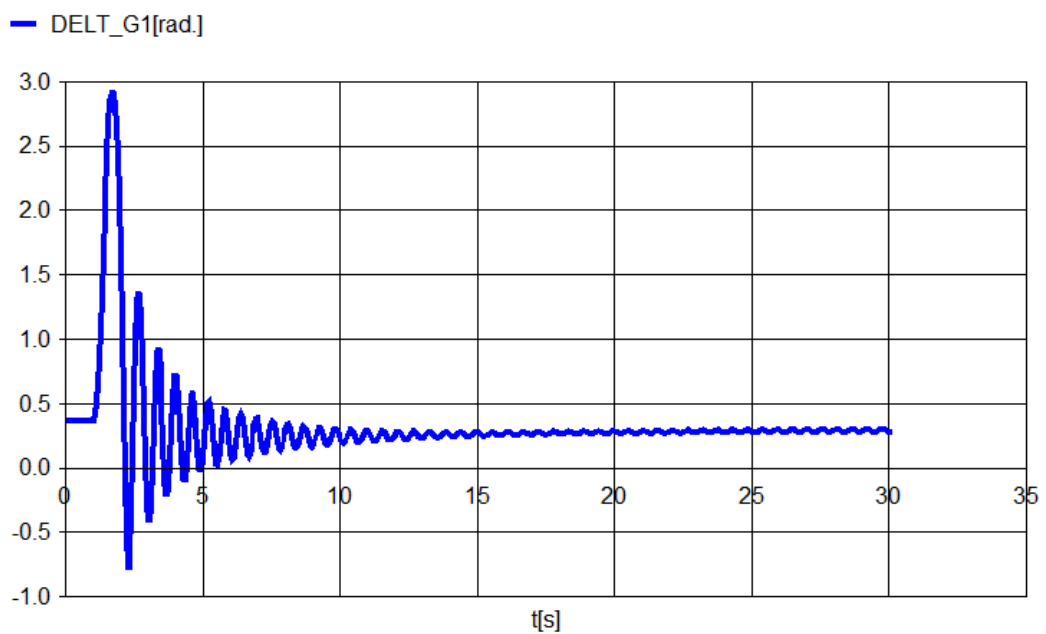


Obrázek 60 - průběh zátěžného úhlu s tlumivkou 210MVAR

8.9 Příloha 9 - Průběhy zátěžného úhlu při různých stupních kompenzace v uzlu 2 (etapa 8)



Obrázek 61 - průběh zátěžného úhlu s tlumivkou 105MVAR (bez zkratu)



Obrázek 62 - průběh zátěžného úhlu s tlumivkou 210MVAR