

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

**FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH
TECHNOLOGIÍ**

ÚSTAV ELEKTROENERGETIKY

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION

DEPARTMENT OF ELECTRICAL POWER ENGINEERING

**SIMULACE ÚČINKŮ ZKRATOVÝCH PROUDŮ V
ROZVODNÁCH VVN**

DIPLOMOVÁ PRÁCE

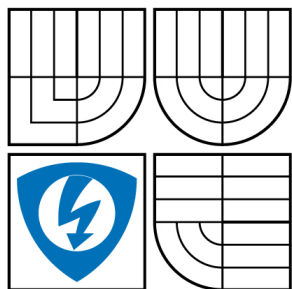
MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. MILOSLAV TOMÁNEK

BRNO 2008



VYSOKÉ UČENÍ
TECHNICKÉ V BRNĚ

Fakulta elektrotechniky
a komunikačních technologií

Ústav elektroenergetiky

Diplomová práce

magisterský navazující studijní obor

Elektroenergetika

Student: Tománek Miloslav Bc.

ID: 47124

Ročník: 2

Akademický rok: 2007/2008

NÁZEV TÉMATU:

Simulace účinků zkratových proudů v rozvodnách VVN

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

1. teorie vzniku a rozdělení zkratových proudů, jejich elektrodynamické a tepelné účinky, stanovení impedance poruchové smyčky
2. výpočet a dimenzování elektrických zařízení dle hodnoty zkratových proudů
3. praktická simulace mechanických účinků zkratových proudů pomocí vytvořeného programu

DOPORUČENÁ LITERATURA:

Podle pokynů vedoucího

Termín zadání: 17.12.2007

Termín odevzdání: 28.5.2008

Vedoucí práce: doc. Ing. Petr Toman, Ph.D.

doc. Ing. Petr Toman, Ph.D.

předseda oborové rady

UPOZORNĚNÍ:

Autor diplomové práce nesmí při vytváření diplomové práce porušit autorská práva třetích osob, zejména nesmí zasahovat nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a musí si být plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení § 152 trestního zákona č. 140/1961 Sb.

LICENČNÍ SMLOUVA

POSKYTOVANÁ K VÝKONU PRÁVA UŽÍT ŠKOLNÍ DÍLO

uzavřená mezi smluvními stranami:

1. Pan/paní

Jméno a příjmení: Bc. Miloslav Tománek
Bytem: Osvobození 635, 68709, Boršice
Narozen/a (datum a místo): 25.9.1982, Uherské Hradiště

(dále jen "autor")

a

2. Vysoké učení technické v Brně

Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií
se sídlem Údolní 244/53, 60200 Brno 2
jejímž jménem jedná na základě písemného pověření děkanem fakulty:
doc. Ing. Petr Toman, Ph.D.

(dále jen "nabyvatel")

Článek 1

Specifikace školního díla

1. Předmětem této smlouvy je vysokoškolská kvalifikační práce (VŠKP):

- ☐ disertační práce
- ☒ diplomová práce
- ☐ bakalářská práce

jiná práce, jejíž druh je specifikován jako

(dále jen VŠKP nebo dílo)

Název VŠKP: Simulace účinků zkratových proudů v rozvodnách VVN

Vedoucí/školicitel VŠKP: doc. Ing. Petr Toman, Ph.D.

Ústav: Ústav elektroenergetiky

Datum obhajoby VŠKP:

VŠKP odevzdal autor nabyvateli v:

- ☒ tištěné formě - počet exemplářů 1
- ☒ elektronické formě - počet exemplářů 1

2. Autor prohlašuje, že vytvořil samostatnou vlastní tvůrčí činností dílo shora popsané a specifikované. Autor dále prohlašuje, že při zpracovávání díla se sám nedostal do rozporu s autorským zákonem a předpisy souvisejícími a že je dílo dílem původním.
3. Dílo je chráněno jako dílo dle autorského zákona v platném znění.
4. Autor potvrzuje, že listinná a elektronická verze díla je identická.

Článek 2

Udělení licenčního oprávnění

1. Autor touto smlouvou poskytuje nabyvateli oprávnění (licenci) k výkonu práva uvedené dílo nevýdělečně užít, archivovat a zpřístupnit ke studijním, výukovým a výzkumným účelům včetně pořizování výpisů, opisů a rozmnoženin.
2. Licence je poskytována celosvětově, pro celou dobu trvání autorských a majetkových práv k dílu.
3. Autor souhlasí se zveřejněním díla v databázi přístupné v mezinárodní síti
 - ☒ ihned po uzavření této smlouvy
 - ☐ 1 rok po uzavření této smlouvy
 - ☐ 3 roky po uzavření této smlouvy
 - ☐ 5 let po uzavření této smlouvy
 - ☐ 10 let po uzavření této smlouvy(z důvodu utajení v něm obsažených informací)
4. Nevýdělečné zveřejňování díla nabyvatelem v souladu s ustanovením § 47b zákona č. 111/1998 Sb., v platném znění, nevyžaduje licenci a nabyvatel je k němu povinen a oprávněn ze zákona.

Článek 3

Závěrečná ustanovení

1. Smlouva je sepsána ve třech vyhotoveních s platností originálu, přičemž po jednom vyhotovení obdrží autor a nabyvatel, další vyhotovení je vloženo do VŠKP.
2. Vztahy mezi smluvními stranami vzniklé a neupravené touto smlouvou se řídí autorským zákonem, občanským zákoníkem, vysokoškolským zákonem, zákonem o archivnictví, v platném znění a popř. dalšími právními předpisy.
3. Licenční smlouva byla uzavřena na základě svobodné a pravé vůle smluvních stran, s plným porozuměním jejímu textu i důsledkům, nikoliv v tísní a za nápadně nevýhodných podmínek.
4. Licenční smlouva nabývá platnosti a účinnosti dnem jejího podpisu oběma smluvními stranami.

V Brně dne:

.....

Nabyvatel

.....

Autor

Bibliografická citace práce:

TOMÁNEK, M. Simulace účinků zkratových proudů v rozvodnách vvn. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2008, 67 stran. Vedoucí diplomové práce doc. Ing. Petr Toman, Ph.D.

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

Zároveň bych na tomto místě chtěl poděkovat vedoucímu diplomové práce doc. Ing. Petru Tomanovi, Ph.D. za cenné rady a připomínky k mé práci, poskytnutou literaturu a svým rodičům za podporu během celé doby mého studia.

.....



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ



**Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií
Ústav elektroenergetiky**

Diplomová práce

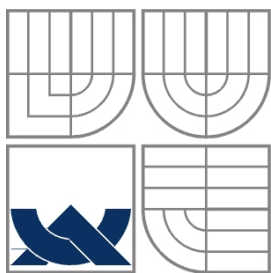
Simulace účinků zkratových proudů v rozvodnách vvn

Bc. Miloslav Tománek

vedoucí: doc. Ing. Petr Toman, PhD.

Ústav elektroenergetiky, FEKT VUT v Brně, 2008

Brno



BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



Faculty of Electrical Engineering and Communication

Department of Electrical Power Engineering

Master's Thesis

Simulation of effects of short-circuit currents in HV switching stations

by

Bc. Miloslav Tománek

Supervisor: doc. Ing. Petr Toman, PhD.

Brno University of Technology, 2008

Brno

ABSTRAKT

Tato práce se zabývá teoretickým výpočtem zkratových proudů v elektrizační soustavě v souladu normou ČSN 60909-0 a především výpočtem dynamických a tepelných účinků zkratových proudů v rozvodnách VVN podle normy ČSN 60865-1. Dále se práce zabývá tvorbou programů pro simulaci mechanických účinků zkratových proudů s ohledem na dimenzování konstrukčních prvků rozvodny a praktickou simulací vybraných částí skutečné rozvodny typu "H" ve Slavkově u Brna.

KLÍČOVÁ SLOVA: zkrat; proud; napětí; impedance; nárazový zkratový proud; rázový zkratový proud; sousledná; zpětná; netočivá; tuhý vodič; ohebný vodič; VVN rozvodna

ABSTRACT

This thesis is engaged in a theoretical calculation of short-circuit currents in electric power system in compliance with the norm ČSN 60909-0 and first of all with calculation of dynamical and thermal effects of short-circuit currents in HV switching stations in accordance with the norm ČSN 60865-1.

Next the thesis is engaged in a production of programs for simulation of mechanical effects of short-circuit currents with respect to a dimensioning of constructional elements of switching station and afterwards in a practical simulation of selected parts of the real switching station type „H“ in Slavkov u Brna.

KEY WORDS:

short-circuit; current; tension; impedance; peak short-circuit current; surge short-circuit current; positive-sequence; negative-sequence; zero-sequence; solid conductor; flexible conductor; HV switching station

OBSAH

SEZNAM OBRÁZKŮ.....	13
SEZNAM TABULEK	14
SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK.....	15
1 ÚVOD	19
2 CHARAKTERISTIKA SOUČASNÉHO STAVU ŘEŠENÉ PROBLEMATIKY	20
3 CÍLE PRÁCE	21
4 TEORIE VZNIKU ZKRATŮ A JEJICH ROZDĚLENÍ	22
4.1 TEORIE VZNIKU ZKRATOVÝCH PROUDŮ	22
4.2 ROZDĚLENÍ ZKRATŮ	23
4.3 CHARAKTERISTICKÉ HODNOTY ZKRATOVÉHO PROUDU.....	24
4.4 ZÁKLADNÍ VELIČINY PRO DIMENZOVÁNÍ ELEKTRICKÝCH ZAŘÍZENÍ PROTI ÚČINKŮM ZKRATOVÝCH PROUDŮ	24
5 VÝPOČET ZKRATOVÝCH PROUDŮ	26
5.1 ZJEDNODUŠUJÍCÍ PŘEDPOKLADY VÝPOČTU:	26
5.2 MAXIMÁLNÍ A MINIMÁLNÍ ZKRATOVÉ PROUDY	26
5.2.1 MAXIMÁLNÍ ZKRATOVÉ PROUDY:	26
5.2.2 MINIMÁLNÍ ZKRATOVÉ PROUDY:.....	26
5.2.3 SYMETRICKÉ SLOŽKY	27
5.3 VÝPOČET POČÁTEČNÍHO SOUMĚRNÉHO RÁZOVÉHO ZKRAT. PROUDU I_k''	31
5.4 VÝPOČET NÁRAZOVÉ ZKRATOVÉHO PROUDU i_p	32
6 STANOVENÍ IMPEDANCE PORUCHOVÉ SMYČKY	34
6.1 SÍŤOVÉ NAPÁJEČE.....	34
6.2 SYNCHRONNÍ STROJE.....	35
6.2.1 GENERÁTORY PŘÍMO ZAPOJENÉ DO SOUSTAVY	35
6.2.2 SYNCHRONNÍ KOMPENZÁTORY, SYNCHRONNÍ MOTORY	36
6.3 TRANSFORMÁTORY.....	36
6.3.1 DVOJVINUŤOVÉ TRANSFORMÁTORY	36
6.3.2 TROJVINUŤOVÉ TRANSFORMÁTORY	37
6.3.3 KOREKČNÍ SOUČINITELE PRO IMPEDANCI DVOJ A TROJVINUŤOVÝCH SÍŤOVÝCH TRANSFORMÁTORŮ	39
6.3.4 VENKOVNÍ VEDENÍ A KABELY	40
6.3.5 TLUMIVKY	40
7 DIMENZOVÁNÍ PODLE DYNAMICKÝCH ÚČINKŮ ZKRATOVÝCH PROUDŮ.....	41
7.1 ELEKTROMAGNETICKÁ SÍLA.....	41
7.2 USPOŘÁDÁNÍ S TUHÝMI VODIČI	41
7.2.1 VÝPOČET NAMÁHÁNÍ TUHÝCH VODIČŮ	43
7.2.2 VÝPOČET SIL NA PODPĚRY TUHÝCH VODIČŮ	45

7.3 USPOŘÁDÁNÍ S OHEBNÝMI VODIČI	45
7.3.1 ÚČINKY NA HLAVNÍ VODIČ	46
7.4 KONSTRUKČNÍ ZATÍŽENÍ ZPŮSOBENÉ ELEKTROMAGNETICKÝMI ÚČINKY	50
7.5 TEPELNÉ ÚČINKY NA HOLÉ VODIČE A ELEKTRICKÁ ZAŘÍZENÍ	51
8 TVORBA PROGRAMŮ V MS EXCEL VISUAL BASIC	55
8.1 PROGRAM „LANA“	55
8.1.1 VSTUPNÍ HODNOTY	55
8.1.2 VÝSTUPNÍ HODNOTY	56
8.2 PROGRAM „TRUBKY“	56
8.2.1 VSTUPNÍ HODNOTY	56
8.2.2 VÝSTUPNÍ HODNOTY	57
9 PRAKTICKÁ SIMULACE ZKRATOVÝCH PROUDŮ	58
9.1 ROZVODNA VVN 110 kV SLAVKOV U BRNA	58
9.2 SIMULACE ÚČINKŮ ZKRATOVÝCH PROUDŮ NA TRUBKOVÉ PŘÍPOJNICE	58
9.2.1 PARAMETRY TRUBKOVÝCH PŘÍPOJNIC	59
9.2.2 VSTUPNÍ HODNOTY PRO VÝPOČET	59
9.2.3 VÝSTUPNÍ HODNOTY VÝPOČTU	59
9.2.4 ZHODNOCENÍ VÝSLEDKŮ	60
9.3 SIMULACE ÚČINKŮ ZKRATOVÝCH PROUDŮ NA ALFe LANA	60
9.3.1 PARAMETRY ALFe LANA	60
9.3.2 VSTUPNÍ HODNOTY PRO VÝPOČET	61
9.3.3 VÝSTUPNÍ HODNOTY VÝPOČTU	61
9.3.4 ZHODNOCENÍ VÝSLEDKŮ	61
10 ZÁVĚR	62
POUŽITÁ LITERATURA	63
PŘÍLOHA A MAXIMÁLNÍ MOŽNÉ HODNOTY (V_{σ}.VR), ($V_{\sigma S}$.VR), (V_F.VR)	64
PŘÍLOHA B PRŮŘEZOVÉ MODULY SLOŽENÝCH OBDÉLNÍKOVÝCH VODIČŮ	64
PŘÍLOHA C SOUČINITELÉ α, β, γ PRO RŮZNÉ USPOŘÁDÁNÍ PODPĚR	65
PŘÍLOHA D JEDNOPÓLOVÉ SCHÉMA ROZVODNY 110 KV	65
PŘÍLOHA E PŮDORYS TECHNOLOGIE R 110 KV	65
PŘÍLOHA F MONTÁŽNÍ ŘEZY TECHNOLOGIE	65

SEZNAM OBRÁZKŮ

<i>Obr. 4-1 Časový průběh zkratového proudu [1]</i>	24
<i>Obr. 5-1 Náhradní schémata pro složky symetrické soustavy [3]</i>	29
<i>Obr. 5-2 Sousední složka zkratové impedance [3]</i>	29
<i>Obr. 5-3 Zpětná složka zkratové impedance [3]</i>	30
<i>Obr. 5-4 Netočivá složka zkratové impedance [3]</i>	30
<i>Obr. 6-1 Trojvinutový transformátor a jeho náhradní schéma</i>	38
<i>Obr. 7-1 Součinitel k_{ls} pro výpočet účinné vzdálenosti vodiče [4]</i>	42
<i>Obr. 7-2 – Vztažná osa ohyb. namáhání pro různá uspořádání jednod. a vícenás. vodičů [4]</i>	43
<i>Obr. 7-3 Součinitel plasticity pro různé tvary vodičů [4]</i>	44
<i>Obr. 7-4 Součinitel ψ pro výpočet tahu ohebných vodičů [4]</i>	48
<i>Obr. 7-5 - Součinitel m – Tepelný účinek ss složky zkrat. proudu [4]</i>	51
<i>Obr. 7-6 – Součinitel n – Tepelný účinek střídavé složky zkrat. proudu [4]</i>	52
<i>Obr. 7-7a – Vztah mezi hustotou jmenovitého krátkodobého proudu ($T_{kr} = 1$ s) a teplotou vodiče (plné čáry: měď, přer. čáry: nízkolegovaná ocel) [4]</i>	52
<i>Obr. 7-7b – Vztah mezi hustotou jmenovitého krátkodobého proudu ($T_{kr} = 1$ s) a teplotou vodiče (hliník, slitina hliníku, ocelí vyztužený hliníkový vodič) [4]</i>	53
<i>Obr. 8-1 – Formulář „Vstupní hodnoty pro AlFe lana“</i>	55
<i>Obr. 8-2 – Formulář „Výsledky výpočtu AlFe lana“</i>	56
<i>Obr. 8-3 – Formulář vstupních hodnot programu „Trubky“</i>	56
<i>Obr. 8-4 – Formulář výstupních hodnot programu „Trubky“</i>	57
<i>Obr. 9-1 Ilustrační fotografie místa pro simulaci účinků trubkové přípojnice</i>	58
<i>Obr. 9-2 Vstupní hodnoty simulace</i>	59
<i>Obr. 9-3 Výstupní hodnoty simulace</i>	59
<i>Obr. 9-4 Ilustrační fotografie místa pro simulaci účinků na AlFe lana</i>	60
<i>Obr. 9-5 Vstupní hodnoty simulace</i>	61
<i>Obr. 9-6 Výstupní hodnoty simulace</i>	61

SEZNAM TABULEK

<i>Tab. 5-1 Hodnoty napěťového součinitele c [3]</i>	31
<i>Tab. 7-1 Doporučené nejvyšší teploty vodičů mech. namáhaných při zkratu [4]</i>	53
<i>Tab. 9-1 – Parametry trubkových přípojníc</i>	59
<i>Tab. 9-2 – Parametry AlFe lana</i>	60

SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK

A_s	Průřez dílčího vodiče	[m ²]
$\bar{a}$	Točivý operátor	[-]
a	Osová vzdálenost mezi hlavními vodiči	[m]
a_m	Účinná vzdálenost mezi hlavními vodiči	[m]
$a_{\min}$	Minimální vzdušná vzdálenost mezi vodiči	[m]
a_s	Účinná vzdálenost mezi dílčími vodiči	[m]
a_{1n}	Osová vzdálenost mezi dílčími vodiči 1 a n	[m]
a_{1s}	Osová vzdálenost mezi dílčími vodiči (stejně fáze)	[m]
b	Rozměr dílčího vodiče kolmého ke směru působení síly	[m]
b_c	Ekvivalentní statický průhyb vodiče ve středu rozpětí	[m]
b_h	Maximální horizontální výchylka	[m]
b_m	Rozměr hlavního vodiče kolmého ke směru působení síly	[m]
c	Napěťový součinitel	[-]
c_{th}	Součinitel tepelné roztažnosti vodiče (materiálová konstanta)	[-]
$\frac{c \cdot U_n}{\sqrt{3}}$	Efektivní hodnota napětí ekvivalentního zdroje	[kV]
C_D	Souč. změny průhybu oh. vodiče v důsl. jeho pruž. a oteplení	[-]
C_F	Souč. změny průhybu oh. vodiče v důsl. změny jeho tvaru	[-]
d	Rozměr dílčího vodiče ve směru působení síly	[m]
d_m	Rozměr hlavního vodiče ve směru působení síly	[m]
d_s	Průměr ohebného vodiče	[m]
E	Modul pružnosti v tahu	[N/m ²]
E_s	Skutečný modul pružnosti	[N/m ²]
f	Síťová frekvence	[Hz]
F	Síla mezi dvěma rovnoběžnými dlouhými vodiči při zkratu	[N]
F_d	Síla působící při zkratu na podpěry s tuhými vodiči	[N]
F_f	Tahová síla po zkratu	[N]
F_m	Síla mezi hlavními vodiči při zkratu	[N]

F_{m2}	Síla mezi hlavními vodiči při dvojfázovém zkratu	[N]
F_{m3}	Síla mezi hlavními vodiči při dvojfázovém zkratu	[N]
F_s	Síla mezi dílčími vodiči při zkratu	[N]
F_{st}	Statická síla tahu ohebného hlavního vodiče	[N]
F_t	Tah ohebného vodiče při zkratu	[N]
F'	Síla působící na jednotku délky ohebných hlavních vodičů	[N]
g_n	Normální tíhové zrychlení	[m/s ²]
I_b	Souměrný zkratový vypínací proud	[kA]
I_k	Ustálený zkratový proud	[kA]
I_k''	Počáteční souměrný rázový zkratový proud	[kA]
I_{th}	Ekvivalentní oteplovací zkratový proud	[kA]
i_{dc}	Stejnosměrná (aperiodická) složka zkratového proudu	[kA]
i_p	Nárazový zkratový proud	[kA]
J	Moment setrvačnosti plochy průřezu hl. vodiče	[m ⁴]
k	Počet sad rozpěrek nebo výztužných vložek	[-]
k_{1n}	Součinitel účinné vzd. mezi prvním a n-tým dílčím vodičem	[-]
k_{1s}	Součinitel účinné vzdálenosti mezi vodiči	[-]
K	Korekční součinitel pro impedance	[-]
l	Osová vzdálenost mezi podpěrnými body	[m]
l_c	Délka rozpětí ohebného vodiče	[m]
l_i	Délka izolačního závěsu	[m]
l_s	Osová vzdálenost mezi rozpěrkami nebo výztužnými vložkami	[m]
m	Činitel pro tepelné účinky ss složky zkratového proudu	[-]
m'	Hmotnost hlavního vodiče na jednotku délky	[kg/m]
m'_s	Hmotnost dílčího vodiče na jednotku délky	[kg/m]
N	Tuhost zařízení s ohebnými vodiči	[1/N]
n	Počet dílčích vodičů hlavního vodiče	[-]
n	Činitel pro tepelné účinky střídavé složky zkratového proudu	[-]
p	Počet pólových dvojic asynchronního motoru	[-]

p_g	Rozsah regulace napětí generátoru	[kV]
p_T	Rozsah regulace napětí transformátoru	[kV]
ΔP_{kT}	Jmenovité činné ztráty nakrátko transformátoru	[kW]
q	Součinitel plasticity průřezu vodiče	[-]
q_n	Jmenovitý průřez	[m ²]
R	Odpor	[Ω]
R_G	Odpor synchronního stroje	[Ω]
$R_{p0,2}$	Minimální hodnota meze průtažnosti materiálu	[N/m ²]
r	Poměr elmech. zatížení vodiče zk. silou k mech. zat. vlastní hm.	[-]
S	Výsledná pérová konstanta konc. bodů vodiče	[N/m]
S_k''	Počáteční souměrný nárazový zkratový výkon	[MVA]
t	Jmenovitý převod transformátoru	[-]
$t_{\min}$	Minimální čas vypnutí	[s]
T	Doba kmitu mechanického kmitání vodiče	[s]
T_k	Doba trvání zkratového proudu	[s]
T_{k1}	Doba trvání zkratového proudu do jeho prvního přerušení	[s]
T_{res}	Výsl. doba kmitu mech. kmitání vodiče během průchodu zkr. pr.	[s]
U_m	Nejvyšší sdružená efektivní hodnota napětí zařízení	[kV]
U_n	Jmenovité napětí soustavy	[kV]
u_k	Jmenovité procentní napětí nakrátko transformátoru	[%]
u_r	Činná složka napětí nakrátko transformátoru v procentech	[%]
u_x	Induktivní složka napětí nakrátko transformátoru v procentech	[%]
$U_{(1)}, U_{(2)}, U_{(0)}$	Sousledná, zpětná a netočivá složka napětí	[kV]
V_F	Poměr mezi dynamickou a statickou silou působící na podpěrky	[-]
V_r	Poměr mezi dyn. namáháním hl. vodiče při neúspěšném trojfázovém OZ a úspěšném OZ	[-]
V_{rs}	Poměr mezi dyn. namáháním dílčího vodiče při neúspěšném trojfázovém OZ a úspěšném OZ	[-]
V_σ	Poměr mezi dynamickým a statickým namáháním hl. vodiče	[-]

V_{σ}	Poměr mezi dyn. a stat. namáháním dílčího vodiče	[-]
X	Reaktance	[Ω]
X_d	Podélná synchronní reaktance	[Ω]
X_q	Příčná synchronní reaktance	[Ω]
Z	Průřezový modul hlavního vodiče	[m ³]
Z	Absolutní hodnota impedance	[Ω]
Z_s	Průřezový modul dílčího vodiče	[m ³]
z	Poměrná hodnota impedance	[-]
Z_k	Zkratová impedance třífázové střídavé soustavy	[Ω]
$Z_{(1)}, Z_{(2)}, Z_{(0)}$	Sousledná, zpětná a netočivá impedance zkratového obvodu	[Ω]
α	Součinitel pro výpočet síly na podpěru	[-]
β	Součinitel pro výpočet namáhání hlavního vodiče	[-]
δ_1	Úhel působení výsledné síly	[°]
δ_k	Úhel vychýlení na konci zkratu	[°]
δ_m	Maximální úhel vychýlení	[°]
ε_{ela}	Poměrné prodloužení vodiče vlivem jeho pružnosti	[-]
ε_{th}	Poměrné prodloužení vodiče vlivem jeho prodloužení při zkratu	[-]
ζ	Součinitel napjatosti ohebného hlavního vodiče	[-]
η	Účinnost asynchronního motoru	[-]
κ	Součinitel pro výpočet nárazového zkratového proudu	[-]
μ_0	Permeabilita vakua	[H/m]
ρ	Rezistivita	[$\Omega\text{mm}^2\text{m}^{-1}$]
σ_m	Ohybové napětí mezi hlavními vodiči	[N/m ²]
σ_s	Ohybové napětí mezi dílčími vodiči	[N/m ²]
σ_{tot}	Výsledné ohybové napětí vodiče	[N/m ²]
χ	Hodnota pro maximální úhel vychýlení	[-]
φ	Fázový úhel	[°]
φ, ψ	Součinitelé pro tahovou sílu v ohebném vodiči	[-]

1 ÚVOD

Rozvodna VVN je zařízení sloužící k rozvodu napětí 110kV, resp 220 kV. Kromě silového transformátoru VVN/VN je vybavena spínacími, měřicími a ochrannými prvky s vazbou na řídicí systém pro možnost dálkového ovládání, měření, signalizace a regulace, včetně chránění.

Rozvodny vvn projektované pro venkovní prostředí jsou osazeny technologií, která je schopna provozu ve venkovních klimatických podmínkách. Zpravidla se jedná o technologie izolované vzduchem nebo olejem (vypínače a přístrojové transformátory), kromě moderních vypínačů, přístrojových transformátorů a kompaktních zapouzdřených polí rozvoden izolovaných plynem SF₆.

Výstavba nových rozvoden VVN musí splňovat požadavky na bezpečný a spolehlivý provoz distribuční soustavy při respektování platných předpisů, norem včetně souvisejících změn a dodatků, energetického zákona 458/2000Sb. v platném znění, včetně platných podnikových norem PNE [7].

Základem pro bezpečný a spolehlivý provoz rozvodny velmi vysokého napětí je správný návrh jejich konstrukčních částí z hlediska dynamických účinků zkratových proudů, které namáhají zařízení při přechodných jevech v elektrizační soustavě s ohledem na co nejefektivnější využití zastavěného prostoru. Z toho vyplývá, že velmi důležitým předpokladem je znalost zkratových poměrů v dané síti, ze kterých se dále vychází.

Při výstavbě nových rozvoden VVN by měly být sledovány a respektovány vývojové trendy se zaměřením především na co nejmenší údržbovost a bezobslužný provoz technologie rozvoden.

2 CHARAKTERISTIKA SOUČASNÉHO STAVU ŘEŠENÉ PROBLEMATIKY

V současné době, kdy dochází k velkému přílivu zahraničních investorů do naší země narůstá poptávka po připojení jejich technologií do elektrizační soustavy. Nároky na dodávku elektrické energie stávající elektrizační soustava většinou nesplňuje, takže jediným východiskem je mnohdy pouze výstavba nové rozvodny přímo v místě spotřeby.

Dále dochází k modernizacím stávajících rozveden osazených zastaralou technologií, které jsou nahrazovány novými. Především se jedná o rozsáhlejší výměnu silové technologie a instalaci moderního systému řízení a chránění.

Provedení VVN rozveden může být řešeno dvěma způsoby, pro venkovní prostředí a pro vnitřní prostředí. Venkovní rozvodny je možné řešit klasickým uspořádáním v řadě (tzv. řadové rozvodny) nebo jako rozvodny ve tvaru „H“ (tzv. dvouřadé rozvodny s jedním systémem přípojníc s podélně dělenými odpojovači), pokud je k dispozici dostatek místa k výstavbě nové transformovny.

Další možností je rozšíření stávající venkovní řadové rozvodny i rozvodny typu „H“ o nová pole či využití stávajících provozních nebo prostorových rezervních polí rozveden.

Další variantou pro venkovní prostředí je výstavba kompaktních polí VVN na společném základu v klasickém či zapouzdřeném provedení s izolací SF6. Tato varianta se připouští v případě výstavby nových transformoven s ohledem na malé prostorové rezervy.

Rozvodny VVN pro vnitřní prostředí bývají řešeny v zapouzdřeném provedení s izolací plynem SF6.

Každé technické řešení výstavby nové rozvodny VVN tzv. „na zelené louce“ musí jednoznačně podléhat technicko-ekonomickému zhodnocení dle platných metodik při respektování potřeb a technických možností sítě VVN [7].

3 CÍLE PRÁCE

Tato práce si klade za cíl teoreticky popsat metodiku výpočtu zkratových proudů a především metodiku výpočtu mechanických účinků zkratových proudů, které působí svými silami na přípojnice rozvoden.

Dále je cílem na základě teoreticky zpracovaných podkladů vytvořit programy, které budou určeny pro simulaci mechanických účinků zkratových proudů na přípojnice rozvodny VVN. Programy mají být vytvořeny v prostředí MS Excel a Visual Basic a mají být určeny pro přípojnice, které jsou řešeny pomocí trubek z materiálu AlMgSi a také pomocí AlFe lan. Pro simulaci bude sloužit jako model reálná rozvodna VVN typu „H“ 110/22 kV ve Slavkově u Brna, u které byla dokončena rekonstrukce v roce 2007 provedená firmou JM montáže.

V další části půjde o ověření realizované technologie rozvodny podle vytvořených programů a zhodnocení zkratové odolnosti této rozvodny.

4 TEORIE VZNIKU ZKRATŮ A JEJICH ROZDĚLENÍ

4.1 Teorie vzniku zkratových proudů

Zkratky řadíme mezi elektromagnetické přechodné děje, které zkoumáme jako časové závislosti a elektrizační soustavu (ES) modelujeme jako systém se soustředěnými parametry. Patří sem jevy trvající řádově 10^{-1} s. Vzhledem k menší rychlosti přechodného děje je můžeme zanedbat konečnou rychlost šíření elektromagnetických vln ve všech prvcích ES. Zanedbávají se také změny otáček točících se soustrojí a při výpočtu uvažujeme úhlové rychlosti soustrojí za konstantní. O výpočtech zkratových proudů pojednává norma ČSN EN 60909.

Zkratem se rozumí náhodné nebo úmyslné vodivé spojení mezi dvěma nebo více vodivými částmi vedoucí k tomu, že rozdíl elektrických potenciálů mezi těmito vodivými částmi se rovná nule nebo má hodnotu blízkou nule. V místě zkratu dochází k poklesu napětí, přičemž do místa poruchy tečou zkratové proudy ze všech zdrojů soustavy, v závislosti na jejich výkonech a elektrické vzdálenosti od místa poruchy. Úbytky napětí rostou od místa zkratu směrem ke zdrojům, a proto pokles napětí se může projevit prakticky v celé ES. Z hlediska účinků proudů je nejvíc ohroženo místo zkratu, kterým protéká výsledný zkratový proud.

Hlavní příčiny vzniku zkratu jsou:

- snížení kvality izolace způsobená přepětím, stárnutím atd.;
- poruchy elektrických zařízení – popraskání izolátorů, znečištěním a opálením kontaktů, vadnou montáží atd.;
- nedostatečné dimenzování na tepelné a dynamické namáhání;
- cizí zásahy – při stavebních a montážních pracích
- chybná manipulace – hlavně s odpojovači, při spínání dvou nesynchronizovaných sítí

Všeobecně jsou nejčastější příčinou zkratů přepětí – kromě atmosferických (přímým úderem blesku do vedení nebo elektrostatickou indukcí) i provozní přepětí [1]. Ty se vyskytují hlavně při:

- spínacích pochodech;
- při zemních spojeních;
- při náhlé ztrátě zatížení atd.

Uvedené příčiny nemusí působit jednotlivě, ale často se vyskytují součastně nebo jako následek jedné z nich.

Nepříznivé účinky zkratových proudů zahrnují:

- nadměrné mechanické namáhání část zařízení;
- nadměrné oteplení zařízení;
- možné porušení synchronismu paralelně pracujících soustav;
- omezují možnost přerušení proudu vypínači;
- narušení normálního chodu spotřebičů, hlavně motorů;
- rušení sdělovacích cest;
- poruchy izolace přepětím.

Nepříznivé účinky zkratových proudů jsou o to vážnější, že se často projevují současně. Nejčastěji sledované jsou mechanické a tepelné účinky, které můžeme omezit správným dimenzováním elektrických zařízení. Pokles napětí v důsledku zkratu má vliv na světelné zdroje, na tepelné spotřebiče, ale hlavně ohrožuje provoz motorů. Náhlá změna zatížení v důsledku zkratu může vážně ohrozit stabilitu přenosu elektrické energie [1].

S cílem minimalizace důsledků takových poruch musí být zkrat odpojený co nejrychleji od zbytku ES. Tuto funkci v rozvodech nn plní jističe a pojistky, ve vn sítích pojistky a ochrany a v sítích vvn a zvn pouze ochrany. Po identifikaci poruchy dává ochrana svým akčním členem povel na vypínací cívku výkonového vypínače, který svými hlavními kontakty přeruší tok poruchového proudu [1].

4.2 Rozdělení zkratů

Pro rozlišení zkratů a zemních spojení je rozhodující způsob provozování elektrické sítě, ve které porucha vznikla (izolované, s uzemněným uzlem, s uzlem uzemněným přes impedanci).

Zkraty rozlišujeme:

- kovové (dokonalé) – se zanedbatelnou impedancí v místě poruchy;
- nekovové (nedokonalé) – vytvořené přes impedanci, kterou není možno zanedbat (např. oblouk).

Podle počtu spojených fází a jejich způsobu spojení se zemí rozlišujeme zkraty:

- třífázové – současné spojení všech tří fází v jednom místě soustavy;
- dvoufázové – spojení dvou fází;
- dvoufázové zemní – spojení dvou fází kombinované se zemním spojením;
- jednofázové – spojení jedné fáze se zemí.

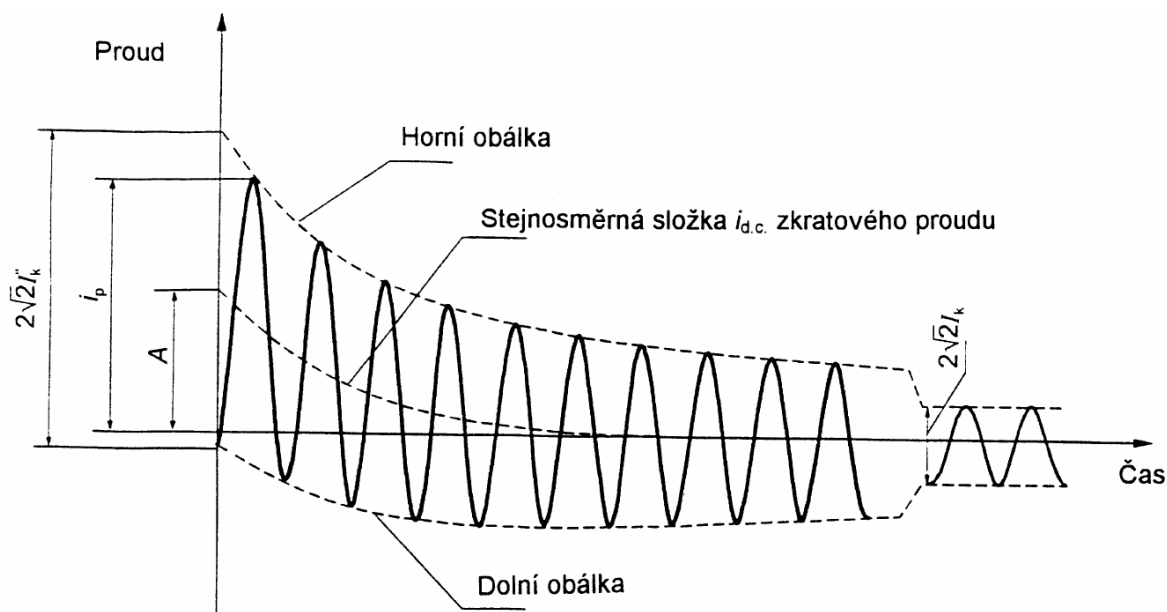
Dále rozlišujeme zkraty:

- souměrné – postihující stejnou mírou všechny fáze;
- nesouměrné – postihující jen některé fáze.

Norma ČSN EN 60909 rozeznává vzdálený a blízký zkrat:

- elektricky vzdálený zkrat je zkrat, při kterém velikost souměrné složky předpokládaného zkratového proudu zůstává v podstatě konstantní;
- elektricky blízký zkrat je zkrat, při kterém příspěvek alespoň jednoho stroje k předpokládanému počátečnímu souměrnému rázovému proudu překračuje dvojnásobek jmenovitého proudu stroje, nebo zkrat při kterém příspěvek asynchronních motorů překračuje 5% počátečního souměrného rázového zkratového proudu I_k'' bez motorů [3].

4.3 Charakteristické hodnoty zkratového proudu



Obr. 4-1 Časový průběh zkratového proudu [1]

Mezi charakteristické hodnoty zkratového proudu (Obr. 4-1) patří souměrný zkratový proud I_{ks} , počáteční rázový zkratový proud I_k'' , ustálený zkratový proud I_k , nesouměrný zkratový proud I_{kns} , stejnosměrná složka zkratového proudu $i_{d.c.}$, nárazový zkratový proud i_p , souměrný vypínací zkratový proud I_b , ekvivalentní oteplovací zkratový proud I_{th} , počáteční hodnota stejnosměrné složky zkratového proudu A .

Kompletní výpočet zkratových proudů určuje proudy jako funkce času po celou dobu trvání zkratu. Podle použití výsledků nás nejčastěji zajímá efektivní hodnota souměrné střídavé složky I_k'' a nárazový zkratový proud i_p [1].

$$i_p = \kappa \sqrt{2} I_k'' \quad (\text{kA}; -, \text{kA}) \quad (4.1)$$

Součinitel κ závisí na poměru R/X a platí:

$$\kappa = 1,02 + 0,98e^{-3\frac{R}{X}} \quad (-; \Omega, \Omega) \quad (4.2)$$

4.4 Základní veličiny pro dimenzování elektrických zařízení proti účinkům zkratových proudů

Ve většině praktických příkladů není kompletní výpočet zkratových proudů potřebný. Pro potřeby praxe byly zavedeny následující pojmy [1]:

Počáteční souměrný zkratový proud I_k'' - efektivní hodnota střídavé složky předpokládaného zkratového proudu v okamžiku vzniku zkratu, při konstantní impedanci.

Nárazový zkratový proud i_p - maximální možná okamžitá hodnota předpokládaného zkratového proudu. Jeho velikost závisí na okamžiku, v kterém zkrat vznikl. Jde o důležitou hodnotu zkratového proudu z hlediska dimenzování elektrických zařízení na silové účinky zkratových proudů. Výrobci elektrických zařízení udávají tzv. dynamický zkratový proud I_{dyn} jako proudový náraz při zkratu, kterému jejich zařízení bezpečně odolávají. Proto z hlediska dimenzování elektrických zařízení proti silovým účinkům musí každé zařízení splňovat podmínku:

$$i_p \leq I_{dyn} \quad (4.3)$$

Z průběhů (Obr. 4-1) je vidět, že nárazový zkratový proud je vrcholová hodnota první amplitudy zkratového proudu při největší aperiodické složce. Aperiodická složka dosáhne maxima, když zkrat nastane v okamžiku přechodu napětí nulou a úhel mezi proudem a napětím po dobu zkratu je 90° . Těmto podmínkám odpovídá čas maxima první amplitudy (pro $f = 50$ Hz) 10 ms.

Ekvivalentní oteplovací zkratový proud I_{th,T_k} - je efektivní hodnota proudu, který má stejné tepelné účinky a čas trvání T_k jako skutečný zkratový proud, který může obsahovat stejnosměrnou složku a s časem se mění. Je důležitý pro dimenzování elektrických zařízení z hlediska tepelných účinků zkratových proudů. Výrobci elektrických zařízení udávají jmenovitý krátkodobý proud $I_{thr,T_{kr}}$, který určuje jakým skutečným proudem je možné jejich zařízení po dobu zkratu zatížit, aniž by došlo k poškození tohoto zařízení.

$$I_{th,T_k} \leq I_{thr,T_{kr}} \text{ pro } T_k \leq T_{kr} \quad (4.4)$$

kde T_{kr} je jmenovitá doba trvání zkratu.

$$I_{th,T_k} = I_k'' \sqrt{m+n} \quad (4.5)$$

kde

m je součinitel pro časově závislý tepelný účinek stejnosměrné složky zkratového proudu;

n je součinitel pro časově závislý tepelný účinek střídavé složky zkratového proudu.

Vypínací zkratový proud I_{bns,T_k} - udává velikost nesymetrického zkratového proudu v okamžiku vypínání zkratu v čase T_k . Rozlišujeme střídavou složku vypínacího zkratového proudu I_b a stejnosměrnou složku vypínacího zkratového proudu I_{bdc} . Z hlediska výkonových vypínačů je rozhodující údaj výrobce, tzv. jmenovitý vypínací proud I_{nvyp} , který udává maximální zkratový proud, který vypínací zařízení bezpečně vypne a mělo by platit:

$$I_b \leq I_{nvyp} \quad (4.6)$$

5 VÝPOČET ZKRATOVÝCH PROUDŮ

5.1 Zjednodušující předpoklady výpočtu:

Výpočet maximálních a minimálních zkratových proudů podle normy ČSN EN 60909 vychází z následujícího zjednodušení [3]:

- Po dobu trvání zkratu se nemění typ zkratu.
- Po dobu trvání zkratu se nemění zapojení obvodu.
- Impedance transformátorů se počítají pro případ, že přepínače odboček jsou zapojeny v základní poloze.
- Odpory oblouku se neuvažují.
- Všechny kapacity vedení, paralelní admitance a netočivé statické zátěže se zanedbávají, kromě paralelních admitancí v netočivé soustavě.

5.2 Maximální a minimální zkratové proudy

5.2.1 Maximální zkratové proudy:

Při výpočtu maximálních zkratových proudů je třeba volit tyto podmínky [1]:

- volí se napěťový součinitel $c_{\max}$ (tab. 5-1);
- vybírá se konfigurace soustavy a maximální příspěvky od elektráren a síťových napáječů tak, aby vedli k maximální hodnotě zkratového proudu v místě zkratu;
- pokud se použije ekvivalentní impedance Z_Q reprezentující nadřazenou soustavu, musí se použít minimální ekvivalentní zkratová impedance, která odpovídá maximálnímu příspěvku zkratových proudů od síťových napáječů;
- musí být do výpočtu zahrnuté příspěvky motorů ;
- uvažují se odpory vedení při teplotě 20 °C.

5.2.2 Minimální zkratové proudy:

Při výpočtu minimálních zkratových proudů je potřeba volit následující podmínky [1]:

- volí se napěťový součinitel $c_{\min}$ (tab. 5-1);
- vybírá se konfigurace soustavy a minimální příspěvky od elektráren a síťových napáječů tak, aby vedli k minimální hodnotě zkratového proudu v místě zkratu;
- motory se musí zanedbat;
- odpory vedení se musí uvažovat při nejvyšší teplotě.

Pokud se počítají zkratové proudy v soustavách s rozdílnými napěťovými hladinami, je potřeba přepočítat impedance jednotlivých prvků na jednu napěťovou hladinu. Bývá to obvykle napětí v místě zkratu.

5.2.3 Symetrické složky

Nesouměrná trojfázová soustava je rozložena do tří symetrických složkových soustav:

- netočivá soustava - tři fázory se stejnými moduly a nulovým fázovým posuvem;
- sousledná soustava - tři fázory se stejnými moduly a fázovým posuvem 120° v kladném směru;
- zpětná soustava - tři fázory se stejnými moduly a fázovým posuvem 120° v záporném směru.

Transformace je definována následujícím vztahem:

$$[\overline{U}_f] = [\overline{A}] \cdot [\overline{U}_s] \quad (5.1)$$

kde nesymetrická soustava fázorů $\overline{U}_f$ a symetrická soustava fázorů $\overline{U}_s$ má tvar:

$$\overline{U}_f = \begin{bmatrix} \overline{U}_A \\ \overline{U}_B \\ \overline{U}_C \end{bmatrix} \quad \overline{U}_s = \begin{bmatrix} \overline{U}_{(0)} \\ \overline{U}_{(1)} \\ \overline{U}_{(2)} \end{bmatrix} \quad (5.2)$$

a transformační matice $\overline{A}$ má tvar:

$$[\overline{A}] = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & \overline{a}^2 & \overline{a} \\ 1 & \overline{a} & \overline{a}^2 \end{bmatrix} \quad (5.3)$$

Po dosazení (5.2) a (5.3) do (5.1) dostaneme:

$$\begin{bmatrix} \overline{U}_A \\ \overline{U}_B \\ \overline{U}_C \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & \overline{a}^2 & \overline{a} \\ 1 & \overline{a} & \overline{a}^2 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \overline{U}_{(0)} \\ \overline{U}_{(1)} \\ \overline{U}_{(2)} \end{bmatrix} \quad (5.4)$$

kde:

$$\overline{a} = 1 \angle 120^\circ = -\frac{1}{2} + j \frac{\sqrt{3}}{2} ; \overline{a}^2 = 1 \angle 240^\circ = -\frac{1}{2} - j \frac{\sqrt{3}}{2} \quad (5.5)$$

Po převedení maticové rovnice (5.4) na soustavu 3 rovnic o 3 neznámých:

$$\begin{aligned}\bar{U}_A &= \bar{U}_{(0)} + \bar{U}_{(1)} + \bar{U}_{(2)} \\ \bar{U}_B &= \bar{U}_{(0)} + \bar{a}^2 \bar{U}_{(1)} + \bar{a} \bar{U}_{(2)} \\ \bar{U}_C &= \bar{U}_{(0)} + \bar{a} \bar{U}_{(1)} + \bar{a}^2 \bar{U}_{(2)}\end{aligned}\quad (5.6)$$

Symetrické složky fázorů napětí $\bar{U}_s$ při známých fázorech napětí nesymetrické soustavy $\bar{U}_f$ vypočítáme podle maticové rovnice:

$$[\bar{U}_s] = [\bar{A}]^{-1} \cdot [\bar{U}_f] \quad (5.7)$$

Inverzní transformační matice má tvar:

$$[\bar{A}]^{-1} = \frac{1}{3} \cdot \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & \bar{a} & \bar{a}^2 \\ 1 & \bar{a}^2 & \bar{a} \end{bmatrix} \quad (5.8)$$

Po dosazení rovnic (5.2) a (5.8) do (5.7) dostaneme:

$$\begin{bmatrix} \bar{U}_{(0)} \\ \bar{U}_{(1)} \\ \bar{U}_{(2)} \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & \bar{a} & \bar{a}^2 \\ 1 & \bar{a}^2 & \bar{a} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \bar{U}_A \\ \bar{U}_B \\ \bar{U}_C \end{bmatrix} \quad (5.9)$$

Po převedení maticové rovnice (5.9) na soustavu 3 rovnic o 3 neznámých dostaneme:

$$\begin{aligned}\bar{U}_{(0)} &= \frac{1}{3} (\bar{U}_A + \bar{U}_B + \bar{U}_C) \\ \bar{U}_{(1)} &= \frac{1}{3} (\bar{U}_A + \bar{a} \bar{U}_B + \bar{a}^2 \bar{U}_C) \\ \bar{U}_{(2)} &= \frac{1}{3} (\bar{U}_A + \bar{a}^2 \bar{U}_B + \bar{a} \bar{U}_C)\end{aligned}\quad (5.10)$$

Velikost zkratových proudů vypočítáme na pomoci vhodného matematického modelu. Tento model spočívá v náhradě třífázové soustavy soustavou jednofázovou, přičemž je třeba provést rozklad nesymetrické soustavy, která vznikla zkratem na tři symetrické soustavy. Pro tento rozklad platí rovnice:

$$\begin{aligned}\bar{E}_{(1)} &= \bar{I}_{(1)} \cdot \bar{Z}_{(1)} + \bar{U}_{(1)} \\ \bar{E}_{(2)} &= \bar{I}_{(2)} \cdot \bar{Z}_{(2)} + \bar{U}_{(2)} \\ \bar{E}_{(0)} &= \bar{I}_{(0)} \cdot \bar{Z}_{(0)} + \bar{U}_{(0)}\end{aligned}\quad (5.11)$$

kde:

$\bar{E}_{(1)}, \bar{E}_{(2)}, \bar{E}_{(0)}$ jsou napětí symetrických složek náhradního zdroje;

$\bar{U}_{(1)}, \bar{U}_{(2)}, \bar{U}_{(0)}$ jsou napětí v místě zkratu;

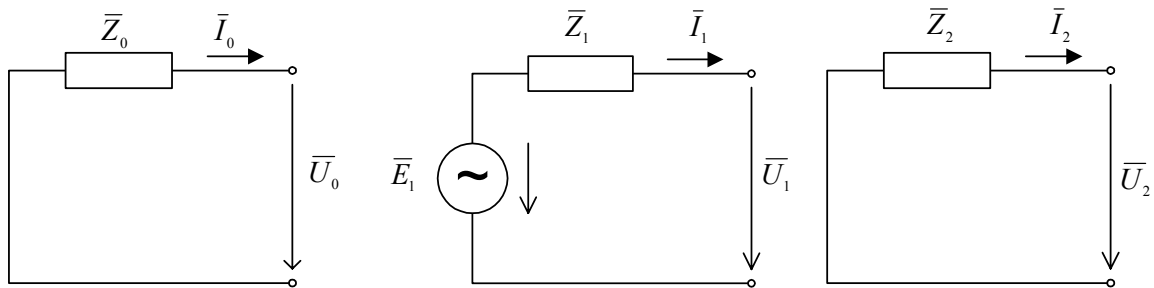
$\bar{Z}_{(1)}, \bar{Z}_{(2)}, \bar{Z}_{(0)}$ jsou symetrické složky výsledných impedancí k místu zkratu;

$\bar{I}_{(1)}, \bar{I}_{(2)}, \bar{I}_{(0)}$ jsou symetrické složky zkratového proudu.

Výsledný stav poruchy po vyřešení jednotlivých symetrických složek napětí a proudů získáme zpětnou úpravou na třífázovou nesymetrickou soustavu pomocí rovnic (5.6).

Výše uvedené rovnice se zjednodušují, protože reálné zdroje napětí fází sousledné složky jsou vždy symetrické a hodnoty zpětné a netočivé složky jsou nulové, tedy platí $\bar{E}_{(2)} = \bar{E}_{(0)} = 0$.

Na základě toho můžeme vytvořit tři složkové náhradní obvody pro řešení zkratů (Obr. 5-1).

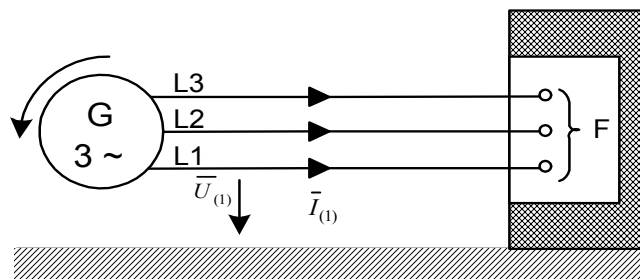


Obr. 5-1 Náhradní schémata pro složky symetrické soustavy [3]

Vzájemným propojením těchto samostatných obvodů získáme náhradní schémata pro jednotlivé typy zkratů. Složkové impedance prvků se určí při napájení jednotlivých prvků zdroji se souslednou, zpětnou a netočivou soustavou napětí (Obr. 5-2, 5-3 a 5-4).

Souslednou zkrat. impedanci $\bar{Z}_{(1)}$ v místě zkratu F určíme (Obr. 5-2), když souměrnou soustavu napětí sousledné složky přiložíme do místa zkratu F.

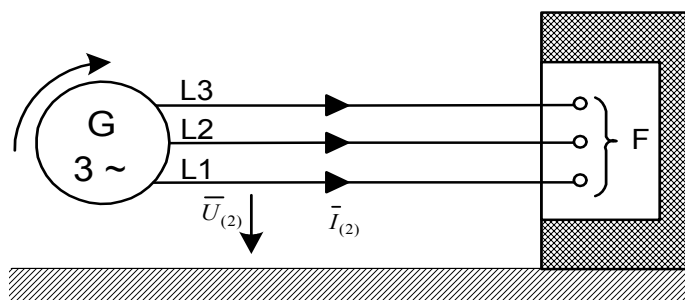
$$\bar{Z}_{(1)} = \frac{\bar{U}_{(1)}}{\bar{I}_{(1)}} \quad (5.12)$$



Obr. 5-2 Sousledná složka zkratové impedance [3]

Zpětnou zkratovou impedanci $\bar{Z}_2$ v místě zkratu F určíme (Obr. 5-3), když souměrnou soustavu napětí zpětné složky přiložíme do místa zkratu F.

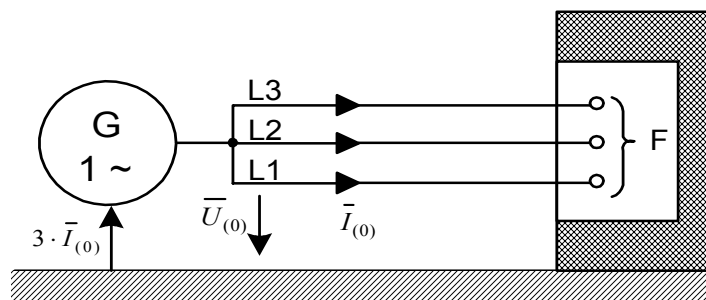
$$\bar{Z}_{(2)} = \frac{\bar{U}_{(2)}}{\bar{I}_{(2)}} \quad (5.23)$$



Obr. 5-3 Zpětná složka zkratové impedance [3]

Netočivou zkratovou impedanci $\bar{Z}_0$ v místě zkratu F určíme (Obr. 5-4), když přiložíme střídavé napětí mezi 3 zkratované fáze a společné zpětné vedení.

$$\bar{Z}_{(0)} = \frac{\bar{U}_{(0)}}{\bar{I}_{(0)}} \quad (5.34)$$



Obr. 5-4 Netočivá složka zkratové impedance [3]

Zpětný vodič se při sousledné a zpětné složce neuplatňuje, v netočivé soustavě je jeho existence podmínkou uzavření proudového obvodu. Teče jím trojnásobek netočivé složky proudu $\bar{I}_0$, proto úbytek napětí na něm je $3 \cdot \bar{I}_0 \cdot \bar{Z}_N$, kde $\bar{Z}_N$ je jeho impedance. Je to stejná hodnota jako úbytek napětí na impedanci s hodnotou $3 \cdot \bar{Z}_N$, protékané proudem $\bar{I}_{(0)}$. Proto se impedance $\bar{Z}_N$ v netočivé složkové soustavě uplatňuje s trojnásobnou hodnotou [1].

Metoda a postup výpočtu

Principiálně existují dvě metody výpočtu počátečního souměrného zkratového proudu:

- metoda superpozice;
- metoda ekvivalentního napěťového zdroje v místě zkratu

Superpoziční metoda dává zkratový proud ve vztahu jen k jednomu předpokládanému stavu zatížení sítě, proto nemusí vést k maximálnímu zkratovému proudu. Z tohoto důvodu byla vyvinutá metoda pro měnící se provozní podmínky, která vede k maximálnímu zkratovému proudu. Princip této metody použité v normě ČSN EN 60909 spočívá v zavedení ekvivalentního napěťového zdroje v místě zkratu. Tento napěťový zdroj $\frac{c \cdot U_n}{\sqrt{3}}$ v místě zkratu je jediným

aktivním napětím soustavy. Všechny napájecí body sítě, synchronní stroje a asynchronní motory jsou zkratované za svými vnitřními (rázovými reaktancemi). Všechny paralelní kapacity a admitance (zátěže) kromě kapacit a admitancí motorů se v sousledné a zpětné složce zanedbávají. Kapacity v netočivém složkovém systému se musí brát v úvahu (zanedbávají se v sítích nn a vn účinně uzemněných) [1].

Pro potřeby této výpočtové metody byl zaveden napěťový součinitel c (Tab. 5-1). Udává poměr mezi napětím ekvivalentního napěťového zdroje a jmenovitým napětím sítě $U_n / \sqrt{3}$.

Tab. 5-1 Hodnoty napěťového součinitele c [3]

Jmenovité napětí U_n	Napěťový součinitel c pro výpočet	
	Maximálních zkratových proudů $C_{\max}$	Minimálních zkratových proudů $C_{\min}$
Nízké napětí 100 V až 1000 V	1,05 1,10	0,95
Vysoké napětí 1 kV až 35 kV	1,10	1,00
VVN >35 kV		

Výpočtová metoda s ekvivalentním napěťovým zdrojem v místě zkratu je přibližnou metodou bez zohledňování speciálních podmínek provozu sítě. Záměrem této metody je najít maximální zkratové proudy s dostatečnou přesností, s ohledem na bezpečnost a ekonomiku [1]. Výpočet se může provést dvěma způsoby:

-ve skutečných hodnotách – celý výpočet probíhá ve skutečných fyzikálních veličinách a veličiny se označují velkými písmeny;

- v poměrných hodnotách – veličiny se počítají v poměrných hodnotách. Přepočet na tyto poměrné hodnoty se provádí pomocí vztažných hodnot (U_v , S_v). Veličiny se označují malými písmeny.

5.3 Výpočet počátečního souměrného rázového zkrat. proudu I_k''

Pro častý případ, při kterém je $\bar{Z}_0$ větší než $\bar{Z}_{(1)} = \bar{Z}_{(2)}$, se vyskytne nejvyšší počáteční zkratový proud při třífázovém zkratu. V případě zkratu v blízkosti transformátoru s uzemněným uzlem nebo uzemňovacím transformátorem může být jednofázový zkrat větší než třífázový. Pro zkraty v blízkosti transformátorů s nízkou hodnotou netočivé složky impedance je nejvyšší počáteční zkratový proud při dvoufázovém zemním zkratu [1].

Třífázový zkrat:

$$I_k'' = \frac{c \cdot U_n}{\sqrt{3} \cdot Z_k} \quad (5.15)$$

Dvoufázový zkrat:

$$I_{k2}'' = \frac{c \cdot U_n}{|\bar{Z}_{(1)} + \bar{Z}_{(2)}|} = \frac{c \cdot U}{2 \cdot |\bar{Z}_{(1)}|} = \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot I_k'' \quad (5.16)$$

Dvoufázový zemní zkrat:

Pro zkratové proudy tekoucí ve fázích platí:

$$I_{k2EL2}'' = -j \cdot c \cdot U_n \cdot \frac{\bar{Z}_{(0)} - \bar{a} \cdot \bar{Z}_{(2)}}{\bar{Z}_{(1)} \cdot \bar{Z}_{(2)} + \bar{Z}_{(1)} \cdot \bar{Z}_{(0)} + \bar{Z}_{(2)} \cdot \bar{Z}_{(0)}} \quad (5.17)$$

$$I_{k2EL3}'' = j \cdot c \cdot U_n \cdot \frac{\bar{Z}_{(0)} - \bar{a}^2 \cdot \bar{Z}_{(2)}}{\bar{Z}_{(1)} \cdot \bar{Z}_{(2)} + \bar{Z}_{(1)} \cdot \bar{Z}_{(0)} + \bar{Z}_{(2)} \cdot \bar{Z}_{(0)}} \quad (5.18)$$

Pro zkratový proud tekoucí zemí platí vztah:

$$I_{kE2E}'' = \frac{\sqrt{3} \cdot c \cdot U_n \cdot \bar{Z}_{(2)}}{\bar{Z}_{(1)} \cdot \bar{Z}_{(2)} + \bar{Z}_{(1)} \cdot \bar{Z}_{(0)} + \bar{Z}_{(2)} \cdot \bar{Z}_{(0)}} \quad (5.19)$$

Jednofázový zkrat

Počáteční rázový zkratový proud při jednofázovém zkratu:

$$I_{k1}'' = \frac{\sqrt{3} \cdot c \cdot U_n}{|\bar{Z}_{(1)} + \bar{Z}_{(2)} + \bar{Z}_{(0)}|} \quad (5.20)$$

Pro elektricky vzdálený zkrat s $\bar{Z}_{(2)} = \bar{Z}_{(1)}$ platí:

$$I_{k1}'' = \frac{\sqrt{3} \cdot c \cdot U_n}{|2 \cdot \bar{Z}_{(1)} + \bar{Z}_{(0)}|} \quad (5.21)$$

Pokud je $\bar{Z}_{(0)}$ menší než $\bar{Z}_{(1)} = \bar{Z}_{(2)}$ je počáteční rázový zkratový proud při jednofázovém zkratu I_{k1}'' větší než třífázový I_{k3}'' , ale menší než I_{kE2E}'' . Proud I_{k1}'' však bude největším proudem, který bude vypnutý vypínačem, pokud: $1,0 > Z_{(0)} / Z_{(1)} > 0,23$ [1].

5.4 Výpočet nárazové zkratového proudu i_p **Třífázový zkrat**

Pro třífázové zkraty napájené z jednoduchých sítí nebo radiálních sítí se příspěvek nárazového zkratového proudu z každé větve může vyjádřit [3]:

$$i_p = \kappa \cdot \sqrt{2} \cdot I_{k3}'' \quad (5.22)$$

Součinitel κ pro poměr R/X nebo X/R se určí z grafu nebo výpočtem:

$$i_p = 1,02 + 0,98 \cdot e^{-3R/X} \quad (5.23)$$

Rovnice (5.22) a (5.23) předpokládají, že zkrat vznikne při přechodu napětí nulou a že i_p se dosáhne přibližně po polovině první periody [1].

Dvoufázový zkrat

Pro dvoufázový zkrat se nárazový zkratový proud vypočítá:

$$i_{p2} = \kappa \cdot \sqrt{2} \cdot I_{k2}'' \quad (5.24)$$

Pro zjednodušení je dovolené použít stejné hodnoty κ jako pro třífázový zkrat. Pokud platí, že při $\bar{Z}_{(1)} = \bar{Z}_{(2)}$ je nárazový zkratový proud i_{p2} menší než nárazový zkratový proud při třífázovém zkratu [1].

$$i_{p2} = \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot i_{p3} \quad (5.25)$$

Dvoufázový zemní zkrat

Pro případ dvoufázového zemního zkratu platí pro nárazový zkratový proud:

$$i_{p2E} = \kappa \cdot \sqrt{2} \cdot I_{k2E}'' \quad (5.26)$$

Pro zjednodušení je dovolené použít stejné hodnoty κ jako pro třífázový zkrat. Výpočet i_{p2E} je nevyhnutelný pouze když je $\bar{Z}_{(0)}$ o dost menší než $\bar{Z}_{(1)}$ (menší než $\frac{1}{4} \bar{Z}_{(1)}$).

Jednofázový zkrat

Pro jednofázový zkrat se nárazový zkratový proud vypočítá:

$$i_{p1} = \kappa \cdot \sqrt{2} \cdot I_{k1}'' \quad (5.27)$$

Pro zjednodušení je dovolené použít stejné hodnoty κ jako pro třífázový zkrat.

6 STANOVENÍ IMPEDANCE PORUCHOVÉ SMYČKY

Pokud prvek ES neobsahuje žádné magnetické vazby svých obvodů, potom jeho impedance nezávisí na sledu fází připojeného napětí. Pro symetrické složky impedance platí $\bar{Z}_{(0)} = \bar{Z}_{(1)} = \bar{Z}_{(2)}$.

Pokud prvek obsahuje magnetické vazby obvodů, přičemž se obvody vůči sobě nepohybují, bude se sousledná složka rovnat zpětné, tedy $\bar{Z}_{(1)} = \bar{Z}_{(2)}$.

Netočivá složka závisí na zapojení a konstrukci daného prvku. Pro uplatnění netočivé složky je podstatné spojení prvků se zemí.

U síťových napáječů, transformátorů, venkovních vedení, kabelů a reaktorů a pod. jsou sousledná a zpětná složka stejné.

Impedance generátorů, síťových transformátorů a elektrárenských bloků se musí vynásobit impedančními korekčními součiniteli (K_G, K_T, K_S nebo K_{S0}), pokud se zkratové proudy počítají podle normy ČSN EN 60909 [1].

6.1 Síťové napáječe

Ve výpočtech je často třeba ES nebo její část nahradit jediným zdrojem. Tento zdroj je označován podle normy ČSN EN 60909 jako síťový napáječ. Teoreticky by měla mít tvrdá síť nekonečně velký výkon, nulovou impedanci, konstantní napětí na svorkách a nekonečně velkou rozběhovou konstantu. V praxi ale taková síť neexistuje, a proto ji nahrazujeme příslušnou zkratovou impedancí.

Pokud je třífázový zkrat napájený ze sítě o známém počátečním souměrném zkratovém proudu I''_{kQ} v bodu připojení zátěže Q, potom ekvivalentní zkratová impedance se určí podle vztahu:

$$Z_{(1)Q} = \frac{c \cdot U_{nQ}}{\sqrt{3} \cdot I''_{kQ3}} \quad (\Omega; -, \text{ kV}, \text{ kA}) \quad (6.1)$$

kde:

U_{nQ} je jmenovité napětí soustavy v bodě připojení napáječe Q;

I''_{kQ3} je počáteční souměrný rázový zkratový proud pro třífázový zkrat v bodě připojení napáječe Q;

c je napěťový součinitel.

Zpětná složka zkratové impedance síťového napáječe se rovná sousledné $\bar{Z}_{(1)Q} = \bar{Z}_{(2)Q}$.

Netočivá složka zkratové impedance síťového napáječe se vypočte podle vztahu:

$$Z_{(0)Q} = \frac{c \cdot U_{nQ}}{\sqrt{3}} \cdot \left(\frac{3}{I''_{kQ1}} - \frac{2}{I''_{kQ3}} \right) \quad (\Omega; \text{ kV}, \text{ kA}) \quad (6.2)$$

kde

I_{kQ1}'' je počáteční souměrný rázový zkratový proud při jednofázovém zkratu v bodě připojení napáječe Q.

Počáteční souměrný rázový zkratový proud I_{kQ}'' pro třífázový a jednofázový zkrat poskytne na vyžádání příslušný rozvodný závod.

6.2 Synchronní stroje

V soustavě plní funkci generátoru, motoru nebo synchronního kompenzátoru. Může jít o stroje s hladkým rotorem nebo o stroje s vyniklými póly.

6.2.1 Generátory přímo zapojené do soustavy

Při výpočtu počátečních rázových zkratových proudů v soustavách napájených přímo z generátorů bez blokových transformátorů je nutno použít v sousledné složkové soustavě impedanci [1]:

$$Z_{(1)GK} = K_G \cdot Z_{(1)G} = K_G \cdot (R_{(1)G} + jX_{(1)G}) \quad (6.3)$$

s korekčním součinitelem:

$$K_G = \frac{U_n}{U_{rG}} \cdot \frac{c_{\max}}{1 + x_d'' \cdot \sin \varphi_{rG}} \quad (-; \text{kV}, \text{kV}, -, ^\circ) \quad (6.4)$$

kde

$c_{\max}$ je napěťový součinitel podle Tab. 5-1;

U_n je jmenovité napětí soustavy;

U_{rG} je jmenovité napětí generátoru;

$Z_{(1)GK}$ je korigovaná impedance generátoru v sousledné složkové soustavě

$Z_{(1)G}$ je rázová impedance generátoru v sousledné složkové soustavě;

φ_{rG} je fázový úhel mezi $\bar{I}_{rG}$ a $\bar{U}_{rG}$;

x_d'' je poměrná rázová reaktance alternátoru vztažená ke jmenovité impedanci.

Při použití ekvivalentního napěťového zdroje $c \cdot U_n / \sqrt{3}$ místo rázového napětí E'' synchronního alternátoru musí být použit korekční součinitel K_G pro výpočet korigované impedance $Z_{(1)GK}$.

Pro synchronní stroje s hladkým rotorem se zpětná složka zkratové impedance rovná sousledné, pro stroje s vyjádřenými póly, u kterých je rázová složka reaktance v podélné (d) ose jiná než v příčné ose (q) je třeba při výpočtu zpětné složky zkratové impedance počítat [1]:

$$X_{(2)G} = (X_d'' + X_q'') / 2 \quad (6.6)$$

Netočivá zkratová impedance synchronních generátorů má konečnou hodnotu jen tehdy, když je jejich uzel uzemněný (přímo nebo přes impedanci). Rovnice pro výpočet netočivé složky zkratové impedance synchronního alternátoru má tvar:

$$Z_{(0)GK} = K_G \cdot Z_{(0)G} = K_G \cdot (R_{(0)G} + jX_{(0)G}) \quad (6.5)$$

Pokud se mezi uzlem alternátoru a zemí vyskytuje impedance, korekční součinitel K_G se nepoužije [3].

6.2.2 Synchronní kompenzátory, synchronní motory

V případě výpočtu počátečního souměrného rázového zkratového proudu I_k'' , nárazového zkratového proudu i_p , souměrného zkratového vypínacího proudu I_b a ustáleného zkratového proudu I_k jsou synchronní kompenzátory modelované stejným způsobem jako synchronní generátory [1].

6.3 Transformátory

Náhradní schéma transformátoru v sousledné a zpětné složkové soustavě má tvar T článku. Při výpočtu zkratů se příčná složka může zanedbat. Výsledkem je náhradní schéma ve tvaru jedné impedance (pro dvojvinut'ové transformátory) [1].

6.3.1 Dvojvinut'ové transformátory

Souslednou složku impedance dvojvinut'ového transformátoru je možno podle údaje ze štítku vypočítat podle vztahu:

$$Z_{(1)T} = \frac{u_k}{100} \cdot \frac{U_{rT}^2}{S_{rT}} \quad (\Omega; \%, \text{ kV, MVA}) \quad (6.6)$$

kde:

u_k je jmenovité napětí nakrátko;

U_{rT} je jmenovité napětí transformátoru na straně vyššího anebo nižšího napětí

S_{rT} je jmenovitý zdánlivý výkon transformátoru.

$$u_k = \sqrt{u_r^2 + u_x^2} \quad (6.7)$$

Činnou složku napětí nakrátko je možné vypočítat z činných ztrát nakrátko:

$$u_r = \frac{\Delta P_{kT}}{S_{rT}} \quad (-; \text{ MW, MVA}) \quad (6.8)$$

kde:

ΔP_{kT} jsou jmenovité činné ztráty nakrátko transformátoru.

Odpor transformátoru potom počítáme:

$$R_T = u_r \cdot \frac{U_{rT}^2}{S_{rT}} \quad (\Omega; \text{kV, MVA}) \text{ nebo } R_T = \frac{\Delta P_{kT}}{3 \cdot I_{rT}^2} \quad (\Omega; \text{MW, kA}) \quad (6.9)$$

kde:

I_{rT} je jmenovitý proud transformátoru na straně vyššího nebo nižšího napětí.

Pro reaktanci dvojinutového transformátoru platí:

$$X_T = u_x \cdot \frac{U_{rT}^2}{S_{rT}} \quad (\Omega; -, \text{kV, MVA}) \quad (6.10)$$

Poměr R_T / X_T obvykle roste s velikostí transformátoru. U velkých transformátorů je odpor tak malý, že při výpočtu zkratových proudů je možné ji zanedbat [1]. Je potřeba ji uvažovat při výpočtu nárazového zkratového proudu i_p a při stejnosměrné složce i_{dc} .

Zpětná složka zkratové impedance transformátorů se rovná sousledné, tedy $Z_{(2)T} = Z_{(1)T}$.

Údaje o netočivých zkratových impedancích transformátorů s dvěmi nebo více vinutími je možné získat od výrobce. U transformátorů plášťových nebo transformátorů složených ze 3 jednofázových jednotek je možno netočivou impedanci určit přibližně [1]:

$$Z_{(0)T} = Z_{(1)T} \quad (6.11)$$

Pro jádrové transformátory přibližně platí vztah:

$$Z_{(0)T} = 0,85 \cdot Z_{(1)T} \quad (6.12)$$

Pro transformátory s přepínáním odboček stačí určit impedanci podle (6.6) pro základní polohu a přepočítat impedance, napětí a proudy pomocí jmenovitého transformačního poměru, který odpovídá přepínači v hlavní poloze.

6.3.2 Trojvinutové transformátory

V případě trojvinutových transformátorů se dají sousledné zkratové impedance vypočítat pomocí tří zkratových impedancí [3] (vztahujících se na stranu A transformátoru –(Obr. 6-1)):

$$\bar{Z}_{AB} = \left(\frac{u_{rAB}}{100} + j \frac{u_{xAB}}{100} \right) \cdot \frac{U_{rTA}^2}{S_{rTAB}} \quad (\Omega; \%, \%, \text{kV, MVA}) \quad (\text{strana C rozpojená}) \quad (6.13)$$

$$\bar{Z}_{AC} = \left(\frac{u_{rAC}}{100} + j \frac{u_{xAC}}{100} \right) \cdot \frac{U_{rTA}^2}{S_{rTAC}} \quad (\Omega; \%, \%, \text{kV, MVA}) \quad (\text{strana B rozpojená}) \quad (6.14)$$

$$\bar{Z}_{BC} = \left(\frac{u_{rBC}}{100} + j \frac{u_{xBC}}{100} \right) \cdot \frac{U_{rTA}^2}{S_{rTBC}} \quad (\Omega; \%, \%, \text{kV, MVA}) \quad (\text{strana A rozpojená}) \quad (6.15)$$

kde:

$$u_x = \sqrt{u_k^2 - u_r^2} \quad (6.16)$$

Pomocí vzorců vypočteme:

$$\bar{Z}_A = \frac{1}{2} \cdot (\bar{Z}_{AB} + \bar{Z}_{AC} - \bar{Z}_{BC}) \quad (6.17)$$

$$\bar{Z}_B = \frac{1}{2} \cdot (\bar{Z}_{AB} + \bar{Z}_{BC} - \bar{Z}_{AC}) \quad (6.18)$$

$$\bar{Z}_C = \frac{1}{2} \cdot (\bar{Z}_{AC} + \bar{Z}_{BC} - \bar{Z}_{AB}) \quad (6.19)$$

kde:

U_{rTA} je jmenovité napětí na straně A;

S_{rTAB} je jmenovitý zdánlivý výkon mezi stranami A a B;

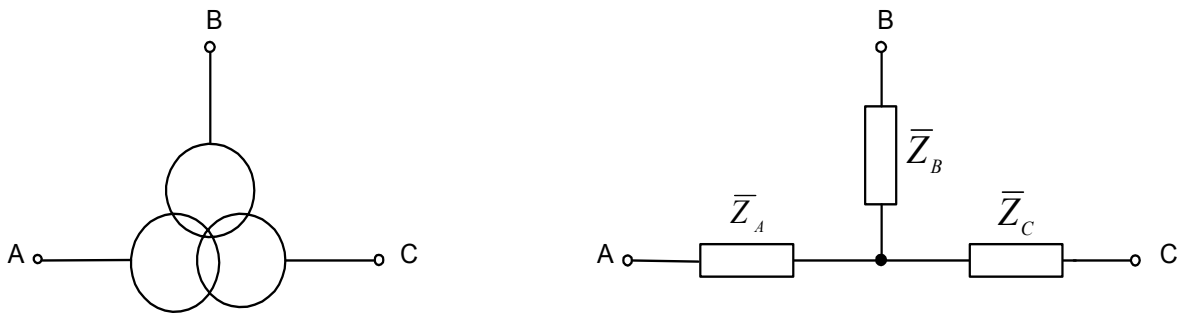
S_{rTAC} je jmenovitý zdánlivý výkon mezi stranami A a C;

S_{rTBC} je jmenovitý zdánlivý výkon mezi stranami B a C;

u_{rAB}, u_{xAB} jsou jmenovité činné a jalové složky napětí nakrátko mezi stranami A a B;

u_{rAC}, u_{xAC} jsou jmenovité činné a jalové složky napětí nakrátko mezi stranami A a C;

u_{rBC}, u_{xBC} jsou jmenovité činné a jalové složky napětí nakrátko mezi stranami B a C.



Obr. 6-1 Trojvinutový transformátor a jeho náhradní schéma

Zpětné zkratové impedance se rovnají sousledným. Netočivé impedance trojvinutových transformátorů je možné získat od výrobce.

6.3.3 Korekční součinitele pro impedanci dvoj a trojvinutových síťových transformátorů

Síťový transformátor je transformátor spojující dvě nebo více sítí s rozdílnými napětími. U dvojvinutových transformátorů s přepínačem odboček pod zatížením a bez přepínače, se musí navíc k impedancím vypočteným podle (6.6) zavést korekční součinitel K_T [1]:

$$\bar{Z}_{TK} = K_T \cdot \bar{Z}_T \quad (6.20)$$

kde:

$$K_T = 0,95 \cdot \frac{c_{\max}}{1 + 0,6 \cdot x_T} \quad (6.21)$$

kde:

x_T je poměrná reaktance transformátoru: $x_T = \frac{X_T}{U_{rT}^2 / S_{rT}}$ [-];

$c_{\max}$ je napěťový součinitel (Tab. 5-1), který odpovídá jmenovitému napětí sítě připojené na straně nižšího napětí síťového transformátoru.

Tento korekční součinitel se nesmí použít pro blokové transformátory.

Impedanční korekční součinitel se musí používat taktéž u zpětných a netočivých impedancí transformátorů v případě výpočtu nesymetrických zkratů. Impedance $\bar{Z}_N$ mezi uzlem transformátoru a zemí obsahuje trojnásobek $3\bar{Z}_N$ netočivé soustavy bez korekčního součinitele.

U trojvinutových transformátorů s přepínáním odboček pod zatížením a bez něho se tři impedanční součinitele určí pomocí poměrných hodnot reaktancí [3]:

$$K_{TAB} = 0,95 \cdot \frac{c_{\max}}{1 + 0,6 \cdot x_{TAB}} \quad (6.22)$$

$$K_{TAC} = 0,95 \cdot \frac{c_{\max}}{1 + 0,6 \cdot x_{TAC}} \quad (6.23)$$

$$K_{TBC} = 0,95 \cdot \frac{c_{\max}}{1 + 0,6 \cdot x_{TBC}} \quad (6.24)$$

Společně s impedancemi $\bar{Z}_{AB}$, $\bar{Z}_{AC}$, $\bar{Z}_{BC}$ podle (6.13), (6.14), (6.15) se můžou určit korigované hodnoty $\bar{Z}_{ABK} = K_{TAB} \cdot \bar{Z}_{AB}$, $\bar{Z}_{ACK} = K_{TAC} \cdot \bar{Z}_{AC}$, $\bar{Z}_{BCK} = K_{TBC} \cdot \bar{Z}_{BC}$.

S těmito impedancemi se musí s použitím postupu podle (6.17), (6.18), (6.19) vypočítat korigované ekvivalentní impedance $\bar{Z}_{AK}$, $\bar{Z}_{BK}$, $\bar{Z}_{CK}$. Impedanční korekční součinitele se musí použít i při výpočtu zpětné a netočivé impedance trojvinutového transformátoru. Impedance mezi uzlem a zemí se musí určit bez korekčního součinitele [1].

6.3.4 Venkovní vedení a kabely

Nejčastěji se používá náhradní schéma vedení, tvořené jen podélnou impedancí $\bar{Z}$. Symetrické složky impedancí kabelů závisí na výrobních technologiích a normách a dají se získat z údajů od výrobce.

Činný odpor na jednotku délky R_L venkovních vedení při střední teplotě vodiče 20 °C se vypočítá z jmenovitého průřezu q_n a měrného odporu ρ [3]:

$$R_L = \frac{\rho}{q_n} \quad (\Omega; \Omega\text{mm}^2\text{m}^{-1}, \text{mm}^2) \quad (6.24)$$

Reaktanci na jednotku délky X_L pro venkovní vedení je možno za předpokladu transpozice vypočítat [3]:

$$X_L = 2\pi f \frac{\mu_0}{2\pi} \left(\frac{0,25}{n} + \ln \frac{d}{r} \right) = f \cdot \mu_0 \left(\frac{0,25}{n} + \ln \frac{d}{r} \right) \quad (\Omega; \text{Hz}, \text{H.m}^{-1}, -, \text{m}, \text{m}) \quad (6.25)$$

kde:

d je střední geometrická vzdálenost mezi vodiči nebo středy svazků:

$$d = \sqrt[3]{d_{L1L2} \cdot d_{L2L3} \cdot d_{L3L1}};$$

r je poloměr jednoduchého vodiče, v případě svazkových vodičů se za r dosadí $\sqrt[n]{nrR^{n-1}}$ s poloměrem svazku R ;

n je počet svazkových vodičů (pro jednoduchý vodič $n = 1$).

Sousledná a zpětná složková zkratová impedance je pro vedení stejná.

6.3.5 Tlumivky

Tlumivky rozeznáváme:

- sériové – na omezení zkratových proudů (reaktory);
- paralelní – na kompenzaci el. vedení;
- kompenzační tlumivky v uzlech elektrických strojů (Petersenova tlumivka).

Odpor je zpravidla zanedbatelný, ale pokud ho potřebujeme znát, je nejlépe jej zjistit od výrobce nebo vypočítat z činných ztrát tlumivky. Reaktanci tlumivky je možné určit z jejího reaktančního výkonu:

$$X = \frac{U^2}{Q} \cdot p^2 \quad (\Omega; \text{kV}, \text{MVar}, -) \quad (6.26)$$

kde:

U je fázové napětí tlumivky;

Q je jednofázový reaktanční výkon tlumivky;

p je převod transformátoru (z důvodu přepočtu na vztažné napětí).

7 DIMENZOVÁNÍ PODLE DYNAMICKÝCH ÚČINKŮ ZKRATOVÝCH PROUDŮ

7.1 Elektromagnetická síla

Elektromagnetické síly jsou způsobeny průchodem proudu ve vodiči. Tyto elektromagnetické síly působí na paralelní vodiče a vyvolávají namáhání, se kterým musíme v rozvodnách počítat.

Intenzita magnetického pole ve vzdálenosti a od vodiče je :

$$H = \frac{I}{2 \cdot \pi \cdot a} \quad (\text{A} \cdot \text{m}^{-1}; \text{A}, \text{m}) \quad (7.1)$$

Dva vodiče protékané elektrickým proudem působí na sebe vzájemně silou :

$$F = B \cdot l \cdot I \cdot \sin \alpha \quad (\text{N}; \text{T}, \text{m}, \text{A}, -) \quad (7.2)$$

kde:

l je délka vodičů;

$\alpha = \pi/2$ u rovnoběžných dlouhých vodičů;

I je proud protékající vodiči.

$$B = \mu_0 \cdot H = 4 \cdot \pi \cdot 10^{-7} \cdot \frac{I}{2 \cdot \pi \cdot a} = \frac{2 \cdot I}{a} \cdot 10^{-7} \quad (\text{T}; \text{A}, \text{m}) \quad (7.3)$$

Po dosazení:

$$F = \frac{2 \cdot I}{a} \cdot 10^{-7} \cdot l \cdot I \quad (\text{N}; \text{A}, \text{m}, \text{m}, \text{A}) \quad (7.4)$$

7.2 Uspořádání s tuhými vodiči

Protože v rozvodných zařízeních nemůžeme uvažovat nehmotné vodiče a výpočet se provádí zpravidla pro trojfázovou soustavu při uvažování souměrného trojfázového zkratu, je třeba výše uvedený vztah upravit na tvar, který odpovídá síle F_m působící mezi fázovými vodiči [2]:

$$F_m = 2 \cdot k \cdot \frac{i_p^2}{a_m} \cdot l \cdot 10^{-7} \quad (\text{N}; -, \text{A}, \text{m}, \text{m}) \quad (7.5)$$

kde:

l je délka vodiče mezi podpěrkami;

k je koeficient respektující uspořádání vodičů a fázový posun proudu v jednotlivých vodičích:

- u prostředního vodiče trojfázové soustavy při rovinném uspořádání $k = \frac{\sqrt{3}}{2}$;

- u krajního vodiče trojfázové soustavy $k = 0,81$;

- u vodičů trojfázové soustavy při uspořádání v rovnostranném trojúhelníku

$$k = \frac{\sqrt{3}}{2};$$

- pro výpočet síly mezi vodiči jedné fáze je $k = 1$;

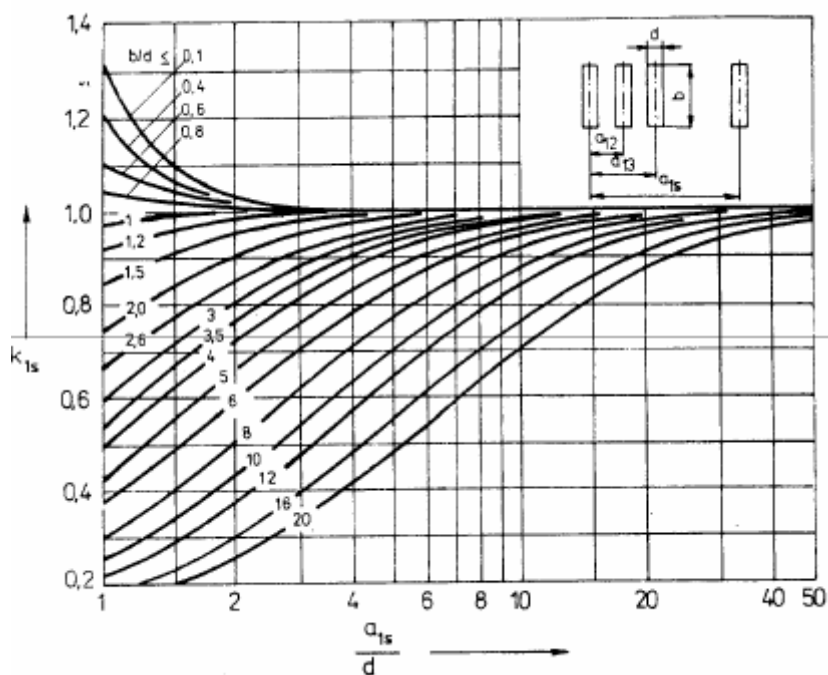
a_m je účinná vzdálenost mezi vodiči, která se zavádí proto, že síly mezi vodiči, kterými prochází proud jsou závislé na geometrickém uspořádání a tvaru vodičů;

- $a_m = a$, je-li hlavní vodič kruhového průřezu nebo je složený z dílčích vodičů kruhového průřezu,

- $a_m = a/k_{1s}$, je-li hlavní vodič obdélníkového průřezu nebo je-li složen z dílčích vodičů obdélníkového průřezu;

k_{1s} je součinitel pro výpočet účinné vzdálenosti - určuje se z grafu (Obr. 7-1), kde pro $a_{1s} = a$, $b = b_m$ a $d = d_m$;

I_{km} je maximální hodnota zkratového proudu – dynamický zkratový proud.



Obr. 7-1 Součinitel k_{1s} pro výpočet účinné vzdálenosti vodiče [4]

7.2.1 Výpočet namáhání tuhých vodičů

a) Ohybové namáhání hlavního vodiče σ_m (vyvolané silami mezi hlavními vodiči) [4] je:

$$\sigma_{tot} = \sigma_m = V_\sigma \cdot V_r \cdot \beta \cdot \frac{F_m \cdot l}{8Z} \quad (\text{N/m}^2; -, -, -, \text{N}, \text{m}, \text{m}^3) \quad (7.6)$$

b) Ohybové namáhání jednoho dílčího vodiče σ_s (vyvolané silami mezi dílčími vodiči) [4] je:

$$\sigma_s = V_\sigma \cdot V_{rs} \cdot \beta \cdot \frac{F_s \cdot l_s}{16Z_s} \quad (\text{N/m}^2; -, -, -, \text{N}, \text{m}, \text{m}^3) \quad (7.7)$$

kde

Z, Z_s jsou průřezové moduly vodičů

V_σ, V_σ, V_r jsou součinitelé respektující dynamické účinky zkratu viz **Příloha A-1**;

β je součinitel respektující typ upevnění vodiče a počet podpěr **Příloha B-1**;

F_m je síla působící mezi hlavními vodiči podle (7.5);

F_s je síla působící mezi dílčími vodiči, pro kterou platí:

$$F_s = 2 \cdot \left(\frac{i_p}{n} \right)^2 \cdot \frac{l_s}{a_s} \cdot 10^{-7} \quad (\text{N}; \text{A}, -, \text{m}, \text{m}) \quad (7.8)$$

l je vzdálenost mezi podpěrkami;

l_s je vzdálenost mezi rozpěrkami nebo výztužnými vložkami;

n je počet dílčích vodičů;

a_s je účinná vzdálenost mezi dílčími vodiči, která se určí:

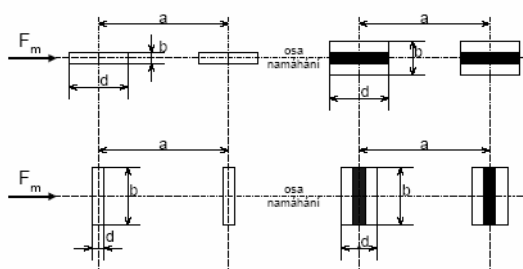
- pro dílčí vodiče kruhového průřezu :

$$\frac{1}{a_s} = \frac{1}{a_{12}} + \frac{1}{a_{13}} + \frac{1}{a_{14}} + \dots + \frac{1}{a_{1s}} + \dots \frac{1}{a_{1n}} \quad (7.9)$$

- pro dílčí vodiče obdélníkového průřezu :

$$\frac{1}{a_s} = \frac{k_{12}}{a_{12}} + \frac{k_{13}}{a_{13}} + \frac{k_{14}}{a_{14}} + \dots + \frac{k_{1s}}{a_{1s}} + \dots \frac{k_{1n}}{a_{1n}} \quad (7.10)$$

Pro výpočet namáhání vodičů je nutné správně určit rozměry vodiče a průřezový modul vodiče, které závisí na uspořádání vodičů a vztažné ose namáhání (*Obr. 7-2*).



Obr. 7-2 – Vztažná osa ohyb. namáhání pro různá uspořádání jednod. a vícenás. vodičů [4]

Pro jednoduché vodiče obdélníkových průřezů platí:

$$Z = \frac{1}{6} \cdot b \cdot d^2 \quad (\text{m}^3; \text{m}, \text{m}) \quad (7.11)$$

Pro vícenásobné vodiče obdélníkových průřezů jsou hodnoty Z uvedeny v Příloha A-2.

Pro jednoduché trubkové vodiče platí:

$$Z = \frac{\pi \cdot (D^4 - (D - 2s)^4)}{32D} \quad (\text{m}^3; \text{m}, \text{m}, \text{m}) \quad (7.12)$$

kde

D je vnější průměr trubky;

s je tloušťka trubky.

c) Dovolené namáhání vodiče:

Vodič je odolný vůči působení zkratových sil, jestliže jsou splněny tyto podmínky [4]:

- pro jednoduché vodiče

$$\sigma_m \leq q \cdot R_{p0,2} \quad (\text{N/m}^2; -, \text{N/m}^2) \quad (7.13)$$

- pro vodiče složené ze dvou a více dílčích vodičů

$$\sigma_{tot} = \sigma_m + \sigma_s \leq q \cdot R_{p0,2} \quad (\text{N/m}^2; -, \text{N/m}^2) \quad (7.14)$$

$$\sigma_s \leq R_{p0,2s} \quad (\text{N/m}^2; \text{N/m}^2) \quad (7.15)$$

kde

$R_{p0,2}$ je namáhání odpovídající min. hodnotě meze průtažnosti materiálu vodiče;

q je součinitel plasticity průřezu vodiče (Obr. 7-3).

Průřez		Průřez
	$q = 2$	 $q \approx 1,83$
	$q = 1,5$	 $q \approx 1,19$

Obr. 7-3 Součinitel plasticity pro různé tvary vodičů [4]

Pro součinitel plasticity trubkového vodiče platí:

$$q = 1,7 \cdot \frac{1 - (1 - 2sD)^3}{1 - (1 - 2sD)^4} \quad (-; m, m) \quad (7.16)$$

Pro vlastní kmitočet hlavního vodiče platí:

$$f_c = \frac{\gamma}{l^2} \cdot \sqrt{\frac{EJ}{m'}} \quad (\text{Hz}; -, m, N, m^4, \text{kg/m}) \quad (7.17)$$

kde

γ je součinitel pro výpočet vl. kmitočtu vodiče (**Příloha C**);

J je moment setrvačnosti plochy průřezu hl. vodiče

7.2.2 Výpočet sil na podpěry tuhých vodičů

Dynamická síla F_d se vypočítá:

$$F_d = V_F \cdot V_r \cdot \alpha \cdot F_m \quad (\text{N}; -, -, ^\circ, \text{N}) \quad (7.18)$$

kde

V_F je součinitel respektující vlastní kmitočet vodiče f_c ;

V_r je součinitel respektující dynamické účinky zkratu;

(pokud není prokázána výpočtem vlastního kmitočtu soustavy f_c možnost snížení součinitele V_F , určí se součin $V_F \cdot V_r$ podle tabulky v **příloze A-1**;

α součinitel závislý na druhu a počtu podpěr podle tabulky v **příloze B-1**;

F_m je maximální síla na vodič pro trojfázový nebo jednofázový dvouvodičový systém

Vypočtená síla F_d působí v ose vodiče, zatímco hodnoty mechanické pevnosti jsou určeny maximální silou, působící ve vrcholu podpěry. Pro kontrolu pevnosti podpěrky je tedy nutno porovnávat síly, které působí ve stejném místě [4].

7.3 Uspořádání s ohebnými vodiči

Maximální tahové síly způsobené účinky zkratových proudů v hlavních vodičích se určují po výpočtu charakteristických parametrů pro uspořádání a typ zkratu. U rozpětí je třeba rozlišit mezi tahovou silou F_t při zkratu a tahovou silou F_f po zkratu, když vodič klesá z vychýlené polohy zpět.

V uspořádání s ohebnými vodiči jsou namáhání vyskytující se při dvoufázovém zkratu a trojfázovém zkratu přibližně stejné. Při dvoufázovém zkratu však je výsledkem typické vychýlení vodiče snižující minimální vzdálenost. V případě trojfázového zkratu se střední vodič pohybuje jen málo v důsledku sil působících ze dvou směrů. Proto počítáme síly F_t , F_f a b_h pro dvojfázový zkrat.

Tahové síly F_t a F_f zahrnují síly způsobené stálým zatížením.

Následující výpočty musí být prováděny se základním statickým tahem vodiče F_{st} existujícím při zimním minimu a také se statickým tahem vodiče F_{st} existujícím při maximální provozní teplotě. Pro každou tahovou sílu se vybere pro účely návrhu horší z obou případů.

Následující výpočetní vztahy lze použít pro rozpětí do přibližně 60 m a s poměrem průhybu k rozpětí do přibližně 8 %. Výpočty platí pro horizontální rozpětí s rovinným uspořádáním fázových vodičů. Příspěvky přidavných hmot soustředěných uvnitř rozpětí je doporučeno zahrnout ke gravitační síle. U ohebných vodičů se nemusí počítat se zvětšením účinku vlivem OZ [4].

7.3.1 Účinky na hlavní vodič

Elektromagnetická síla na jednotku délky je dána vztahem [4]:

$$F' = \frac{\mu_0}{2\pi} \cdot 0,75 \cdot \frac{(I_{k3}'')^2}{a} \cdot \frac{l_c}{l} \quad (\text{N; H/m, A, m, m, m}) \quad (7.19)$$

kde

I_{k3}'' je počáteční rázový zkratový proud při souměrném trojfázovém zkratu;

a osová vzdálenost mezi hlavními vodiči;

l_c je délka lana hlavního vodiče v rozpětí;

l je celková délka rozpětí.

Pro ohebné vodiče, které vyvolávají ohybové síly na staniční podpěrky (rozpětí bez izolačních závěsů) je $l_c = l$. Pro rozpětí s izolačními závěsy je $l_c = l - 2l_i$, kde l_i je délka jednoho izolátorového řetězce [4].

V případě dvouvodičového jednofázového systému nahradíme $0,75(I_{k3}'')^2$ ve vztahu (7.19) údajem $(I_{k2}'')^2$ [4].

Poměr elektromagnetické síly vyvolané zkratovým proudem k tíhové síle působící na vodič je dán vztahem:

$$r = \frac{F'}{n \cdot m_s' \cdot g_n} \quad (-; \text{N}, -, \text{kg/m, m/s}^2) \quad (7.20)$$

Směr výslednice sil působících na vodič:

$$\delta_1 = \arctg(r) \quad (^\circ; -) \quad (7.21)$$

Ekvivalentní průhyb vodiče ve středu rozpětí je:

$$b_c = \frac{n \cdot m_s' \cdot g_n \cdot l^2}{8F_{st}} \quad (\text{m}; -, \text{kg/m, m/s}^2, \text{m, N}) \quad (7.22)$$

Doba mechanického kmitu T kmitajícího vodiče je dána:

$$T = 2\pi \sqrt{0,8 \frac{b_c}{g_n}} \quad (\text{s; m, m/s}^2) \quad (7.23)$$

a platí pro malé úhly vychýlení bez průtoku zkratového proudu vodičem [4].

Výsledná doba kmitu oscilujícího vodiče T_{res} během průtoku zkratového proudu je dána:

$$T_{res} = \frac{T}{\sqrt{1+r^2} \cdot \left[1 - \frac{\pi^2}{64} \cdot \left[\frac{\delta_1}{90} \right]^2 \right]} \quad (\text{s; s, -, }^\circ) \quad (7.24)$$

Tuhost je dána vztahem:

$$N = \frac{1}{S \cdot l} + \frac{1}{n \cdot E_s \cdot A_s} \quad (1/\text{N; m}^2, \text{m, -, N/m}^2, \text{m}^2) \quad (7.25)$$

Jestliže není známa přesná hodnota S , používá se hodnota $S = 10^5 \text{ N/m}$ pro volně zavěšené vodiče [4].

Skutečný modul pružnosti E_s je dán vztahem:

$$E_s = \begin{cases} E \cdot \left[0,3 + 0,7 \sin \left(\frac{F_{st}}{n A_s \sigma_{fin}} \cdot 90 \right) \right] & \text{pro } \frac{F_{st}}{n \cdot A_s} \leq \sigma_{fin} \\ E & \text{pro } \frac{F_{st}}{n \cdot A_s} > \sigma_{fin} \end{cases} \quad (7.26)$$

kde

$$\sigma_{fin} = 5 \cdot 10^7 \frac{\text{N}}{\text{m}^2} \quad (7.27)$$

σ_{fin} je nejnižší hodnota σ kdy modul pružnosti je konstantní [4].

Součinitel napjatosti ζ hlavního vodiče je dán vztahem:

$$\zeta = \frac{(n \cdot g_n \cdot m'_s \cdot l)^2}{24 F_{st}^3 \cdot N} \quad (-; -, \text{m/s}^2, \text{kg/m, m, N, 1/N}) \quad (7.28)$$

Během nebo na konci průchodu zkratového proudu bude rozpětí vychýleno z ustáleného stavu do polohy dané úhlem podle vztahu:

$$\delta_k = \begin{cases} \delta_1 \left[1 - \cos \left[360 \cdot \frac{T_{k1}}{T_{res}} \right] \right] & \text{pro } 0 \leq \frac{T_{k1}}{T_{res}} \leq 0,5 \\ 2\delta_1 & \text{pro } \frac{T_{k1}}{T_{res}} > 0,5 \end{cases} \quad (7.29)$$

Pokud je známa doba prvního průtoku zkratového proudu T_{k1} do jeho prvního přerušení, maximální úhel vychýlení δ_m se určí z obrázku... nebo se vypočte jak je uvedeno níže. Jestliže tato doba není známa nebo platí, že $T_{k1} > 0,4T$, pak za T_{k1} ve vztazích (7.29), (7.32) a (7.37) dosadíme hodnotu $0,4T$ [4].

Během, nebo po průchodu zkratového proudu se rozpětí vychyluje do polohy dané maximálním úhlem vychýlení δ_m , který se určí:

$$\chi = \begin{cases} 1 - r \cdot \sin \delta_k & \text{pro } 0 \leq \delta_k \leq 90^\circ \\ 1 - r & \text{pro } \delta_k > 90^\circ \end{cases} \quad (7.30)$$

a

$$\delta_m = \begin{cases} 1,25 \arccos \chi & \text{pro } 0,776 \leq \chi \leq 1 \\ 10^\circ + \arccos \chi & \text{pro } -0,985 \leq \chi < 0,766 \\ 180^\circ & \text{pro } \chi < -0,985 \end{cases} \quad (7.31)$$

Vypočítaný úhel vychýlení δ_m je nejvyšší hodnota, která se může vyskytnout pro nejnepříznivější případ doby trvání zkratu, která je menší nebo rovna zadané době trvání zkratu T_{k1} [4].

Tahová síla F_t způsobená vychýlením vodičů během zkratu

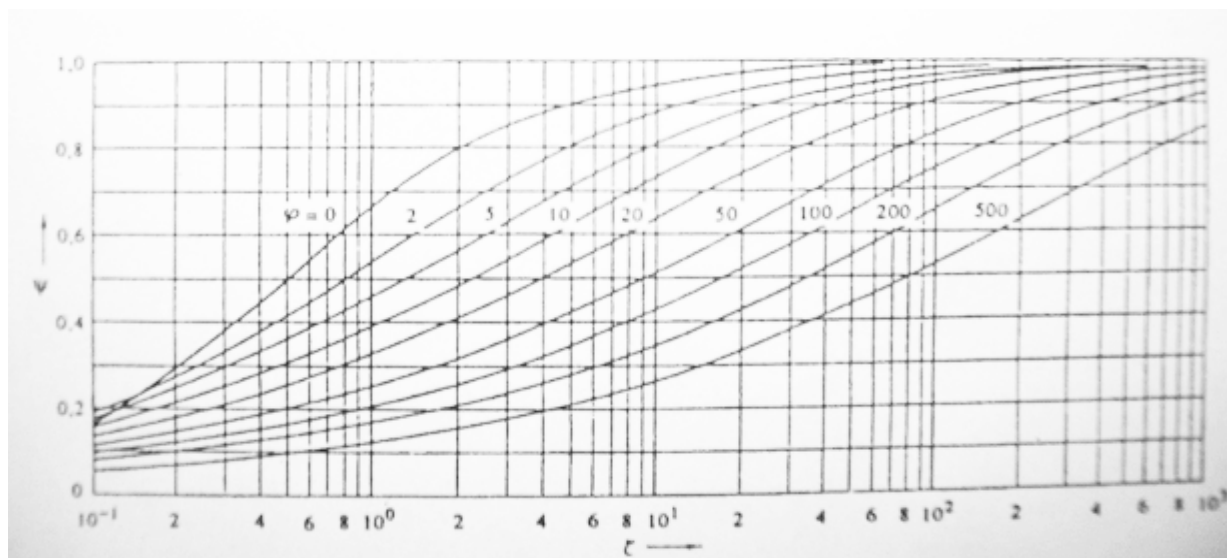
Parametr zatížení φ určíme podle vztahu:

$$\varphi = \begin{cases} 3 \cdot (\sqrt{1 + r^2} - 1) & \text{pro } T_{k1} \geq T_{res} / 4 \\ 3 \cdot (r \cdot \sin \delta_k + \cos \delta_k - 1) & \text{pro } T_{k1} < T_{res} / 4 \end{cases} \quad (7.32)$$

Součinitel ψ je funkcí ζ a φ a určí se buď z (Obr. 7-4) nebo jako reálné řešení rovnice:

$$\varphi^2 \psi^3 + \varphi(2 + \zeta) \psi^2 + (1 + 2\zeta) \psi - \zeta(2 + \varphi) = 0 \quad (7.33)$$

kde $0 \leq \psi \leq 1$.



Obr. 7-4 Součinitel ψ pro výpočet tahu ohebných vodičů [4]

Tahová síla F_t je dána:

$$F_t = \begin{cases} F_{st}(1 + \varphi\psi) & \text{pro } n = 1, \text{ jednoduchý vodič} \\ 1,1 \cdot F_{st}(1 + \varphi\psi) & \text{pro } n \geq 2, \text{ svazkové vodiče} \end{cases} \quad (7.34)$$

Tahová síla F_f po zkratu způsobená poklesem napětí vodičů po zkratu

Po ukončení zkratu rozpětí osciluje nebo klesá zpět do původní polohy před zkratem. Maximální hodnota síly F_f po ukončení pádu je významná jen pro $r > 0,6$, když $\delta_m \geq 70^\circ$ [4]. V tomto případě se její velikost určí podle vztahu:

$$F_f = 1,2 \cdot F_{st} \sqrt{1 + 8\zeta \frac{\delta_m}{180}} \quad (N; N, -, ^\circ) \quad (7.25)$$

Horizontální výchylka rozpětí b_h a minimální vzdušná vzdálenost a_{min}

Pružné prodloužení vodiče se určí podle vztahu:

$$\varepsilon_{ela} = N \cdot (F_t - F_{st}) \quad (-; 1/N, N, N) \quad (7.36)$$

Prodloužení vodiče se určí ze vztahu:

$$\varepsilon_{th} = \begin{cases} c_{th} \left[\frac{I_{k3}''}{n \cdot A_s} \right]^2 T_{res} / 4 & \text{pro } T_{k1} \geq T_{res} / 4 \\ c_{th} \left[\frac{I_{k3}''}{n \cdot A_s} \right]^2 T_{k1} & \text{pro } T_{k1} < T_{res} / 4 \end{cases} \quad (7.37)$$

Kde pro c_{th} se použijí hodnoty:

$$0,27 \cdot 10^{-18} m^4 / (A^2 s) \quad \text{pro Al, slitiny Al a AlFe lana s poměrem průřezu Al/Fe > 6;}$$

$$0,17 \cdot 10^{-18} m^4 / (A^2 s) \quad \text{pro AlFe lana s poměrem průřezu Al/Fe ≤ 6;}$$

$$0,088 \cdot 10^{-18} m^4 / (A^2 s) \quad \text{pro měď.}$$

V případě dvouvodičového jednofázového systému nahradíme ve vztahu (7.37) hodnotu I_{k3}'' hodnotou I_{k2}'' [4].

Součinitel C_D respektující zvětšení průhybu vodiče vlivem pružného a tepelného prodloužení se určí podle vztahu:

$$C_D = \sqrt{1 + \frac{3}{8} \left[\frac{l}{b_c} \right]^2 (\varepsilon_{ela} + \varepsilon_{th})} \quad (-; m, m, -, -) \quad (7.38)$$

Součinitel C_F respektující zvětšení dynamického průhybu vodiče způsobeného změnou tvaru křivky vodiče a určí se:

$$C_F = \begin{cases} 1,05 & \text{pro } r \leq 0,8 \\ 0,97 + 0,1r & \text{pro } 0,8 < r < 1,8 \\ 1,15 & \text{pro } r \geq 1,8 \end{cases} \quad (7.39)$$

Maximální horizontální výchylka rozpětí b_h vyvolaná zkratem pro rozpětí s volně zavěšenými vodiči $l_c = l$ připojenými k portálům (nosným konstrukcím) a přístrojům se určí podle:

$$b_h = \begin{cases} C_F C_D b_c & \text{pro } \delta_m \geq 90^\circ \\ C_F C_D b_c \sin \delta_m & \text{pro } \delta_m < 90^\circ \end{cases} \quad \text{pro } l_c = l \quad (7.40)$$

Maximální horizontální výchylka rozpětí b_h vyvolaná zkratem pro rozpětí s předpjatými vodiči $l_c = l - 2l_i$ připojenými k portálům s izolačními závěsy se určí podle:

$$b_h = \begin{cases} C_F C_D b_c \sin \delta_1 & \text{pro } \delta_m \geq \delta_1 \\ C_F C_D b_c \sin \delta_m & \text{pro } \delta_m < \delta_1 \end{cases} \quad \text{pro } l_c = l - 2l_i \quad (7.41)$$

Vodiče v jednoduchém rovinném uspořádání se během zkratu vychylují tak, že střed rozpětí se v nejnepríznivějším případě pohybuje po kružnici o poloměru b_h se středem daným přímkou spojující body upevnění vodiče v rozpětí [4]. Vzdálenost mezi středy rozpětí dvou hlavních vodičů během dvoufázového zkratu je pro nejhorší případ dána vztahem:

$$a_{\min} = a - 2b_h \quad (\text{m; m, m}) \quad (7.42)$$

7.4 Konstrukční zatížení způsobené elektromagnetickými účinky

Návrhové zatížení pro staniční podpěrky, jejich konstrukce a připojovací místa

Síla F_d pro uspořádání s tuhými vodiči a maximální hodnota F_t a F_f pro uspořádání s tuhými vodiči nesmí být větší než výdržné hodnoty udávané výrobcem pro staniční podpěrky (podpěrné izolátory) a jejich konstrukce. Pro izolátory namáhané ohybovou silou odpovídá mechanická odolnost zaručené pevnosti v ohybu, vztažené na hlavu izolátoru.

Je-li působiště síly nad hlavou izolátoru, provede se přepočít velikosti síly na hlavu izolátoru (v kritickém průřezu) tak, aby výsledný ohybový moment, kterému musí izolátor odolávat byl shodný.

Připojovací místa tuhých vodičů se hodnotí na základě F_d . Připojovací místa ohebných vodičů se hodnotí na základě maximální hodnoty z $1,5F_t$ a $1,0F_f$, kde součinitel 1,5 bere v úvahu, že energie kmitání je pohlcena hmotou izolátorů [4].

Návrhové zatížení pro konstrukce, izolátory a připojovací místa s tahovými silami přenášenými izolátorovými řetězci

Pro konstrukce, izolátory a připojovací místa rozpětí s ohebnými vodiči musí být použita maximální hodnota z F_t a F_f . Při návrhu konstrukcí společných pro všechny tři fáze se při trojfázovém zkratu se vychází z toho, že maximální hodnota F_t a F_f působí pouze ve dvou fázích a třetí je namáhána pouze statickým tahem [4].

7.5 Tepelné účinky na holé vodiče a elektrická zařízení

Pro následující výpočty byly přijaty následující předpoklady [4]:

- neuvažuje se skinefekt (do průřezu 600 mm²) a proximityefekt (vliv mag. pole blízkých rovnoběžných vodičů);
- závislost odporu na teplotě je lineární;
- měrné teplo vodiče je konstantní;
- ohřev je adiabatický.

Výpočet ekvivalentního oteplovacího proudu

Pro krátkodobý efektivní oteplovací proud platí vztah:

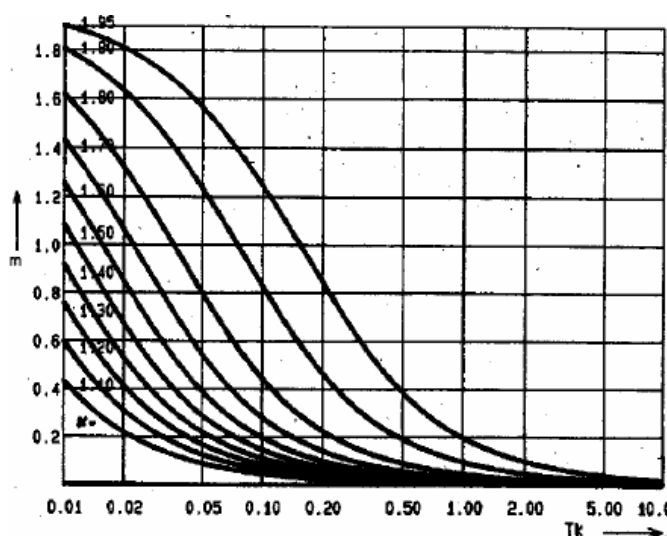
$$I_{th} = I_k'' \sqrt{m + n} \quad (7.43)$$

kde

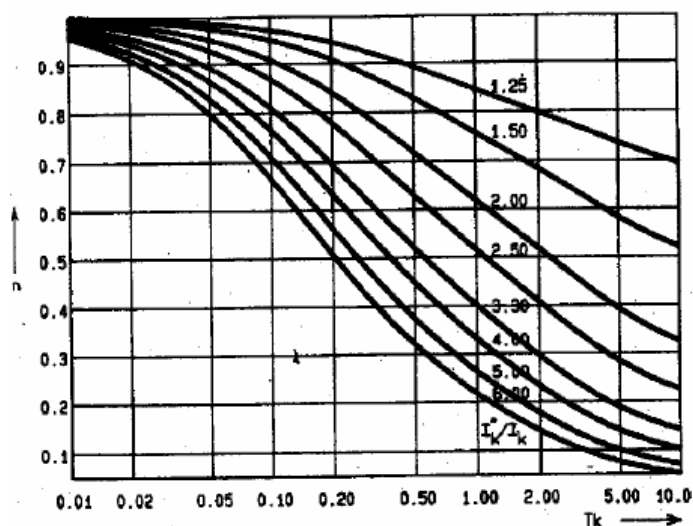
m a n jsou součinitelé tepelného účinku stejnosměrného a střídavého proudu;

I_k'' je efektivní hodnota počátečního souměrného zkratového proudu.

Hodnoty součinitelů m a n jsou funkce doby trvání zkratového proudu (Obr. 7-5, resp. Obr. 7-6). Pro distribuční síť je obvykle $n = 1$ [4].



Obr. 7-5 - Součinitel m – Tepelný účinek ss složky zkrat. proudu [4]



Obr. 7-6 – Součinitel n – Tepelný účinek střídavé složky zkrat. proudu [4]

Pro výpočet ekvivalentního krátkodobého oteplovacího proudu v trojfázové soustavě je rozhodující souměrný trojfázový zkrat.

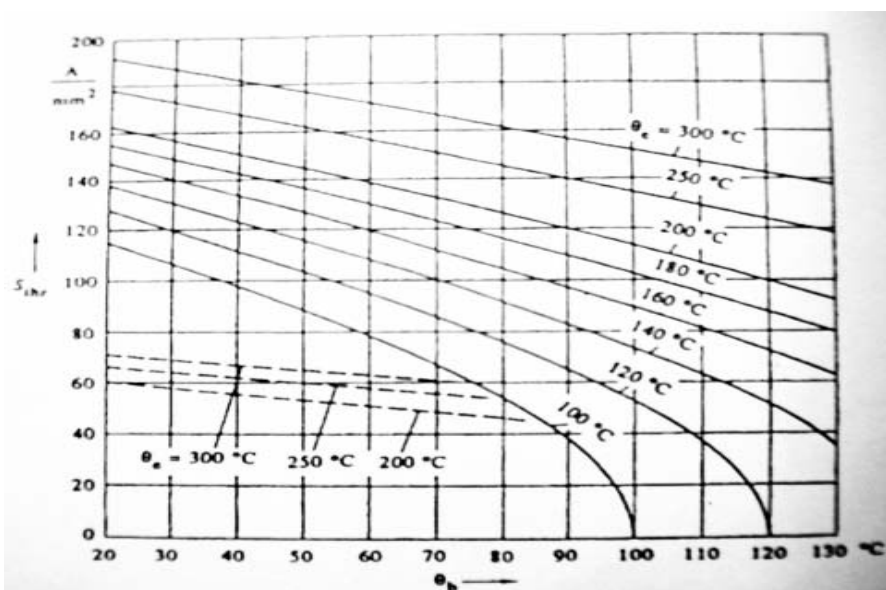
U zařízení omezující zkratový proud udává ekvivalentní krátkodobý oteplovací proud I_{th} a příslušnou dobu trvání zkratového proudu T_k výrobce [4].

Výpočet oteplení a hustoty jmenovitého krátkodobého proudu vodičů

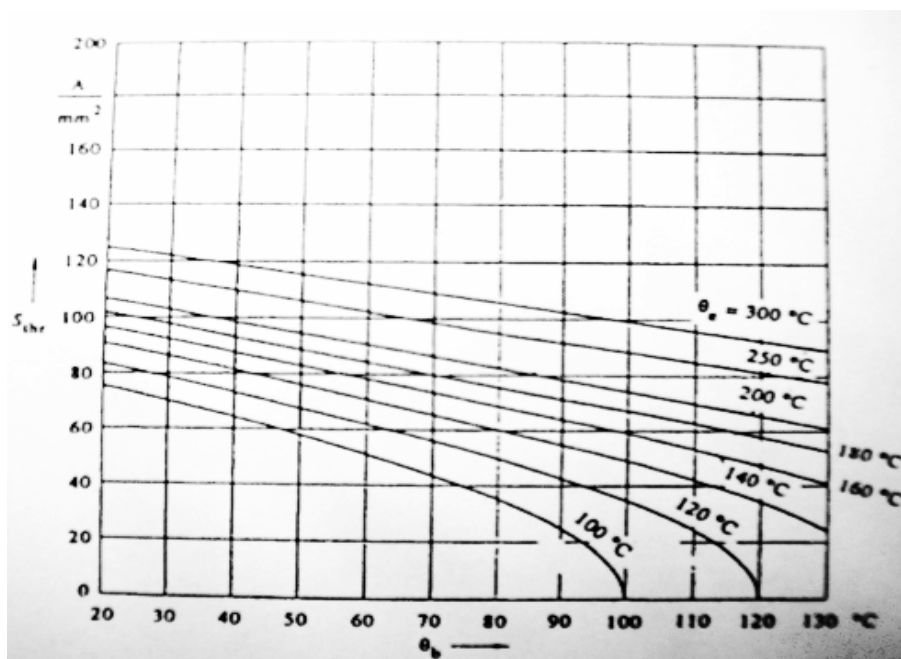
Oteplení vodiče způsobené zkratem je funkcí doby trvání zkratového proudu, krátkodobého ekvivalentního oteplovacího proudu a materiálu vodiče.

Podle známé hustoty jmenovitého krátkodobého proudu můžeme podle grafu (Obr. 7-7a, resp. Obr. 7-7b) vypočítat oteplení vodiče.

Nejvyšší doporučené krátkodobé oteplovací proudy pro různé vodiče (Tab. 7-1). Při dosažení těchto hodnot může dojít k nepatrnému snížení pevnosti materiálu, které ale podle zkušeností nesnižuje bezpečnost provozu. Je nutné respektovat maximální dovolenou teplotu podpěr [4].



Obr. 7-7a – Vztah mezi hustotou jmenovitého krátkodobého proudu ($T_{kr} = 1$ s) a teplotou vodiče (plné čáry: měď, přer. čáry: nízkolegovaná ocel) [4]



Obr. 7-7b – Vztah mezi hustotou jmenovitého krátkodobého proudu ($T_{kr} = 1$ s) a teplotou vodiče (hliník, slitina hliníku, ocelí vyztužený hliníkový vodič) [4]

Tab. 7-1 Doporučené nejvyšší teploty vodičů mech. namáhaných při zkratu [4]

Typ vodiče	Maximální doporučená teplota při zkratu
holé vodiče, kompaktní nebo splétané: Cu, Al nebo Al slitiny	200°C
holé vodiče, kompaktní nebo splétané: ocel	300°C

Výpočet tepelné odolnosti při zkratu pro různé doby trvání zkratového proudu

Elektrické zařízení je odolné vůči tepelnému působení zkratového proudu, pokud jsou splněny následující podmínky pro ekvivalentní krátkodobý oteplovací proud I_{th} [4]:

$$I_{th} \leq I_{thr} \text{ pro } T_k \leq T_{kr} \quad (7.44)$$

$$I_{th} \leq I_{thr} \sqrt{\frac{T_{kr}}{T_k}} \text{ pro } T_k \geq T_{kr} \quad (A; A, s, s) \quad (7.45)$$

kde

I_{thr} je jmenovitý krátkodobý proud zařízení;

T_{kr} je jmenovitá doba zkratu.

Holé vodiče jsou odolné vůči tepelnému působení zkratového proudu, jestliže hustota ekvivalentního krátkodobého oteplovacího proudu S_{th} splňuje pro všechny T_k podmínku [4]:

$$S_{th} \leq S_{thr} \sqrt{\frac{T_{kr}}{T_k}} \quad (\text{A/m}^2; \text{A/m}^2, \text{s}, \text{s}) \quad (7.46)$$

Hustota jmenovitého krátkodobého proudu S_{thr} je uvedena na *Obr. 7-7a*, resp. *Obr. 7-7b*, pro $T_{kr} = 1 \text{ s}$.

Při stanovení plochy průřezu ocelohliníkových lan AlFe se při výpočtu proudové hustoty nepočítá s plochou průřezu ocelové duše [4].

8 TVORBA PROGRAMŮ V MS EXCEL VISUAL BASIC

Pro účely simulace účinků zkratových proudů v rozvodně VVN 110 kV ve Slavkově u Brna byly MS Excel Visual Basic vytvořeny dva programy. Jeden program slouží k výpočtu sil působících na podpěrky a svorky přípojníc řešených pomocí AlFe lan, druhý program slouží k výpočtu sil působících na podpěrky přípojníc a samotné přípojnice řešené pomocí trubkových vodičů. Oba programy jsou zpracovány podle postupů v [4], které jsou popsány také v kap. 7.

8.1 Program „Lana“

Tento program je určen pro dimenzování podpěrek a přístrojových svorek, které slouží k připojení lan AlFe. Výpočet se provede stisknutím tlačítka „Vypočítat“ ve formuláři „Vstupní hodnoty pro výpočet AlFe lana“.

8.1.1 Vstupní hodnoty

Vstupní hodnoty pro výpočet AlFe lana

Vstupní hodnoty

Počáteční nárazový zkratový proud I''_{k3} = 19000 A

Osová vzdálenost mezi hlavními vodiči a = 2 m

Celková délka rozpětí l = 11,5 m

Délka závěsného izolátoru l_i = 0 m

Statická síla v tahu ohebn. hl. vodiče F_{st} = 273 N

Pérová konstanta S = 100000 N/m

Průřez dílčího vodiče A_s = 0,000242 m²

Doba prvního průtoku zkrat. proudu T_{k1} = 0,3 s

Typ lana AlFe = 150/25

Výchozí Vypočítat

Obr. 8-1 – Formulář „Vstupní hodnoty pro AlFe lana“

Vyplňují se do formuláře „Vstupní hodnoty pro výpočet AlFe lana“, který je zobrazen automaticky po otevření souboru. Pro korektní výpočet je nutné zadat potřebné vstupní hodnoty, jsou to:

- Počáteční rázový zkratový proud I''_{k3} [A];
- Osová vzdálenost mezi hlavními vodiči a [m];
- Celková délka rozpětí l [m];
- Délka závěsného izolátoru l_i [m], jedná-li se o rozpětí s volně zavěšenými vodiči je $l_i = 0$;
- Statická síla v tahu ohebného hlavního vodiče F_{st} [N], dosazuje se hodnota při zimním minimu a při maximální provozní teplotě;
- Pérová konstanta S [N/m], pokud není známa přesná hodnota, dosazujeme 10^5 N/m;

- Průřez dílčího vodiče A_s [m²];
- Doba prvního průtoku zkratového proudu T_{k1} [s];
- Typ lana AlFe, vybere se jedno ze seznamu předdefinovaných lan.

8.1.2 Výstupní hodnoty

Parametr	Hodnota	Jednotka
Podpěry musí vydržet nárazovou ohybovou sílu	2793.5581	N
Svorkový materiál pro ukotvení vodiče musí být dimenzován na ohybovou sílu	3636.1615	N
Horizontální výchylka rozpětí je	0.5554	m
Minimální vzdušná vzdálenost mezi vodiči	0.8892	m

Obr. 8-2 – Formulář „Výsledky výpočtu AlFe lana“

Jsou automaticky vygenerovány ve formuláři „Výsledky výpočtu AlFe lana“, které se zobrazí po kliknutí na tlačítko „Vypočítat“. Výstupní hodnoty jsou tyto:

- Dynamická síla působící na podpěry F_d [N];
- Minimální dynam. síla, na kterou musí být dimenzovány přístrojové svorky F_d [N];
- Horizontální výchylka rozpětí b_h [m];
- Minimální vzdušná vzdálenost mezi vodiči pro nejhorší případ $a_{\min}$ [m].

8.2 Program „Trubky“

Tento program je určen pro dimenzování trubkových přípojníc ze slitin hliníku a jejich podpěrek.

8.2.1 Vstupní hodnoty

Parametr	Hodnota	Jednotka
Typ zkratu	Třířázový	
Materiál trubek	EN AW-6060 T66	
Rozměry trubek	20x3	
I''_{k3}	20000	A
κ	1,7	
f	50	Hz
l	20	m
a	2	m
OZ	☒ ANO	
Uspořádání podpěr	A: vetknutí; B: prosté podepření	

Obr. 8-3 – Formulář vstupních hodnot programu „Trubky“

Vyplňují se do formuláře, který je zobrazen automaticky po otevření souboru. Pro korektní výpočet je nutné zadat potřebné vstupní hodnoty, jsou to:

- Typ zkratu, kde je na výběr trojfázový nebo dvojfázový zkrat;
- Materiál trubek, kde je na výběr 5 druhů materiálu.
- Rozměry trubek, kde je na výběr 57 rozměrů od 20x2 mm do 250x12 mm (první číslo znamená vnější průměr trubky, druhé číslo znamená tloušťku stěny trubky);
- Počáteční rázový zkratový proud I_{k3}'' [A], v případě dvoufázového zkratu I_{k2}'' [A];
- Součinitel pro výpočet nárazového zkratového proudu κ [-];
- Frekvence sítě f [Hz];
- Maximální osová vzdálenost mezi sousedními podpěrami l [m];
- Osová vzdálenost mezi hlavními vodiči a [m];
- Opětovné zapínání OZ, se kterým se musí počítat tam kde je používáno;
- Uspořádání podpěr, kde je na výběr z 5-ti uspořádání podle Příloha B.

8.2.2 Výstupní hodnoty

Výstupní hodnoty

Ohyb. nam. mezi hlavními vodiči	5238369237	N/m ²
Dovolený ohyb. nam. vodiče	235167785	N/m ²
Trubkové vodiče	☒ nejsou	odolné vůči působení zkratového proudu
Dynamická síla na podpěrky v místě A F_{dA}	2503	N
Dynamická síla na podpěrky v místě B F_{dB}	1502	N

Zpět

Obr. 8-4 – Formulář výstupních hodnot programu „Trubky“

Jsou automaticky vygenerovány ve formuláři „Výstupní hodnoty“, které se zobrazí po kliknutí na tlačítko „Vypočítat“. Výstupní hodnoty jsou tyto:

- Ohybové namáhání mezi hlavními vodiči σ_m [N/m²];
- Dovolené ohybové namáhání vodiče σ_{mdov} [N/m²];
- Srovnání ohyb. namáhání hlavního vodiče σ_m a jeho dovoleného namáhání σ_{mdov} ;
- Dynamická síla na podpěrky F_d [N] v místě A podle Příloha B;
- Dynamická síla na podpěrky F_d [N] v místě B podle Příloha B.

9 PRAKTICKÁ SIMULACE ZKRATOVÝCH PROUDŮ

Pro praktickou simulaci dynamických účinků zkratových proudů byla v rozvodně vybrána část obsahující trubkové přípojnice a část obsahující přípojnice tvořené lanovými AlFe vodiči. Jako část pro simulaci dynamických účinků na trubkové přípojnice byla vybrána část označená na výkresech (Příloha D, E, F) jako WA. Jde o podélné dělení přípojnic. Pro simulaci dynamických účinků zkratových proudů na lana AlFe byly vybrány lana na pozici 9 na výkresu č.3/1 (Příloha F), která jsou umístěna mezi PTP označené TA/02 a podpěrkami umístěnými na konstrukci u BTL viz také.

9.1 Rozvodna VVN 110 kV Slavkov u Brna

Jedná se o VVN rozvodnu 110/22kV typu „H“, která je napájena ze dvou vedení 110 kV. Jedno vedení V 5561 vede z rozvodny v Líšni, druhé vedení V 537 vede z rozvodny Sokolnice. Schémata rozvodny jsou uvedena v Příloze D, Příloze E a Příloze F.

Parametry rozvodny:

- Jmenovité napětí $U_n = 110 \text{ kV}$;
- Nejvyšší provozní napětí $U_{\max} = 123 \text{ kV}$;
- Zkratová odolnost $I_{k3}'' / i_p = 20 / 50 \text{ kA}$, $S_k = 3500 \text{ MVA}$;
- Jmenovitý proud přípojnic $I_n = 2000 \text{ A}$.

9.2 Simulace účinků zkratových proudů na trubkové přípojnice

Simulovanou částí jsou přípojnice podélného dělení označené WA na výkrese č. 1 (Příloha E), které jsou také vyznačeny šipkou (Obr 9-1).



Obr. 9-1 Ilustrační fotografie místa pro simulaci účinků trubkové přípojnice

9.2.1 Parametry trubkových přípojníc

Základem správného výpočtu je znalost rozměrů trubkových přípojníc a jejich materiálových vlastností (Tab. 9-1).

Tab. 9-1 – Parametry trubkových přípojníc

Materiál	AlMgSi0,5	
Norma	EN AW-6060	
Vnější průměr trubky D	mm	100
Tloušťka stěny trubky s	mm	5
Délka trubky l_t	m	16,6
Modul pružnosti E	N/m ²	70.10 ⁶
Minimální hodnota meze průtažnosti materiálu $R_{p0,2}$	N/m ²	170.10 ⁶
Hustota materiálu ρ	kg/m ³	2700

9.2.2 Vstupní hodnoty pro výpočet

Vstupními hodnotami, které musíme znát jsou:

- $I''_{k3} = 20 \text{ kA}$;
- $\kappa = \frac{i_p}{\sqrt{2} \cdot I''_{k3}} = \frac{50}{\sqrt{2} \cdot 20} = 1,76$;
- $a = 1,9 \text{ m}$;
- $f = 50 \text{ Hz}$;
- $l = 8,3 \text{ m}$;
- OZ – ano;
- Uspořádání podpěr – dvě pole o stej. rozm.

Obr. 9-2 Vstupní hodnoty simulace

9.2.3 Výstupní hodnoty výpočtu

Výstupními hodnotami jsou:

- $\sigma_m = 37,3 \cdot 10^6 \text{ N/m}^2$;
- $\sigma_{mdov} = 214,8 \cdot 10^6 \text{ N/m}^2$;
- $\sigma_m < \sigma_{mdov}$ - příp. odolá dyn. úč. zkr. proudu;
- $F_{dA} = 1406 \text{ N}$ - síla působící na krajní podp.;
- $F_{dB} = 4688 \text{ N}$ – síla působící na vnitřní podp.

Obr. 9-3 Výstupní hodnoty simulace

9.2.4 Zhodnocení výsledků

Použité podpěrky mají jmenovité dynamické namáhání přípojnícových svorek 6 kN, takže vyhovují kontrole na dynamické účinky zkratového proudu, navíc proud neprochází celou délkou přípojníc, ale jen délkou 9 m, která odpovídá distanci mezi kontakty pantografů QWA1 a QWA2 na jednotlivých fázích přípojnícového systému. Při zkratu (např. na vstupních svorkách transformátoru VVN) působí elektromagnetické síly mezi vodiči jednotlivých fází přípojníc pouze v délce 5,2 m, takže dojde k dalšímu zmenšení sil působících na podpěrky.

9.3 Simulace účinků zkratových proudů na AlFe lana

Simulovanou částí jsou AlFe lana na pozici 9 na výkrese č. 3/2 (Příloha F), která je také označena šipkou (Obr 9-4).



Obr. 9-4 Ilustrační fotografie místa pro simulaci účinků na AlFe lana

9.3.1 Parametry AlFe lana

Pro výpočet potřebujeme znát parametry použitého lana AlFe 350/59 a jeho délku (Tab. 9-2).

Tab. 9-2 – Parametry AlFe lana

Typ lana	AlFe 350/59	
Norma	STN 024210	
Vnější průměr trubky lana	mm	26,39
Tloušťka stěny trubky s	mm	5
Jmenovitá hmotnost	kg/m	1453,01
Modul pružnosti E	Mpa	74637

9.3.2 Vstupní hodnoty pro výpočet

Vstupními hodnotami, které musíme zadat jsou:

- $I''_{k3} = 20 \text{ kA}$;
- $a = 1,9 \text{ m}$;
- Délka vodiče $l = 2,6 \text{ m}$;
- Délka závěsného izolátoru $l_i = 0 \text{ m}$;
- Statická síla $F_{st} = 100 \text{ N}$;
- Pérová konstanta $S = 100000 \text{ N/m}$;
- Průřez lana $A_s = 410,76 \text{ mm}^2$;
- Doba trvání zkr. proudu $T_{k1} = 0,25 \text{ s}$;
- Typ AlFe lana – 350/59.

Obr. 9-5 Vstupní hodnoty simulace

Hodnota pérové konstanty $S = 100000 \text{ N/m}$ a hodnota $T_{k1} = 0,25 \text{ s}$ ($T_{k1} = 0,4T$) je převzata resp. přepočítána z [4]. Tyto hodnoty používáme pokud neznáme přesné hodnoty těchto veličin.

9.3.3 Výstupní hodnoty výpočtu

Obr. 9-6 Výstupní hodnoty simulace

Výstupními hodnotami jsou:

- Síla, která působí na přípojná místa tuhých vodičů $F_f = 1296 \text{ N}$;
- Síla, která působí na svorky $F = 1296 \text{ N}$;
- Horizontální výchylka rozpětí je $b_h = 0,142 \text{ m}$;
- Minimální vzdušná vzdálenost mezi vodiči $a_{\min} = 1,61 \text{ m}$.

9.3.4 Zhodnocení výsledků

Použité podpěrky mají jmenovité dovolené dynamické zatížení 6 kN , stejně jako izolátor PTP TA/02. Síla působící na místa připojení vodičů AlFe $F_f = 1296 \text{ N}$ je menší než síla F_{dyn} , kterou udává výrobce zařízení, takže jsou tato zařízení odolná vůči působení zkratového proudu.

10 ZÁVĚR

V úvodu práce byly teoreticky popsány zásady pro výpočet zkratových proudů podle normy ČSN 60909-0 a také zjednodušující předpoklady, při jejichž dodržení se dobereme výsledků s přijatelnou přesností. Jsou zde také uvedeny význačné hodnoty zkratového proudu důležité pro dimenzování elektrických zařízení. Tyto hodnoty patří k nejdůležitějším vstupním datům, které nám slouží k výpočtu dynamických a tepelných účinků zkratového proudu. Teoretické postupy výpočtu dynamických a tepelných účinků zkratového proudu jsou popsány v další části práce. Tyto mají za cíl vytvořit teoretické podklady pro vytvoření programů pro výpočet dynamických účinků zkratových proudů, které navazují na zpracovanou teorii.

Programy pro simulaci dynamických účinků zkratových proudů jsou vytvořeny pro potřeby dimenzování konstrukčních prvků v rozvodnách, především ve venkovních rozvodnách VVN. Tyto programy jsou určeny pro aplikaci na trubkové vodiče z hliníkových slitin, které se používají v VVN rozvodnách velmi často pro konstrukci přípojníc a také na ocelohliníková lana AlFe, které se velmi často používají ve venkovních rozvodnách VVN pro propojení jednotlivých zařízení rozvodny. Byly vytvořeny v programu MS Excel-Visual Basic, ve kterém byly vytvořeny formuláře pro vstupní a výstupní hodnoty, které zvyšují uživatelský komfort při zadávání vstupních hodnot a odečítání výstupních hodnot programu.

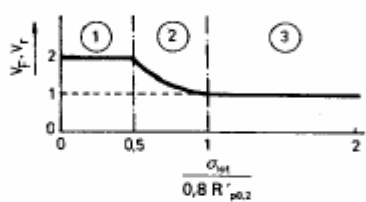
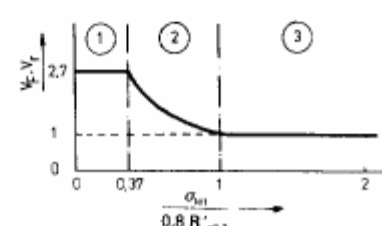
V poslední část práce se zabývá praktickou simulací rozvodny VVN 110/22 kV ve Slavkově u Brna, jejíž rekonstrukci provedla firma JM montáže, s.r.o., která poskytla mnoho důležitých podkladů, bez kterých by simulace nebyla možná. V této rozvodně byly vybrány dvě části, u kterých došlo k simulaci. Jednou částí je pole podélného dělení přípojníc, tvořené trubkami AlMgSi0,5, a druhou částí je propojení přístrojových transformátorů proudu a podpěrek u transformovny, které je realizováno ocelohliníkovými lany AlFe 350/59.

Obě simulované části VVN rozvodny odolávají působení dynamických účinků zkratových proudů. Podpěrky pro vodiče AlFe a svorky PTP mají několikanásobnou rezervu při působení dynamických sil. U přípojníc z trubek je přesný výpočet komplikovaný kvůli nesymetrickému rozmístění pantografů, které uzavírají proudový okruh. Proto je počítáno s nejhorším případem při zanedbání snížení elektrodynamických sil vlivem zkrácení proudové dráhy v trubkách oproti jejich celkové vzdálenosti, s níž je počítáno zatížení podpěrek.

POUŽITÁ LITERATURA

- [1] MEŠTER, M., Výpočet zkratových proudů, Košice 2005, 94 stran
- [2] ORSÁGOVÁ, J., Rozvodná zařízení, UEEN VUT Brno, 148 stran
- [3] ČSN EN 60909-0, Zkratové proudy v trojfázových střídavých soustavách, 2002, 58 stran
- [4] ČSN EN 60865-1, Výpočet účinků zkratových proudů, 1993, 51 stran
- [5] CHMELA, M., Přechodné jevy, UEEN VUT Brno, 2006, prezentace k přednáškám
- [6] ČERNÝ, J., Programování v excelu, GRADA, 2004, 223 stran
- [7] ČEZ DISTRIBUCE, A.S., Technická politika-Rozvoj distribučních sítí a technologických prvků v DSO, 2007, 35 stran
- [8] LANÁ, S.R.O., Katalog lanových vodičů, www.lana.sk
- [9] JM MONTÁŽE, S.R.O., Výkresy rozvodny VVN Slavkov u Brna, www.jm-montaze.cz
- [10] SERW, S.R.O., Technologické zařízení rozvoden, www.serw.cz

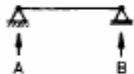
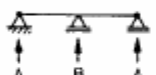
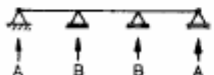
Příloha A Maximální možné hodnoty $(V_\sigma \cdot V_r)$, $(V_{\sigma s} \cdot V_r)$, $(V_F \cdot V_r)$

Druh zkratu	$(V_\sigma \cdot V_r), (V_{\sigma s} \cdot V_r)$		$(V_F \cdot V_r)$ bez a s 3-fázového OZ	
	bez 3-fázovým OZ	s 3-fázovým OZ		
mezi dvěma vodiči	1,0	1,8	$2,0$ pro $\frac{\sigma_{tot}}{0,8 R_{p0,2}} \leq 0,5$ $\frac{0,8 R_{p0,2}}{\sigma_{tot}}$ pro $0,5 < \frac{\sigma_{tot}}{0,8 R_{p0,2}} < 1,0$ $1,0$ pro $1,0 \leq \frac{\sigma_{tot}}{0,8 R_{p0,2}}$	obla ① ② ③
				
3-fázový	1,0	1,8	$2,7$ pro $\frac{\sigma_{tot}}{0,8 R_{p0,2}} \leq 0,370$ $\frac{0,8 R_{p0,2}}{\sigma_{tot}}$ pro $0,370 < \frac{\sigma_{tot}}{0,8 R_{p0,2}} < 1,0$ $1,0$ pro $1,0 \leq \frac{\sigma_{tot}}{0,8 R_{p0,2}}$	oblas ① ② ③
				

Příloha B Průřezové moduly složených obdélníkových vodičů

Uspořádání vodičů		Rozměr vodiče [mm x mm]											
		50x5	50x10	63x5	63x10	80x5	80x10	100x10	100x16	125x10	160x10	160x16	200x10
	N, V	4,17	8,30	6,6	13,2	10,6	21,4	33,4	53,2	52	85,2	136,6	133,2
	N	0,42	1,70	0,52	2,10	0,7	2,7	3,3	8,5	4,2	5,3	13,6	6,7
	V	1,1	4,3	1,4	3,4	1,7	6,9	8,6	22,1	10,8	14,1	35,4	17,5

Příloha C Součinitelé α, β, γ pro různé uspořádání podpěr

Typ nosníku a způsob upevnění			Součinitel:		
			α	β	γ
nosník o jednom poli	A a B: prosté podepření		A: 0,5 B: 0,5	1,0	1,57
	A: vetknutí B: prosté podepření		A: 0,625 B: 0,375	0,73	2,45
	A a B: vetknutí		A: 0,5 B: 0,5	0,5	3,56
nosník o více polích o stejných rozpětích	2 pole		A: 0,375 B: 1,25	0,73	2,45
	3 nebo více polí		A: 0,4 B: 1,1	0,73	3,56

Příloha D Jednopolové schéma rozvodny 110 kV

- viz výkres č. 6

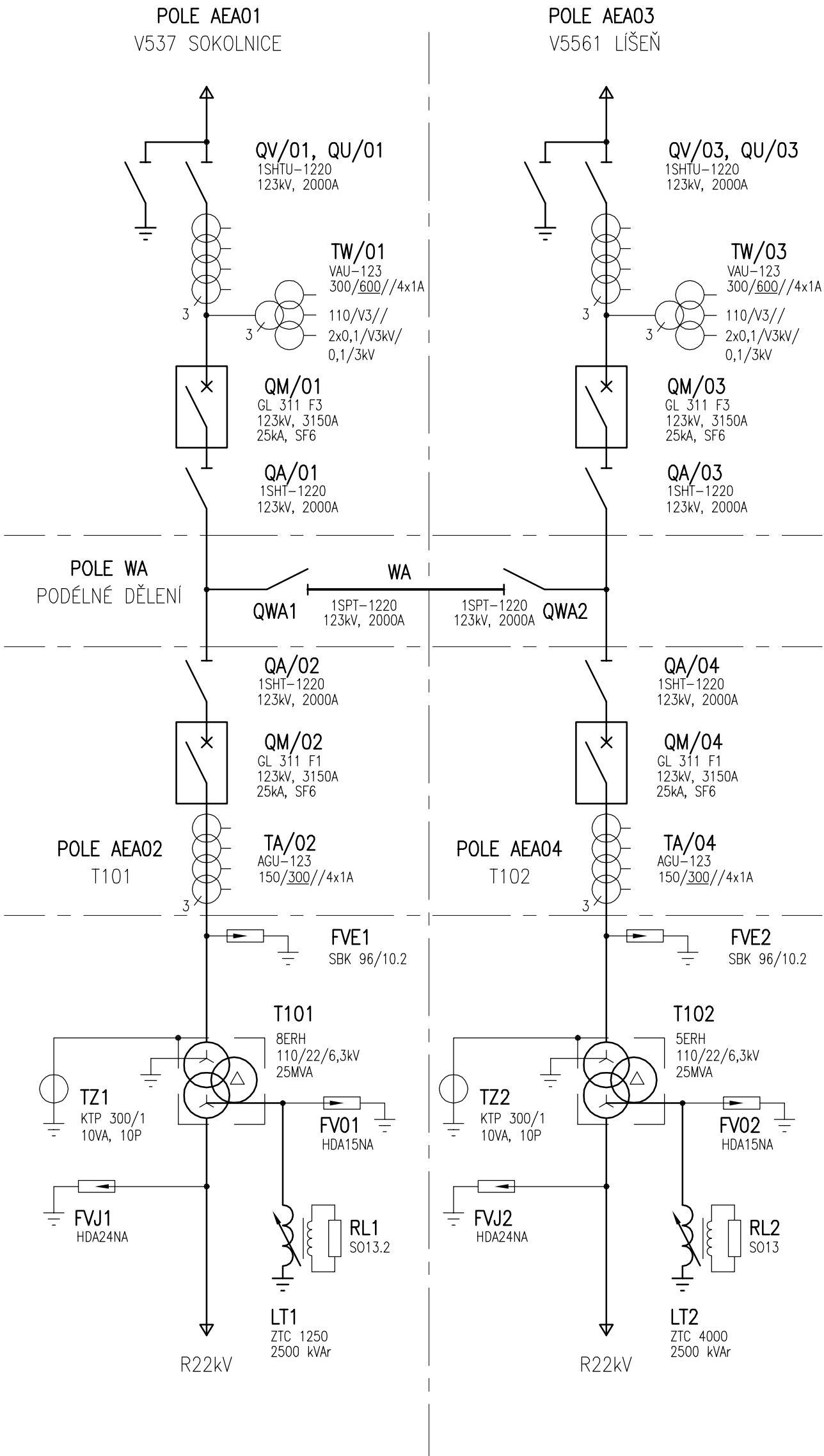
Příloha E Půdorys technologie R 110 kV

- viz výkres č. 1

Příloha F Montážní řezy technologie

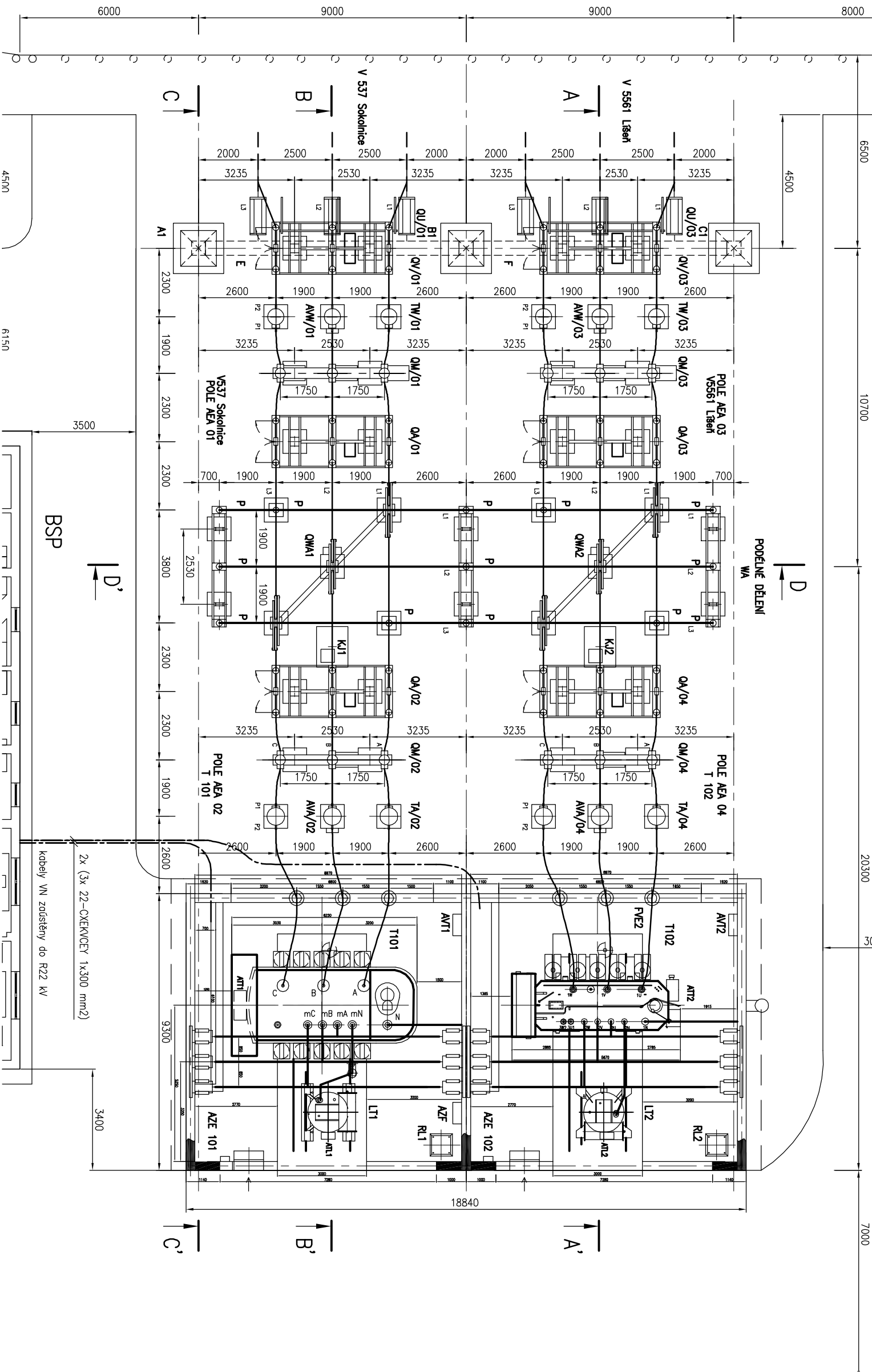
- viz výkres č. 3/2

R 110 kV – Slavkov



- LEGENDA :
- SOUSTAVA
 - JMENOVIÉ NAPĚTÍ
 - NEJVYŠŠÍ PROVOZNÍ NAPĚTÍ
 - JMENOVIÉ KMITOČET
 - ZKRATOVÁ ODOLNOST
 - JMENOVIÉ PROUD PŘÍPOJNIC
- 3~50Hz, 110kV / TT
- 110 kV
- 123 kV
- 50 Hz
- 20/50 kA (3500MVA)
- 2000 A

	JM – montáže, s.r.o.			Pořadové číslo :		
	Akce :	Rekonstrukce	Zodavatel :	ECR	6	
	Místo :	R 110/22 kV – Slavkov	Stupeň PD :	DPS		
	Objekt :	D – Přehledové výkresy	Vypracoval :	Ing. Matuška Marcel		
			Přezkoumal :	Ing. Matuška Marcel		
Název :	JEDNOPÓLOVÉ SCHEMA R110kV – NOVÉ			Číslo zakázky :	07077	
TR 110/22 kV SLAVKOV U BRNA			Datum :			04/2006
			Počet listů :			1
Měřtko : —				Archivní číslo : PD_07077_0_036		

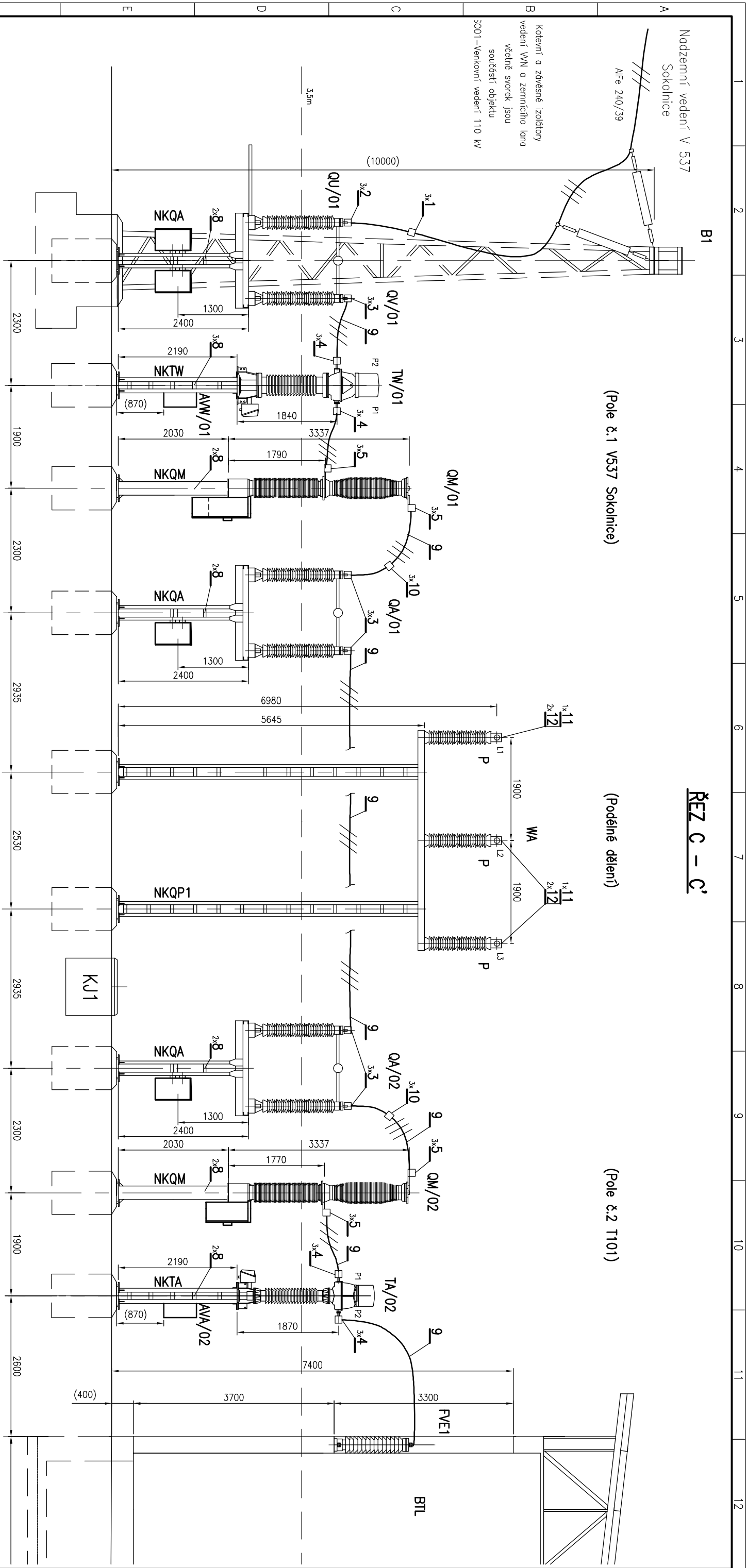


- LEGENDA :
- | | | | |
|---------------|--|----------|----------------------------------|
| QA/--- | TROJPOLOVÝ ODPŮJOVAČ PŘÍPOJNICOVÝ 123 kV | A-,B-,C- | PŘÍHRADOVÝ STOŽÁR |
| QV/---,QU/--- | TROJPOLOVÝ VYVODOVÝ ODPŮJOVAČ S UZEMNOVAČEM 123 kV | E,F | BŘEVNO |
| QM/--- | TROJPOLOVÝ VYPÍNAČ 123 kV | FVE1,2 | BLESKOUISTKA 123 kV |
| TA/--- | PŘÍSTROJOVÝ TRANSFORMÁTOR PROUDU 123 kV | T101,2 | TRANSFORMÁTOR 25 MVA |
| TW/--- | PŘÍSTROJOVÝ TRANSFORMÁTOR KOMBINOVANÝ 123 kV | LT1,2 | ZHAŠEČI TLUMIVKA 2500 kVA |
| AM/--- | PROPOJOVACÍ SKŘÍŇ PTK | RL1,2 | STAVEBNICOVÝ ODPORNIK SO13,2 |
| AVA/--- | PROPOJOVACÍ SKŘÍŇ PTP | AZE101,2 | ROZVADĚČ OSVĚTLENÍ |
| P | PODPĚRKA 123 kV | AT1,2 | PROPOJOVACÍ SKŘÍŇ TRANSFORMÁTORU |
| | | ATL1,2 | HLAVNÍ SKŘÍŇ TLUMIVKY |

POZNÁMKA:

Výzvočené řezy jsou na výkresch "Montážní řez technologie".
MUSÍ BÝT DODRŽENA VZDÁLENOST VŠECH ŽVÝCH ČÁSTÍ OD ZEMĚ 3,5 m A MEZI ŽVÝMI ČÁSTMI 1,2 m !

			Přidatové číslo : 1			
JM – montáže, s.r.o.			Zodpovědnost : ECR			
Adresa : Režisbuvka			Stupeň PD : DPS			
Místo : R 110/22 kV – Smolov			Výpracovní : Ing. Burdák JřT			
Objekt : PS 09 – Rozvodna 110 kV			Přezkoumání : Ing. Burdák JřT			
Název :			Schválil : Ing. Stanislav Zelenka			
Měřítko : 1:100			Číslo zakázky : 0707			
PŮDORYS TECHNOLOGIE R110 kV			Datum : 04/2006			
			Počet listů : 1			
			Archivní číslo : PD_07077_05_347			



SEZNAM SPOJOVACÍHO MATERIÁLU : SEZNAM PŘÍSTROJŮ A KONSTRUKCÍ : SEZNAM PŘÍSTROJŮ A KONSTRUKCÍ :

G														
POZ.	MÁZEV SOUČÁSTI	TPP SOUČÁSTI	HMOTN.(kg)	VÝKRES	OZNAČENÍ	MÁZEV	TPP	HMOTN.	VÝKRES	OZNAČENÍ	MÁZEV	TPP	HMOTN.	VÝKRES
1	S. PRO ZKRATOVACÍ SOUPRAVY NA A1Fe LANO Ø21,75	409 150.1	1,56	11/52	QM/01	VYPÍNAČ	AREVA / GL 311 F3	1462	8/1	NKTA	KONSTRUKCE POD PTA	3 ks STOLÍČEK	–	–
2	P. S. NA ČU ČEP Ø36 A A1Fe LANO Ø21,75	321 319.6	2,56	11/35	QM/02	VYPÍNAČ	AREVA / GL 311 F1	1182	8/2	NKCA	KONSTRUKCE POD ODPOLJOVAČ PŘÍPOJNICOVÝ	SERW / 3SHT 1220	–	–
3	P. S. NA ČU ČEP Ø36 A A1Fe LANO Ø26,39	321 337.1	2,91	11/36	TM/01	PŘÍSTROJ. TRANSFORMÁTOR KOMBINOVANÝ	KONČÁR / VAU 123	660	8/3	NKCA	KONSTRUKCE POD ODPOLJOVAČ VÝVODOVÝ	SERW / 3SHTU 1220	–	–
4	P. S. NA A1 ČEP Ø30 A A1Fe LANO Ø26,39	321 238	2,96	–	TM/02	PŘÍSTROJ. TRANSFORMÁTOR PROUDOVÝ	KONČÁR / AGU 123	400	8/4	NKCP1	KONSTRUKCE PRO TŘI PODPĚRKY	–	–	–
5	P. S. S PRAPORCEM 200x100 NA A1Fe LANO Ø26,39	414 203	2,57	11/55	AWW/01	PROPOJOVACÍ SKŘIŇ PTK	–	–	12/16	B1	PŘÍHRADOVÝ STOŽÁR	–	–	–
8	NEREZOVÁ PŘÍCHYTKA NA ZKRATOVACÍ SOUPRAVU 80x110	–	1,05	–	AWA/02	PROPOJOVACÍ SKŘIŇ PTA	–	–	12/17					
9	LANO A1Fe 350/59 Ø26,39	–	1,453/m	–	QA/01,02	ODPOLJOVAČ PŘÍPOJNICOVÝ	SERW / 3SHT 1220	1005	8/6					
10	S. PRO ZKRATOVACÍ SOUPRAVY NA A1Fe LANO Ø26,39	409 150	1,4	11/53	QV,QU/01	ODPOLJOVAČ VÝVODOVÝ S UZEMŇOVAČEM	SERW / 3SHTU 1220	1100	8/7					
11	POD. SVORKA PENNA PRO TRUBKU Ø100 A A1 PŘÍRUBU	341 100	3,00	–	P	PODPĚRKA	SERW / C10–550	100	8/8					
12	POD. SVORKA KLIZNÁ PRO TRUBKU Ø100 A A1 PŘÍRUBU	341 102	3,20	–	FEI1	BLESKOVLÍSTKA 123 kV (PS04)	TRIDELTA	–	–					
 JM – montáže, s.r.o. Akce : Rekonstrukce Místo : R 110/22 kV – Stavek Objekt : PS 09 – Rozvodna 110 kV Zadavatel : ECR Stupeň PD : DSP Vypracoval : Ing. Buriňek Jirř Poradové číslo : 3/2 Číslo zakázky : 07077														

POZNÁMKA: MUSÍ BÝT DODRŽENA VZDÁLENOST VŠECH ŽIVÝCH ČÁSTÍ OD ZEMĚ 3,5 m A MEZI ŽIVÝMI ČÁSTMI 1,2 m. Řez je vyřezán na výkrese "Přodový technologie AEA 110kV".						
BTL	BUDOVA TRANSFORMATORŮ A TLUMIVK	—	—	Název : ŘEZ C-C' MONTÁŽNÍ ŘEZY TECHNOLOGIE Datum : 04/2006 Počet listů : 3 Archivní číslo : PD_070707_05_349		
NKGM	KONSTRUKCE POD VYPÍNAČ	2 ks STOLUČEK	—			
NKTW	KONSTRUKCE POD PTK	3 ks STOLUČEK	—			
			Matřiko : 1,50			

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
---	---	---	---	---	---	---	---	---	----	----	----