

Technická univerzita v Košiciach
Fakulta elektrotechniky a informatiky
Katedra elektroenergetiky

Modelovanie v prostredí EMTP – ATP

Dušan Medved' – Marek Hvizdoš

Košice 2011

Modelovanie v prostredí EMTP – ATP

Copyright ©: Ing. Dušan Medved', PhD.
Ing. Marek Hvizdoš, PhD.

Recenzent: Ing. Jaroslav Džmura, PhD.

Vydala: Technická univerzita v Košiciach, 2011

ISBN 978-80-553-0776-3

Všetky práva vyhradené. Vyrobené na Slovensku.

Táto publikácia môže byť ďalej reprodukováaná pre výučbové a nekomerčné účely.

Obsah

PREDHOVOR	4
1 MODELOVANIE PRECHODNÝCH JAVOV	5
2 OBVODOVÉ PRVKY	12
3 NELINEÁRNE PRVKY	16
4 VEDENIA	25
5 TOČIVÉ ELEKTRICKÉ STROJE	46
6 TRANSFORMÁTORY	53
7 MODEL ČASTI ELEKTRIZAČNEJ SÚSTAVY	64
ZOZNAM POUŽITEJ LITERATÚRY	74

PREDHOVOR

Učebný text „Modelovanie v prostredí EMTP – ATP“ je určený predovšetkým pre študentov bakalárskeho a inžinierskeho štúdia odboru Elektrotechnika v študijnom programe Elektroenergetika na FEI TU v Košiciach. Úlohou tejto publikácie je sprístupniť a predstaviť užívateľovi možnosti využitia tohto simulačného nástroja v prípadoch, ktoré prináša prax, predovšetkým pri riešení prechodných dejov v elektrizačnej sústave.

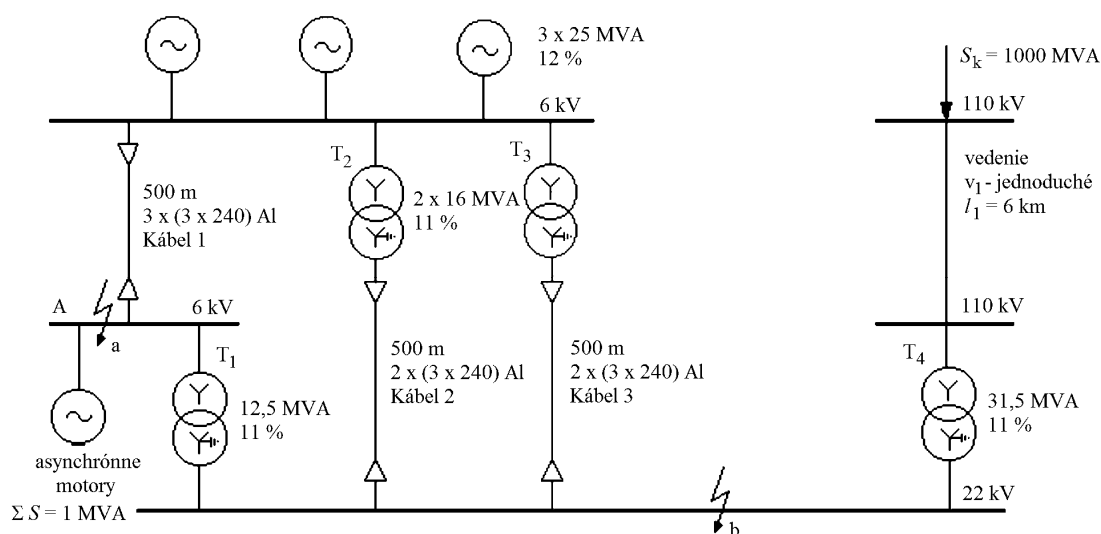
Na začiatku sú uvedené základné pojmy problematiky prechodných dejov a stručná charakteristika programového prostredia EMTP – ATP. V ďalšej časti popísaný spôsob, akým sa modelujú jednotlivé obvody prvkov. Následne je učebný text zameraný na vytváranie modelov zložitejších obvodov, ktoré vzniknú spojením jednotlivých prvkov.

1 MODELOVANIE PRECHODNÝCH JAVOV

1.1 Prechodné deje v elektrizačných sústavách

Prechodné deje v elektrizačných sústavách (ES) vznikajú pri prechode z jedného ustáleného stavu ES do nového prevádzkového stavu. K narušeniu ustáleného stavu ES môže dôjsť v dôsledku manipulácií uskutočnených v ES, pri zmene zaťaženia ES alebo v dôsledku poruchy (skrat, vypadnutie generátora zo synchronizmu a pod.).

V závislosti od druhu prechodného deja je potrebné použiť vhodný model ES. Pri modeloch vedení ide o rozhodnutie, či použiť model so sústredenými alebo rozloženými parametrami. Príklad schémy elektrizačnej sústavy je uvedený na obr. 1.1.



Obr. 1.1 Príklad schémy elektrizačnej sústavy

V elektrizačnej sústave sa prejavujú najrýchlejšími zmenami **vlnové prechodné deje**, ktorých doba trvania sa udáva v mikrosekundách až milisekundách. Priebeh zmien prevádzkových parametrov je taký rýchly, že nie je možné zanedbať rýchlosť šírenia elektromagnetických vln v jednotlivých článkoch ES a tieto články sa musia pri výpočte nahradzovať **modelmi s rozloženými parametrami**. Matematický popis týchto javov vedie k **parciálnym diferenciálnym rovniciam**.

Pomalšie sú **elektromagnetické prechodné deje** s dobou trvania rádovo desiatiny sekundy. Vzhľadom na menšie rýchlosti ich priebehov je možné zanedbať šírenie elektromagnetických vln vo všetkých článkoch ES. Preto sa dajú modelovať ako **články so sústredenými parametrami**. Behom trvania elektromagnetického prechodného deja sa môžu zanedbať zmeny otáčok točiacich sa strojov a predpokladať pri výpočtoch konštantné uhlové rýchlosti elektrických točivých strojov. To umožňuje chápať ES ako čisto elektrický systém, bez vplyvu mechanických častí na priebeh prechodného deja. Tieto zjednodušenia potom umožňujú z matematického hľadiska použiť **obyčajné diferenciálne rovnice** s časom ako jedinou nezávislou premennou.

Tretiu skupinu prechodných dejov tvoria **elektromechanické prechodné deje**, ktorých doba trvania sa mení v širokých rozsahoch, rádovo od desiatín sekundy až po desiatky sekundy. Vzhľadom k rýchlosti priebehu prechodného deja je opäť možné zanedbať šírenie elektromagnetických vln a väčšinou i elektromagnetické zotrvačnosti článkov.

Elektromechanické prechodné deje sú charakterizované predovšetkým mechanickým pohybom rotorov generátorov. Pri riešení elektromechanických prechodných dejov sa vychádza z mechanických zotrvačných vlastností elektrických točivých strojov, ďalej mechanizmov, ktoré sú spojené s ich rotormi a z elektrických väzieb medzi všetkými článkami ES. Obvody generátorov sú matematicky popísané diferenciálnymi rovnicami. Elektrická sústava, ktorá prepojuje paralelne pracujúce generátory, je popísaná algebrickými rovnicami. Odbery sú popísané diferenciálnymi rovnicami, v prípade ich dynamických charakteristík a v prípade, keď postačuje uvažovať lineárne charakteristiky, vedie matematický popis na algebrické rovnice.

Elektromagnetické a elektromechanické prechodné deje prebiehajú pri prechode z jedného ustáleného stavu ES do nového súčasne a predstavujú jeden prechodný jav. Avšak v počiatočnom štádiu prechodného procesu určujú charakter jeho priebehu elektromagnetické prechodné deje. Elektromechanické javy sa neprejavia v dôsledku veľkej mechanickej zotrvačnosti paralelne pracujúcich strojov ES. Programom EMTP – ATP (Electromagnetic Transient Program – Alternative Transient Program) bude riešená už spomenutá druhá skupina prechodných dejov, teda elektromagnetických, s využitím preprocesora ATPDraw a grafického postprocesora PlotXY.

Skratky sú poruchy vznikajúce pri spojení nakrátko dvoch alebo troch fáz a v sústavách s uzemnenou nulou a taktiež pri spojení jednej alebo viacerých fáz so zemou (resp. so stredným vodičom). Pri vzniku skratu sa v ES značne znižuje impedancia medzi miestom skratu a napäťovým zdrojom. To má za následok vzrast prúdu vo vetvách a pokles napätia v uzloch, predovšetkým v uzloch elektricky blízkych k miestu skratu. Pôsobenie skratových prúdov je síce krátkodobé, ale vzhľadom na veľkosti tepelných a dynamických účinkov prúdov nebezpečné. Značné poklesy napätia vznikajúce pri skratoch môžu pôsobiť rušivo na chod mnohých elektrických spotrebičov. Môžu byť navyše príčinou narušenia stability paralelného chodu generátorov, čo je vlastne jeden z najnebezpečnejších následkov skratov, pretože postihuje prevádzku celej ES.

V rozvodoch vysokého napätia môžu vzniknúť **zemné spojenia**, ktoré môžu pôsobiť na paralelné telekomunikačné vedenie i na zariadenia uložené v zemi. Zemné spojenie je nebezpečné pre izoláciu fáz a nulových článkov ES, pretože pri ňom fázové napätia dosahujú veľkosti združených napätí a napätie uzla transformátora vzrastie na veľkosť fázového napätia. Pri prerušovanom zemnom spojení sa napäťové namáhanie izolácie ešte mnohonásobne zväčšuje.

1.2 Modelovanie prvkov elektrizačnej sústavy v prostredí EMTP – ATP

Vývoj nových ochranných techník vhodných na detekciu porúch v elektrizačných sústavách nevyhnutne vyžaduje presnú simuláciu prechodných dejov týkajúcich sa týchto porúch. Aby bolo možné simulovať poruchu, je potrebné vytvoriť jej správny náhradný model. Nie je jednoduché nájsť presný a nie príliš zložitý model, ktorý zohľadňuje vlastnosti každého typu poruchy.

Alternative Transient Program (ATP), bol špeciálne vyvinutý pre riešenie problémov energetických systémov. Je používaný na riešenie algebrických, diferenciálnych a parciálnych diferenciálnych rovníc, ktoré popisujú obvody skladajúce sa z ľubovoľne prepojených prvkov. Stanovuje tak časový priebeh elektrických veličín charakterizujúcich pomery v elektrických sieťach.

Pri simulácii týmto programom sa najprv vytvorí súbor s príponou *.adp, t.j. schéma zapojenia, v ktorej sa nastavujú jednotlivé parametre. Podľa schémy program vytvorí súbor

s príponou *.atp, ktorý je vstupným súborom pre uskutočnenie výpočtu. Počas výpočtu sa vytvárajú tri súbory. Prvý súbor je s príponou *.pl4, ktorý je určený pre výslednú grafickú interpretáciu funkčných závislostí. Vypočítané priebehy je možné zobrazit' využitím podprogramu PlotXY. Ďalším súborom je *.dbg súbor, ktorý v prípade problémov pri výpočte upozorní užívateľa na možný zdroj chyby. Posledným je *.lis súbor. V tomto súbore sú uložené všetky premenné vo výpočte, názvy zdrojových súborov a výpis počítaných veličín.

1.2.2 Simulácia prechodných javov v prostredí EMTP – ATP

1.2.2.1 Popis programu EMTP – ATP

Pôvodné algoritmy programu vznikali pre počítače triedy mainframe so stĺpcovo orientovanou štruktúrou vstupných dát, ktoré pracovali s diernymi štítkami. Základným jazykom zdrojového programu ATP bol FORTRAN, neskôr boli pre rôzne typy počítačov a pracovných staníc s rôznymi platformami operačných systémov zhotovené hardvérovo závislé prekladače. V tomto programe môžu byť simulované siete a kontrolné systémy rôznej štruktúry. Program má rozsiahle možnosti modelovania a ďalšie pridané prostriedky popri výpočte prechodných javov. Diferenciálne funkcie v časovej oblasti sú riešené základnými lichobežníkovými pravidlami integrácie. Štandardne je možné modelovať sieť s 250 uzlami, 300 lineárnymi vetvami, 40 vypínačmi, 50 zdrojmi. Program je možné využiť v jedno aj viacfázových sieťach pre výpočty:

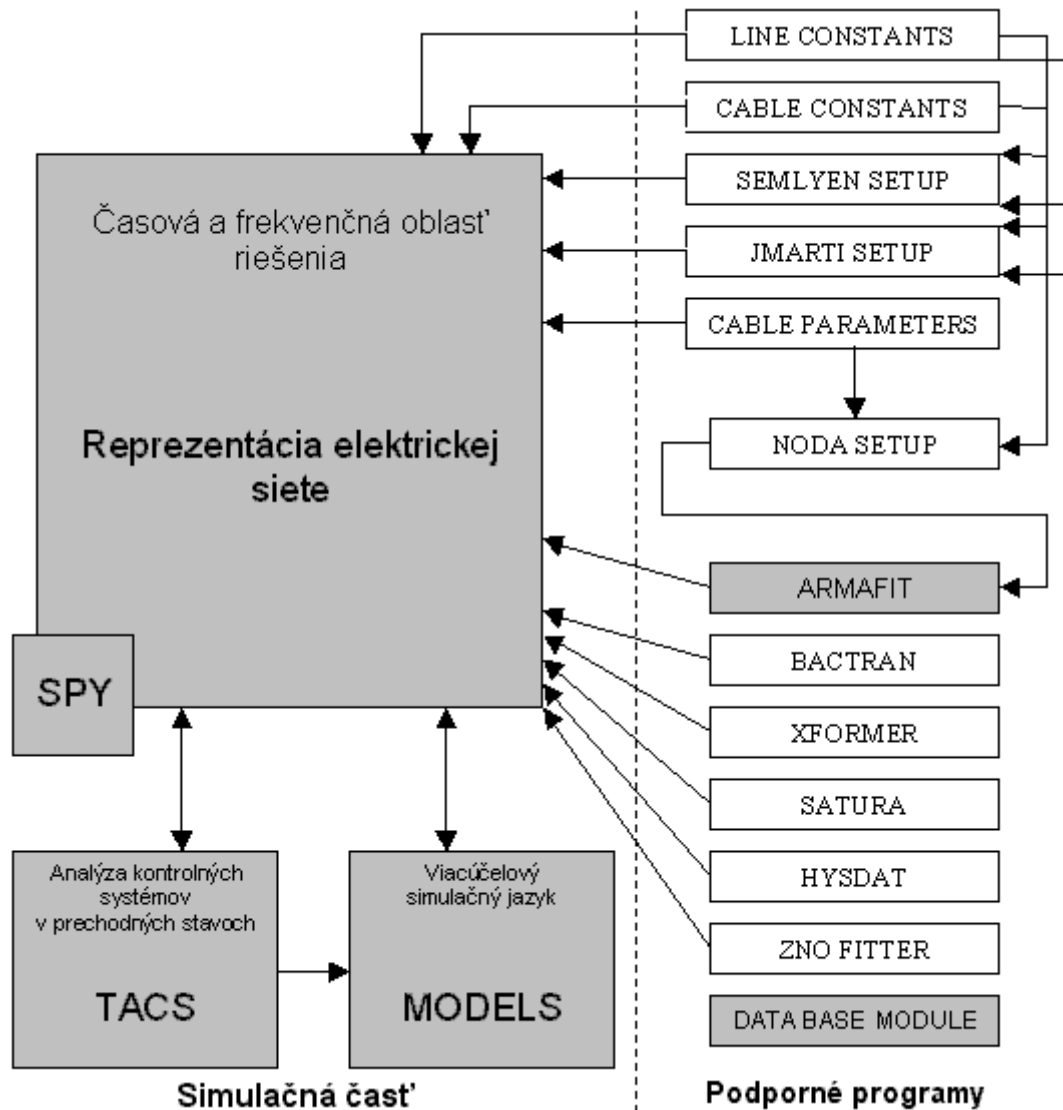
- ustálených hodnôt fázorov v lineárnych aj nelineárnych systémoch s jednosmernými a striedavými zdrojmi jednej alebo viacerých frekvencií,
- ustálených fázorov v systémoch, kde je frekvencia striedavých zdrojov plynulo premenná po krokoch daných programom – frekvenčné charakteristiky,
- výpočty energií uvoľnených alebo akumulovaných v prvkoch, výkony,
- dynamiky kontrolného systému. Modelovanie kontrolných systémov umožňujú procedúry TACS (Transient Analysis of Control Systems), ktoré vykonávajú analýzu kontrolných systémov v prechodných stavoch. Podprogram umožňuje simulovať prenosové funkcie, logické obvody, integrátory, obmedzovače a ďalšie podobné bloky. Môžu samostatne spracovávať vstupné hodnoty z elektrickej siete a generovať signály pre kontrolné a riadiace účely,
- elektromagnetických prechodných javov a torznej dynamiky hriadeľa rotora generátora alebo turbíny. S využitím procedúr TACS možno napríklad riešiť rýchlostné regulátory turbosústrojenstva.

Program EMTP – ATP využíva pre riešenie algebrických, diferenciálnych a parciálnych diferenciálnych rovníc, ktoré popisujú obvody skladajúce sa z ľubovoľne prepojených článkov elektrickej siete, tieto prvky:

- prvky so sústredenými parametrami R , L , C ,
- prvky so vzájomnou väzbou (transformátory, vedenia),
- viacfázové prenosové vedenia s priestorovo sústredenými aj rozloženými parametrami, ktoré môžu byť frekvenčne závislé,
- nelineárne prvky R , L , C ,
- spínače s premenlivými spínacími podmienkami určené na simuláciu ističov, iskríšť, diód, tyristorov a iných zmien konektivity siete,
- napäťové a prúdové zdroje rôznych frekvencií. Okrem štandardných matematických funkcií možno zadefinovať zdroje ako funkcie času bod po bode,
- model trojfázového synchronného stroja s rotorom, budiacim vinutím, tlmiacim vinutím a pružným hmotnostným systémom na simuláciu torzných oscilácií,

- modely univerzálneho stroja na simuláciu trojfázového indukčného stroja, jednofázového striedavého stroja a jednosmerných strojov,
- prvky kontrolného systému a snímacích bodov.

1.2.2.2 Prostriedky programu EMTP – ATP



Obr. 1.2 Moduly programu EMTP – ATP

EMTP – ATP, ako univerzálny program na digitálnu simuláciu elektromagnetických a elektromechanických prechodných javov v silových systémoch, má rozsiahle modelovacie schopnosti. Popri aktuálnych simulačných moduloch tu existuje niekoľko nesimulačných podporných programov, ktoré môžu byť použité na generovanie dátových modelov ako sú napr. výpočet parametrov vedení alebo derivácia väzobne spojených RL matíc na reprezentáciu viacfázových viacvinuťových transformátorov v časovej oblasti simulácie. Schematický prehľad dostupných simulačných modulov a podporných programov s ich vzájomnou interakciou je na obr. 1.2.

TACS je simulačný modul na analýzu kontrolných systémov v časovej oblasti. Riadiace systémy sú reprezentované použitím blokových diagramov. Spolupráca medzi elektrickou sieťou a TACS je založená na výmene signálov ako sú informácie o uzlovom

napätí, prúde vypínačov, polohy vypínačov, časovo premenných odporoch, napät'ových a prúdových zdrojoch. TACS ako simulačný modul bol pôvodne vyvinutý na simuláciu riadenia vysokonapät'ových jednosmerných prevodníkov, použitie je však dnes rozsiahlejšie. Používa sa aj na simuláciu budiacich systémov synchrónnych strojov, iskríšť na obmedzenie prúdov v bleskoistkách, elektrického oblúka (výkonových vypínačov a oblúkových porúch), silovej elektroniky a pohonov a na simuláciu ostatných javov, ktoré nie sú priamo modelované existujúcimi prvkami v ATP.

MODELS patrí spolu s TACS medzi simulačné moduly. Je to viacúčelový popisný jazyk používaný k vytváraniu vlastných objektov, užívateľom definovaných kontrolných a elektrických obvodových komponentov pri práci s programom. Je podporovaný viacerými simulačnými nástrojmi a môže byť použitý pre spracovanie simulačných výsledkov ako v časovej, tak vo frekvenčnej oblasti.

1.2.2.3 Programy pre prácu s EMTP – ATP

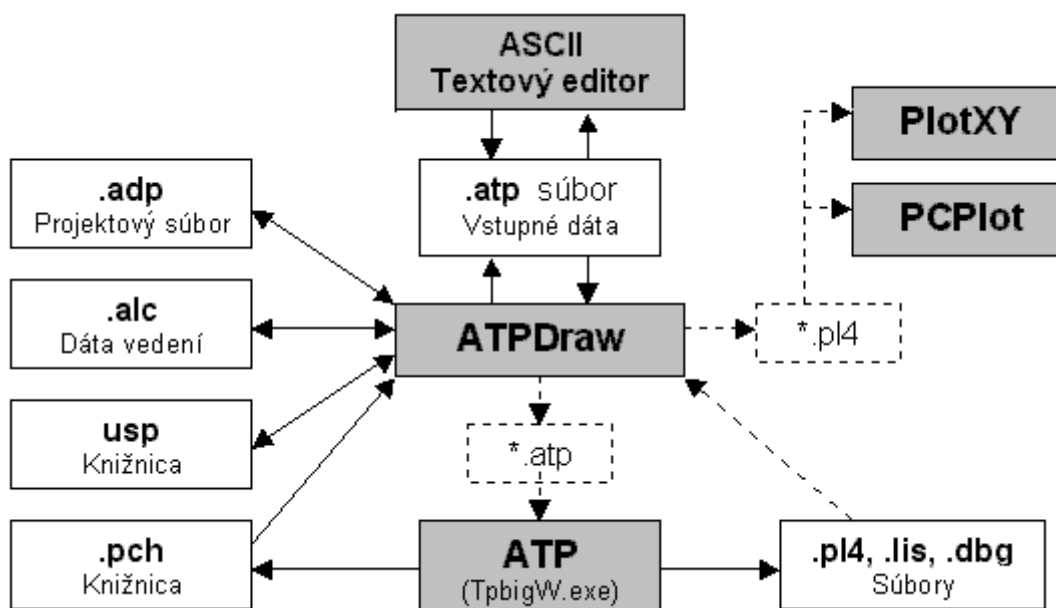
Samotný program EMTP – ATP je program výpočtový. Kvôli sprehl'adneniu práce s týmto programom, možnosti editácie jednotlivých typov súborov zapojených do spolupráce pri riešení obvodov simulovaných v ATP a v neposlednom rade kvôli zjednodušenému vizuálnemu vytváraniu jednotlivých obvodov bol vytvorený rad užitočných programov. Patria tu podporné programy, ako sú:

- **ATPDraw** – grafický preprocesor,
- **PCPlot, PlotXY, GTPPlot** – grafické výstupy ATP,
- **Programmer's File Editor (PFE)** – textový editor na vytváranie a editáciu vstupných súborov,
- **ATP Control Center** – program sústreďujúci ovládanie všetkých týchto programov do jedného okna.

1.2.2.4 Grafický preprocesor ATPDraw

EMTP – ATP, ako simulačný systém, obsahuje okrem výpočtového programu rozličné oddelené podporné programy (pre- a postprocesory) a inicializačné súbory. Popri iných alternatívach (napríklad použitie programu ATP Control Center) môže byť ATPDraw použitý ako simulačné centrum, ktoré poskytuje operačnú kostru pre ostatné súčasti ATP. Takto je možné spúšťať externé procesy ako aj priamo vykonávať výpočty v ATP. Taktiež sa dajú z ATPDraw spúšťať postprocesory a externé podporné programy.

Obr. 1.3 ponúka prehľad tradičného použitia programu EMTP – ATP. Súčasti ATP komunikujú cez diskové súbory, výstupy preprocesorov sú používané ako vstup pre hlavný program a produkty simulácie môžu byť použité ako vstupy pre programy na vykreslenie výsledných priebehov. Štruktúra programových komponentov je dosť zložitá, takže prítomnosť ovládacieho programu, ktorý kontroluje vykonávanie rozličných iných programov a dátových vstupov a výstupov je dosť značnou výhodou.



Obr. 1.3 Schematický prehľad práce s programom EMTP – ATP

Na obr. 1.3 je zobrazená zjednodušená schéma funkcie programu ATP s ATPDraw ako grafickou nadstavbou a centrálnym užívateľským programom. Plné čiary znamenajú prenos dát a čiarkované prenos informácií. Výstupom alebo vstupom tejto grafickej nadstavby sú súbory s príponou *.adp určené pre archiváciu vytvorenej schémy, ďalej súbory s príponou *.atp s 80 znakovou riadkovou štruktúrou určené pre výpočtové jadro ATP so spúšťacím programom TpbigW.exe. Ďalšími výstupmi ATPDraw sú pomocné súbory s koncovkami *.pch, *.lib, *.alc, v ktorých možno definovať vlastnosti viacnásobne použitých obvodových elementov (vedenia, transformátory, nelineárne charakteristiky prvkov, atď.) a ktoré je možno využiť v iných, v budúcnosti zostavovaných schémach.

Priebeh výpočtu je možné nechať zobraziť na obrazovke alebo potlačiť ako aplikáciu na pozadie. Behom výpočtu sa vytvárajú tri druhy súborov. Prvým z hľadiska dôležitosti je súbor s koncovkou *.pl4, určený pre výslednú grafickú interpretáciu funkčných závislostí v meraných bodoch schémy. Vypočítané priebehy je možné zobraziť v prehliadačoch, ako sú napr. PCPlot alebo PlotXY. Všeobecne sa dá povedať, že s vypočítanými priebehmi možno v prehliadačoch ďalej realizovať zväčšovanie a ďalšie operácie vrátane Diskrétnej Fourierovej Transformácie (DFT). Ďalším menej významným súborom (ak výpočet prebieha podľa predpokladov) je *.dbg súbor. Jeho význam vzrastie pri akejkoľvek havárii vo výpočte, upozorní užívateľa na možný zdroj chyby v zadaní, kvôli ktorej sa výpočet zastavil. Posledným typom je *.lis súbor. V ňom sú v textovo-tabuľkovej forme obsiahnuté všetky premenné vo výpočte, názvy zdrojových súborov a výpis vypočítaných hodnôt vo zvolenom kroku. Existuje možnosť vytvorenia súboru *.pl4 v ASCII formáte, prístupnom pre použitie softvéru typu MS-Excel alebo Corel Qattro Pro, MathCAD a podobne. Generovanie troch vyššie uvedených súborov možno podľa vlastnej potreby vypnúť, prípadne nastaviť krok zápisu hodnôt riešení.

ATPDraw je grafický, myšou ovládaný preprocesor k ATP verzii programu pre elektromagnetické prechodné javy (EMTP). V programe môže užívateľ konštruovať elektrické obvody vybratím preddefinovaných komponentov z menu knižníc. Preprocesor potom vytvára, korešpondujúci vstupný súbor *.atp v korektnom formáte. Označenie uzlov siete prebieha automaticky, prípadne ich môže užívateľ pomenovať sám podľa osobne zvoleného kódu. Uzly sú v programe veľmi dôležité, pretože sa prakticky celý výpočet koncentruje na vypočítanie hodnôt napätí, prúdov alebo energie v daných uzloch siete alebo

vo forme rozdielu medzi uzlami siete. ATPDraw podporuje 64 štandardných prvkov a 24 objektov TACS, umožňuje zjednodušené použitie modulu MODELS, navyše tu môže užívateľ vytvárať vlastné obvody objekty použitím programu Data Base Module. Základom simulovaných obvodov sú jedno- a trojfázové prvky.

V programe je možné vytvárať viacnásobné okná s riešenými obvodmi, pracovať súčasne na niekoľkých obvodoch a kopírovať medzi nimi informácie. V rámci obvodov sú k dispozícii funkcie typu kopírovať-vložiť objekty, zlučovať a rozdeľovať, export-import a pod. Ďalšie funkcie programu ATPDraw sú: vstavaný editor pre súbory *.atp, podpora pre vstup a výstup súborov vo formáte Windows Metafile/Bitmap alebo PostScript. Preprocesor obsahuje aj program ATP LCC pre parametre Line/Cable. Významnou je aj možnosť budovania vlastných knižníc obvodov.

Simulované obvody sa vytvárajú tak, že sa jednotlivé zvolené prvky v obvode okne navzájom spájajú v miestach svojich uzlov. Každému prvku je potrebné priradiť jeho vlastnosti charakterizované elektrickými parametrami. Toto je možné docieľiť v tzv. dialógovom okne komponentov, ktorý vyvoláme dvojklikom na zvolený prvok simulovanej elektrickej siete.

2 OBVODOVÉ PRVKY

V tejto kapitole je uvedený prehľad niektorých prvkov podľa roletového menu v ATPDraw, verzia 4. Aplikácie uvedených prvkov sú podrobnejšie vysvetlené v kapitolách 3, 4, 5 a 6. Vo vyšších verziách sú postupne doplňované ďalšie prvky a pri prechode z nižšej verzie na vyššiu je preto nutné overiť správnosť prenesených údajov.

2.1 Modely vedení so sústredenými parametrami (Line Lumped)

Vedenie so sústredenými parametrami je charakterizované týmito obvodymi prvkami:

- činný odpor R [Ω] závislý od parametrov vodiča (geometrické rozmery),
- indukčnosť L [H] charakterizuje usporiadanie vodičov,
- kapacita C [F] je daná vlastnosťou prostredia medzi vodičmi,
- zvodová vodivosť G [S] je závislá od kvality izolácie.



RLC Pi-equiv. 1

π -článok v rôznych podobách. Parametre článku R , L , C sa zadávajú obdobne ako pri lineárnom prvku RLC .



RL Coupled 51

RL obvody so vzájomnou väzbou.



RL Sym. 51

Symetrické RL obvody s väzbou.

2.2 Modely vedení s rozloženými parametrami (Line Distributed)

Sú to obvody, kde magnetické a elektrické pole je rozložené rovnomerne alebo nerovnomerne pozdĺž všetkých úsekov obvodu. Napätia a prúdy sú potom ešte funkciou priestorových súradníc. Základný význam má analýza javov na dlhých vedeniach. Parametre sú rozložené spojito po celej dĺžke vedenia a sú charakterizované hodnotami vzťahnutými na jednotku dĺžky.



Transp. lines (Clarke)

Modely transponovaného 1, 2, 3, 6, 9-fázového vedenia. Model 6-fázového vedenia je aj so vzájomnou väzbou.



Untransp. lines (KCLee)

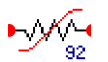
Model vedenia KCLee 2 alebo 3-fázového.

2.3 Modely nelineárnych prvkov (Nonlinear Branch)



Nelineárny časovo závislý rezistor (R(t) Type 91 a R(t) Type 97)

Pre typ 91 sa zadáva napätie a pre 97 čas.



Nelineárny rezistor (R(i) Type 92)

Reálny, nelineárny prúdovo závislý rezistor definovaný VA charakteristikou.



Nelineárny rezistor (R(i) Type 99)

Nelineárny prúdovo závislý rezistor definovaný VA charakteristikou s časovým určením.



Reálny nelineárny induktor (L(i) Type 93) a pseudo-nelineárny induktor (L(i) Type 98)

Nelineárny prúdovo závislý induktor definovaný závislosťou magnetického toku a pretekajúcim prúdom.



Fiktívny (pseudo) nelineárny induktor s hysteréziou (L(i) Type 96)

Oproti predchádzajúcim dvom typom je teraz uvažovaný zvyškový tok. Nelineárny induktor je teraz definovaný hysteréznou krivkou.



Nelineárny induktor (L(i) Type Hevia 98 → 96)

Nelineárny prúdovo závislý induktor definovaný závislosťou magnetického toku a pretekajúcim prúdom. Pri induktore je možné zadať hysterézne straty.



Pri induktoroch typu 93, 96 a 98 je možné zvoliť i počiatočnú nenulovú magnetizáciu a sú označené **init**.



Nelineárny rezistor (MOV Type 92, MOV type 92 3-f)

Exponenciálne, prúdovo závislý odpor, ktorý je zadávaný pomocou VA charakteristiky.

Nelineárny rezistor (R(TACS) Type 91)

Časovo závislý rezistor, riadený externým vstupom.

2.4 Modely vedení a káblov (Line/Cable)

Elektrické parametre vedení sa určujú na základe znalosti rozmerov vedení a použitých materiálov pomocou procedúr **Line Constants**, **Cable Constants** a **Cable Parameters**. Po uzatvorení dialógového okna je spustený program ATP, ktorý automaticky vygeneruje príslušné parametre. Dátový súbor obvodu sa pri riešení prechodného deja načíta prostredníctvom príkazu INCLUDE.



Line/Cable

Modely vedení a káblov (Pi, J.Marti, Bergeron ...). Pomocou tejto procedúry je možné vygenerovať požadovaný typ vedenia/kábla postupným zadávaním jednotlivých parametrov. Parametre vedenia sa vpisujú do tabuliek požadovaných hodnôt v prostredí ATPDraw.

2.5 Modely točivých elektrických strojov (Machines)



SM59

Model synchronného stroja s možnosťou riadenia pomocou TACS.



UM1 Synchronous

Model synchronného stroja.



UM3 Induction

Model trojfázového asynchronného stroja s kotvou nakrátko.

**UM4 Induction**

Model trojfázového asynchrónneho stroja s krúžkovou kotvou.

**UM6 Single phase**

Model jednofázového stroja.

**UM8 DC**

Model jednosmerného stroja.

2.6 Modely transformátorov (Transformers)

Programom ATP sa dajú modelovať rôzne druhy transformátorov. ATPDraw disponuje modelom ideálneho 1-fázového, modelom 1-fázového a 3-fázového transformátora s rešpektovaním saturácie a 3-fázového transformátora v zapojení Y-Y. Okrem modelu Saturable Transformer, kde je nutné zadať priamo obvody parametre transformátora má program ATP procedúru BCTRAN, ktorá je obdobou procedúr pri vedeniach a obvody parametre transformátora znova určí program ATP po uzavretí dialógového okna, v ktorom sa vyplňujú základné štítkové údaje transformátora. Novo implementovaný hybridný model označený XFRM sa naďalej vyvíja.

**Ideal 1 phase**

Model ideálneho jednofázového transformátora, kde prevod p transformátora sa určí nastavením n .

Saturable 1 phase

Model jednofázového transformátora s uvažovaním saturácie.

V dialógovom okne sa nastavia jednotlivé parametre:

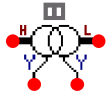
- I_0 prúd magnetickým obvodom v rovnovážnom stave, pri zanedbaní strát v železe približne zodpovedá prúdu I_μ [A],
- F_0 magnetický tok obvodu v rovnovážnom stave (v stave naprázdno) [Wb] (veličiny I_0 a F_0 definujú indukčnosť magnetického obvodu v rovnovážnom stave),
- R_{mag} odpor magnetického obvodu [Ω],
- R_p odpor primárneho vinutia obvodu [Ω],
- L_p indukčnosť primárneho vinutia [mH],
- V_{Tp} primárne napätie [kV] efektívna hodnota,
- R_s odpor sekundárneho vinutia obvodu [Ω],
- L_s indukčnosť sekundárneho vinutia [mH],
- V_{Ts} sekundárne napätie [kV] efektívna hodnota.

Magnetizačná charakteristika transformátora sa zadáva pomocou položky **Characteristic**, ako závislosť magnetického toku (resp. magnetickej indukcie) od prúdu, približne desiatimi bodmi tejto charakteristiky v širšom rozsahu hodnôt.

**Saturable 3 phase**

Všeobecný model 3-fázového transformátora s uvažovaním saturácie.

V **Attributes** je možné zvoliť dvojvinuťový alebo trojvinuťový transformátor. Pre každé vinutie je možné vybrať zapojenie (Y, D11, D-lag, D-lead). Nastavenie parametrov je obdobné ako pri jednofázovom transformátore. I pre terciárne vinutie je nastavenie rovnaké.

**# Sat. Y/Y 3-leg**

3-fázový transformátor v zapojení Yy s uvažovaním saturácie. Ide o typ 3- leg core s vysokou homopolárnou reluktanciou.

**BCT**

Transformátor zadávaný prostredníctvom štítkových hodnôt.

**XFRM**

Hybridný transformátor zadávaný aj pomocou štítkových hodnôt a aj so zadaním kapacít.

3 NELINEÁRNE PRVKY

Vlastnosti nelineárneho prvku elektrického obvodu sa prejavujú na jeho voltampérovej charakteristike. Charakteristiky je možné deliť na niekoľko základných typov:

a) inerciálne a neinerciálne

Príkladom inerciálnych prvkov môžu byť termistory, ktorých odpor je závislý od teploty a v dôsledku tepelnej zotrvačnosti musíme potom rozlišovať statickú a dynamickú charakteristiku nelineárneho obvodu. Pri neinerciálnych sú statické a dynamické charakteristiky zhodné. Ich rozlíšenie závisí od rýchlosti zmien prúdu, resp. frekvencie voči tepelným časovým konštantám. Pokiaľ tieto zmeny budú pomalé, nie je nutné uvažovať časové konštanty tepelných dejov, daný prvok je možné považovať za neinerciálny.

b) symetrické a nesymetrické

Pri obvodoch so symetrickou VA charakteristikou nezávisí jeho impedancia od smeru prechodu prúdu. To platí pre niektoré polovodičové súčiastky (tyristory), podobné vlastnosti má napríklad i elektrický oblúk. Nesymetrické VA charakteristiky majú prvky, ktoré sa prejavujú nelineárnou závislosťou odporu od polarít napätia. V súčasnej dobe majú najväčší význam súčiastky vyrobené na báze polovodičových materiálov. Najjednoduchšou súčiastkou je dióda.

c) jednoznačné a nejednoznačné

Vyznačujú sa tým, že pre jednu hodnotu nezávislej premennej existuje viac než jedna hodnota závislej premennej. Tento jav je daný buď výskytom oblastí, kde dochádza k poklesu napätia pri zvyšovaní prúdu alebo výskytom hysterézie pri cievke so železným jadrom.

Elektrické obvody, ktoré obsahujú prvky s vyššie uvedenými vlastnosťami sa nazývajú nelineárne. Matematicky je možné popísať nelineárny obvod nelineárnymi rovnicami, ktoré obsahujú mocniny a súčiny premenných a aj ich derivácie, vzájomné súčiny premenných a premenné v argumente transcendentných funkcií. Pre tieto obvody nie je možné použiť princíp superpozície.

Program ATP umožňuje modelovať dané prvky taktiež zo znalosti ich voltampérových charakteristík, ktoré sa nadefinujú daným počtom bodov tejto charakteristiky. S výhodou je možné toto použiť pri modelovaní nelineárnej záťaže, modelu spínacieho oblúka a pod.

3.1 Nastavenie parametrov modelov (Branch Nonlinear)



Nelineárny rezistor (R(i) Type 99)

Nelineárny prúdovo závislý rezistor definovaný VA charakteristikou. Po otvorení dialógového okna sa objaví ponuka obsahujúca dve zložky.

V zložke **Attributes** sa postupne zadávajú jednotlivé parametre, kde **Vflash** [V] je preskockové napätie sériového iskrišťa, **Tdelay** určuje minimálny čas v sekundách, po ktorom nastane zopnutie iskrišťa. Pokiaľ prechádzajúci prúd vetvy je po doznení času **Tdelay** nulový, bude iskrište znova otvorené. **Jump** označuje číslo segmentu, na ktorom začne výpočet. Pokiaľ dôjde vo vetve k poklesu napätia pod hodnotu uvedenú v položke **VSEAL** (> 0), dôjde znova k otvoreniu iskrišťa. V zložke **Characteristic** sa nadefinuje VA charakteristika daného prvku. Je vhodné zadať aspoň 16 prvkov danej charakteristiky, kde počiatok osí [0,0] je vynechaný.



Nelineárny induktor (L(i) Type 98)

Nelineárny prúdovo závislý induktor definovaný závislosťou magnetického toku a pretekajúcim prúdom (viď obr. 3.1a).

V zložke **Attributes** označuje položka **CURR** [A] veľkosť prúdu a **FLUX** [Wb] veľkosť magnetického toku. Obe hodnoty sú určené pre ustálený stav. Zložka **Characteristic** definuje danú závislosť magnetického toku a pretekajúceho prúdu. Je možné zadať 17 prvkov charakteristiky. Pokiaľ je vynechaný bod [0,0] alebo sú zadané iba kladné hodnoty charakteristiky, je predpokladaný symetrický priebeh krivky saturácie (nasýtenia).



Reálny nelineárny induktor (L(i) Type 93)

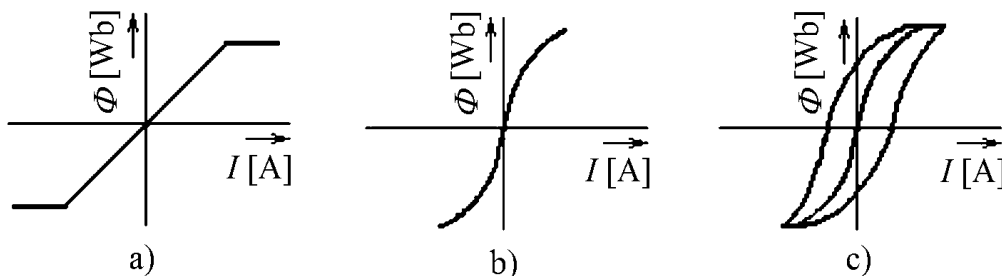
Oproti predchádzajúcemu typu je odlišný svojou krivkou magnetizácie (viď obr. 3.1b). Ak je jej začiatok určený bodom [0,0] a ak sú vynechané záporné hodnoty, je krivka symetrická podľa počiatku.



Fiktívny pseudonelineárny induktor s hysteréziou (L(i) Type 96)

Oproti predchádzajúcim dvom typom je teraz uvažovaný zvyškový tok. Ten je zadaný v **Attributes** položkou **RESID** [Wb]. Nelineárny induktor je teraz definovaný hysteréznou krivkou.

Predpokladá sa symetrický priebeh hysteréznej krivky okrem prípadu, keď spodná ľavá časť slučky vymedzujúca krivku hysterézie začína v treťom kvadrante. Posledný bod krivky hysterézie by mal byť miestom styku oboch kriviek v prvom kvadrante (viď obr. 3.1c).



Obr. 3.1 Priebeh závislostí magnetického toku Φ od pretekajúceho prúdu I



Nelineárny časovo závislý rezistor (R(t) Type 97)

Zadáva sa veľkosť preskakového napätia sériového iskrišťa **Vflash** [V]. Hodnota **Tdelay** určuje minimálny čas v sekundách, po ktorom nastane zopnutie iskrišťa, súčasne musí platiť, že priložené napätie je väčšie ako preskakové. Pre **Tdelay** = -1 je rezistor pripojený bez iskrišťa. Závislosť odporu od času je určená zadanými bodmi krivky.



ZnO obmedzovač – odpor s exponenciálnou závislosťou prúdu (Type 92)

Prúd je daný závislosťou $i = p \cdot (u/V_{ref})^q$. Konštanty p a q sa vypočítajú zo zadanej VA charakteristiky automaticky po uzavretí dialógového okna. **Vflash** má rovnaký význam ako bolo vyššie uvedené. Môže sa zadať **Vzero** ako počiatkové napätie v čase nula. **COL** udáva počet paralelných a **SER** sériových obmedzovačov vo vetve. **ErrLim** je povolená tolerancia v pomerných jednotkách.

3.2 Model spínacieho oblúka

Vypínacia schopnosť súčasných vypínačov je závislá od parametrov oblúka, ktorý vzniká v priebehu vypínania prúdu medzi kontaktmi, tzv. spínací oblúk. Elektrický oblúk môže byť uvažovaný ako odpor, ktorého hodnota je premenlivá a je funkciou prúdu. Jedná sa o činný nelineárny prvok. Všeobecné oblúkové parametre sú vyjadrené diferenciálnymi rovnicami. Pri analýze obvodov pomocou EMTP – ATP je možné ľahko zahrnúť diferenciálne rovnice. Preto v prípade, keď ide o systém závislý prevažne od parametrov oblúka, je možné uskutočniť jeho analýzu bez ťažkostí. Existuje množstvo modelov elektrického oblúka. K najznámejším patrí Cassieho a Mayrov model.

3.2.1 Cassieho model

Je najlepšie využiteľný pre veľké prúdy oblúka, v rozmedzí 100 A až 100 kA v SF₆ alebo tlakovzdušných vypínačoch. Týmto modelom môže byť analyzované tlmenie prúdu v prechodnom deji pri vypínaní oblúka. Cassieho teória platí pre oblúk, ktorý horí v rýchle prúdiacom prostredí, ktorého smer prúdenia je súhlasný s osou oblúkového stĺpca. Prúdiace prostredie obklopuje celý povrch oblúka. Cassieho model predpokladá, že celkový stratový výkon odoberá oblúku toto prúdiace médium. Jedná sa o objemové a nie o povrchové chladenie. Elektrická konduktivita plazmy je potom úmerná (konštanta úmernosti k) teplu akumulovanému v plazme Q . Pre elektrickú konduktivitu teda platí:

$$\gamma = k \cdot Q \quad (3.1)$$

Bilančná rovnica podľa Cassieho teórie má tvar:

$$\frac{1}{\gamma} \cdot \frac{d\gamma}{dt} = \frac{1}{Q_0} \cdot (P_p - \Phi) = \frac{1}{\tau_a} \cdot \left(\frac{P_p}{\Phi} - 1 \right) \quad (3.2)$$

$$\Phi = \gamma \cdot E_0^2 \quad \text{tepelný výkon odoberaný plazme v stacionárnom stave} \quad (3.3)$$

$$P_p = \gamma \cdot E^2 \quad \text{elektrický príkon} \quad (3.4)$$

E_0 je intenzita prúdovej plazmy v stacionárnom stave,

E je intenzita prúdovej plazmy v dynamickom stave.

Tepelnú zotrvačnosť oblúka určuje tzv. časová konštanta, ktorá podľa Cassieho teórie má tvar:

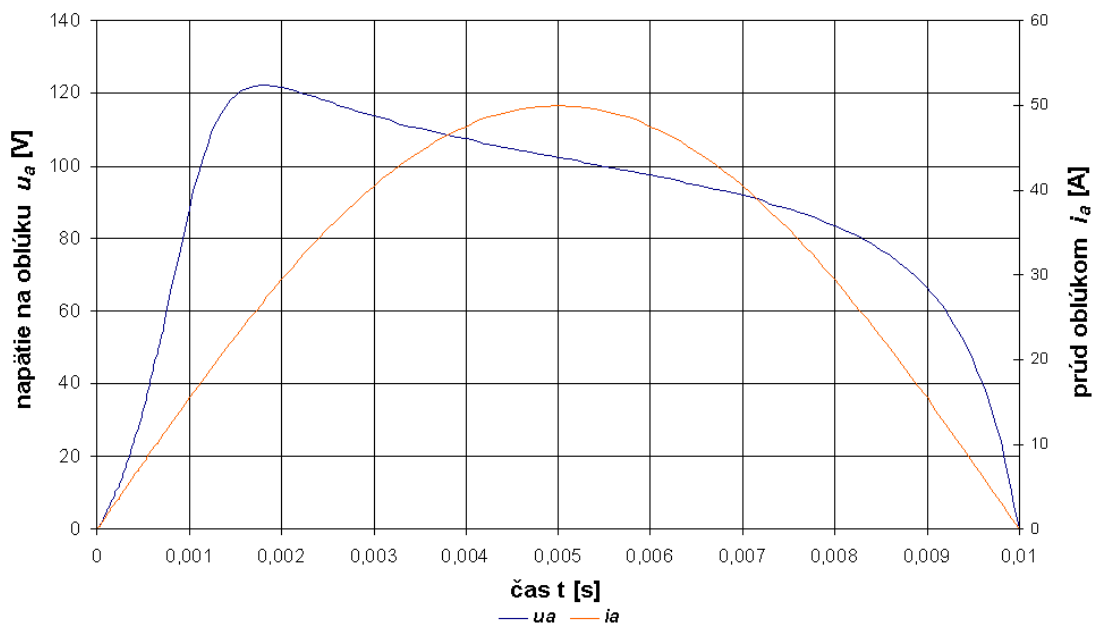
$$\vartheta_C = \frac{Q}{\Phi} \quad (3.5)$$

Výsledný Cassieho vzťah pre oblúkové napätie má tvar:

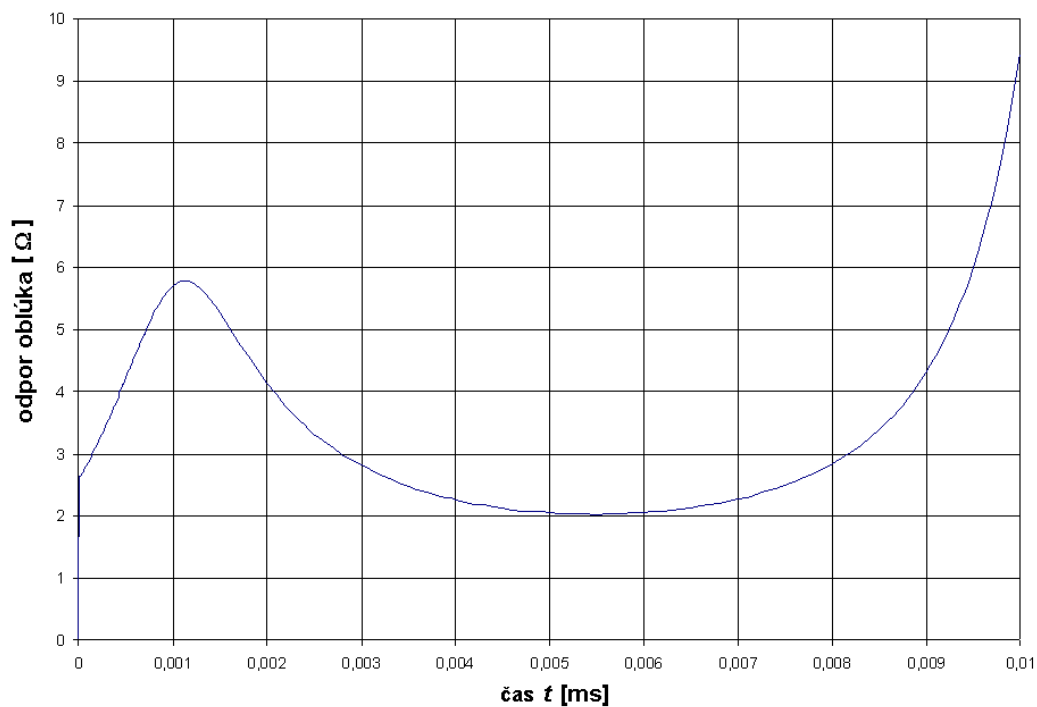
$$u_a = \frac{E_a \cdot \sqrt{2} \cdot \sin(\omega \cdot t)}{\sqrt{1 - \frac{1}{\omega^2 \cdot \vartheta_C^2} \cdot [\cos(2 \cdot \omega \cdot t) + \omega \cdot \vartheta_C \cdot \sin(2 \cdot \omega \cdot t)] + \left[\left(\frac{R_q}{R_{01}} \right)^2 - 1 + \frac{1}{1 - \omega^2 \cdot \vartheta_C^2} \right] \cdot e^{-\frac{2}{\vartheta_C} \cdot t}} \quad (3.6)$$

Člen E_a predstavuje intenzitu prúdového poľa plazmy, pomer R_q/R_{01} je pomer odporov oblúka, môže nadobúdať hodnoty (0,1; 1; 10).

Cassieho teória dobre rešpektuje zapaľovacie špičky a priebeh napätia na oblúku v oblasti prechodu prúdu maximom. Nedostatkom je, že nerešpektuje zhášaciu špičku (viď obr. 3.2).



Obr. 3.2 Priebeh napätia a prúdu oblúka podľa Cassieho teórie



Obr. 3.3 Priebeh rezistancie oblúka podľa Cassieho teórie

3.2.2 Mayrov model

Je vhodný pre malé hodnoty prúdov, rádovo do desiatok ampérov v SF₆ alebo tlakovzdušných vypínačoch. Je taktiež použiteľný v prípade analýzy zvyškového prúdu, vzniknutého po prerušení prúdu (prechod nulou), po dobe niekoľkých μs v stave, ktorý sa

nazýva „teplotný režim“ Vypínacia schopnosť môže byť najlepšie analyzovaná s použitím tohto modelu, pretože javy sa prevažne vzťahujú k určitému časovému intervalu. Mayrov model uvažuje, že straty nie sú odvádzané do okolitého prostredia axiálne, ale len radiálne vedením do okolitého, relatívne studeného prostredia. Straty prúdením sa zanedbávajú z dôvodu malého prierezu oblúka. Pritom sa predpokladá, že polomer oblúkového stĺpca je konštantný a že je konštantná aj celková veľkosť strát radiálnym chladením. Inými slovami uvažuje statickú charakteristiku oblúka v tvare rovnoosej hyperboly. Pri Mayrovom modeli sa predpokladá, že konduktivita vzrastá exponenciálne s teplom akumulovaným v plazme.

$$\gamma = k \cdot e^{\frac{Q}{Q_0}} \quad (3.7)$$

Q_0 je definované ako teplo, ktoré musí byť privedené do plazmy jednotkovej dĺžky, aby sa jeho konduktivita zväčšila v pomere $1/e$, kde e je Eulerovo číslo ($e = 2,71828\dots$)

k je konštanta úmernosti.

Podobne ako pri Cassieho modeli je možné odvodiť bilančnú rovnicu oblúka podľa Mayrovej teórie:

$$\frac{1}{\gamma} \cdot \frac{d\gamma}{dt} = \frac{1}{\vartheta_M} \cdot \left(\frac{P_p}{\Phi} - 1 \right) \quad (3.8)$$

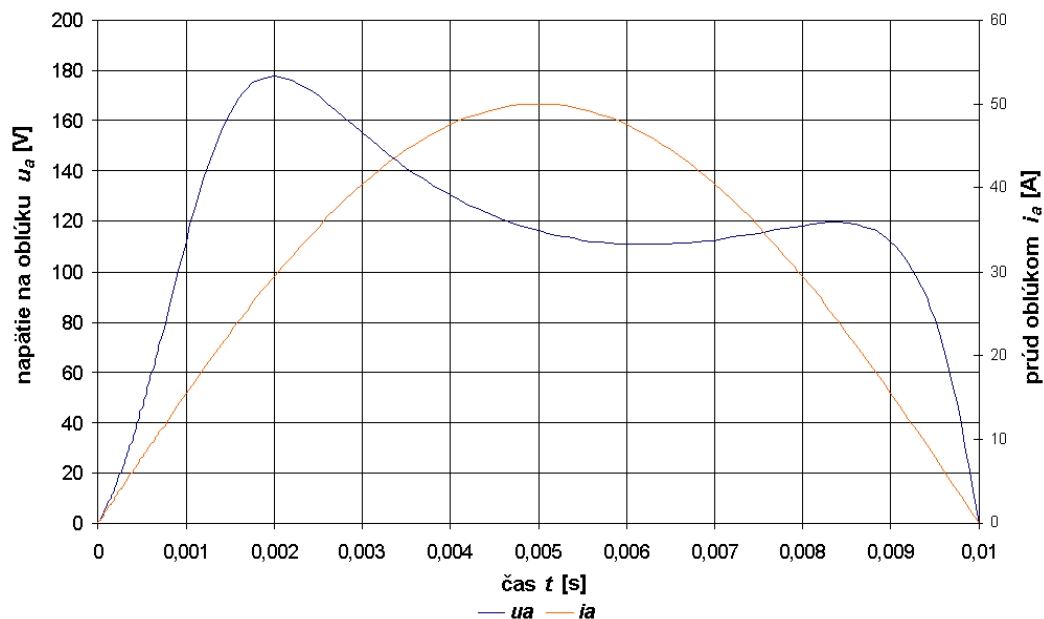
Pre Mayrovu časovú konštantu platí:

$$\vartheta_C = \frac{Q_0}{\Phi} \quad (3.9)$$

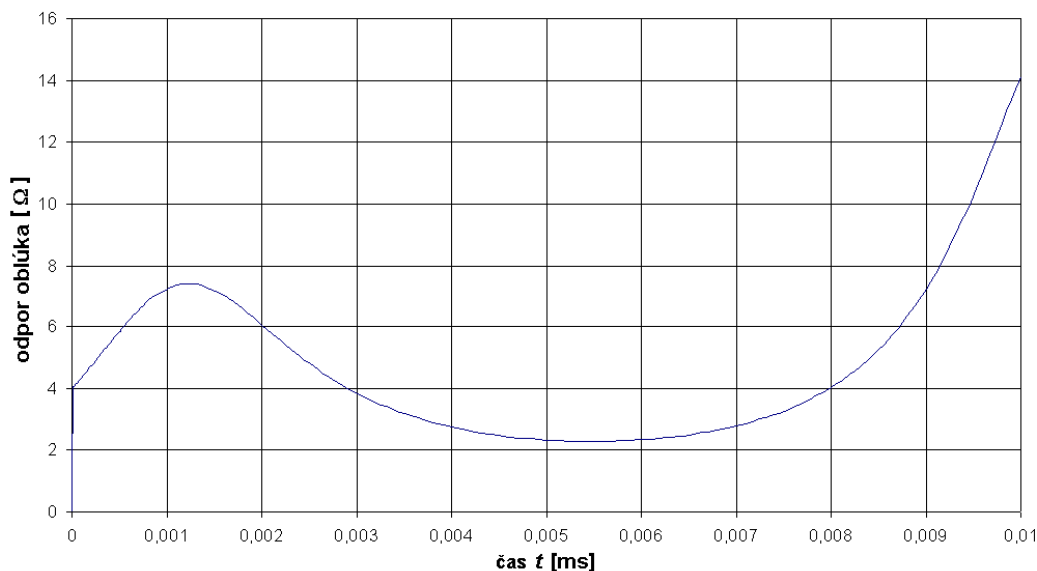
Výsledný vzťah pre oblúkové napätie podľa Mayrovej teórie:

$$u_a = \frac{P_p \cdot 2 \cdot \sin(\omega \cdot t)}{I_m \cdot \left(1 - \frac{1}{1 + 4 \cdot \omega^2 \cdot \vartheta_M^2} \right) \cdot [\cos(2 \cdot \omega \cdot t) + 2 \cdot \omega \cdot \vartheta_M \cdot \sin(2 \cdot \omega \cdot t)] + \left[\frac{R_q}{R_{01}} - 1 + \frac{1}{1 + 4 \cdot \omega^2 \cdot \vartheta_M^2} \right] \cdot e^{-\frac{t}{\vartheta_M}}} \quad (3.10)$$

Mayrov model lepšie charakterizuje priebeh napätia v oblasti zapalovacích a zhášacích špičiek. Mayrov model nie je vhodný pre oblasť prechodu prúdu nulou (viď obr. 3.4).



Obr. 3.4 Priebeh napätia a prúdu oblúka podľa Mayrovej teórie



Obr. 3.5 Priebeh rezistancie oblúka podľa Mayrovej teórie

3.2.3 Riešenie programom ATP

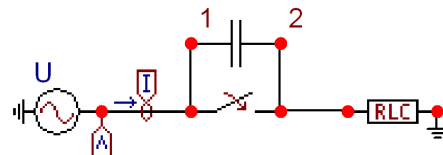
V dôsledku vypínania indukčných prúdov pred prechodom prúdu prirodzenou nulou môže vzniknúť veľké prepätie ohrozujúce izolačný systém. Tento problém je charakteristický pre vákuové vypínače. Najprv je meraný priebeh prepätia v obvode s ideálnym vypínačom (viď obr. 3.6), potom je vytvorený pomocou ATPDraw model oblúka a zostavená schéma obvodu, kde je uvažovaný vplyv oblúka (viď obr. 3.7).

Model oblúka je vytvorený v ATPDraw pomocou časovo závislého nelineárneho rezistora **R(t) Type 97**. Charakteristika oblúka je vypočítaná na základe Cassieho rovnice (3.6) pre časovú konštantu $\vartheta_c = 1$ ms. Pomer odporov oblúka R_q/R_{01} je rovný jednej. Výpočet odporu oblúka je uskutočnený v časovom rozmedzí 20 až 30 ms. Vypočítanú charakteristiku oblúka $R = f(t)$ je možné zadať v ATPDraw v zložke **Characteristic** dvomi spôsobmi. Prvým spôsobom je zadávanie maximálne 17 hodnôt z tejto závislosti pomocou **Add** a napísaním

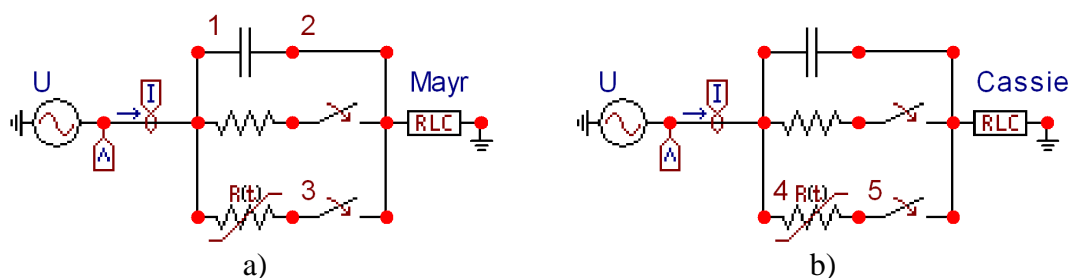
týchto hodnôt do dátových polí pre čas a odpor oblúka. Overenie priebehu charakteristiky je možné pomocou **View**. Druhá možnosť spočíva v použití vonkajšej charakteristiky označením **Include characteristic**. Pomocou **Browse** sa zadá cesta k súboru obsahujúca hodnoty charakteristiky oblúka. Dátový súbor obsahuje dva stĺpce hodnôt, prvý je vyhradený pre hodnoty časov a druhý pre výslednú veľkosť odporu oblúka. Jednotlivé stĺpce sú od seba oddelené medzerníkom. Súbor je uložený s príponou **.lib**.

Obvod je napájaný jednofázovým generátorom s amplitúdou $U_m = 8485$ V ($U_{ef} = 6000$ V) a frekvenciou $f = 50$ Hz. Paralelne k vypínaču 6 kV je pripojená kapacita $C_p = 1,2$ μ F, ktorá predstavuje kapacitu vedenia. Indukčnosť vedenia je $L = 20$ mH a odpor vedenia $R = 5$ Ω . Vedenie je realizované sériovým prvkom *RLC*. Na obr. 3.6 je schéma obvodu s ideálnym vypínačom a na obr. 3.7 s popísaným modelom oblúka. (Odpor 0,01 Ω pripojený do série s vypínačom zaisťuje správnu funkciu nelineárneho odporu, bez neho berie ATP len jeho prvú hodnotu.)

K vypnutiu dôjde v čase 20 ms, teda v okamihu, keď prúd obvodom dosiahne svoje maximum. Jedná sa o najnepriaznivejší prípad z hľadiska napät'ového namáhania izolácie. Oblúk zhasína v okamihu prechodu prúdu nulou, model oblúka je teda odpojený v čase 30 ms.

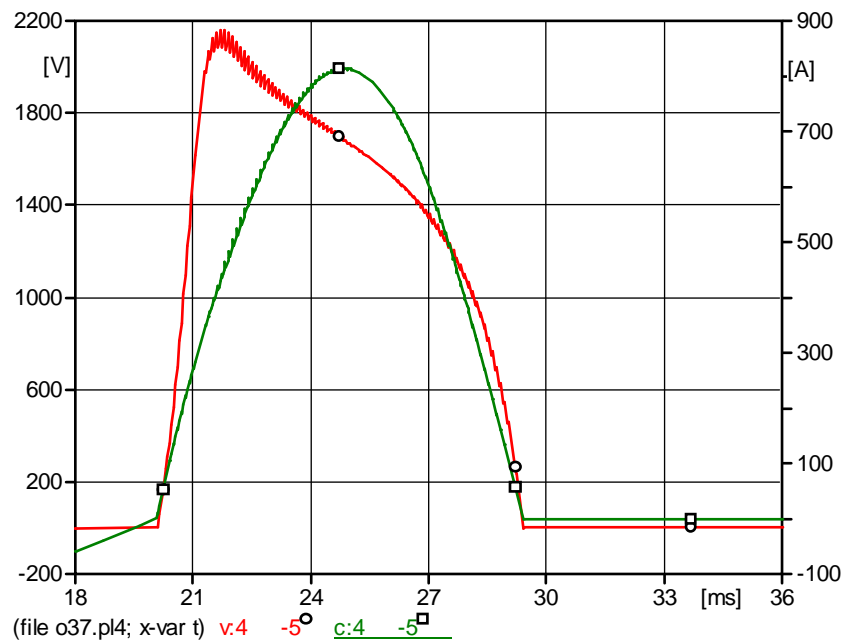


Obr. 3.6 Vypínanie indukčných prúdov ideálnym vypínačom



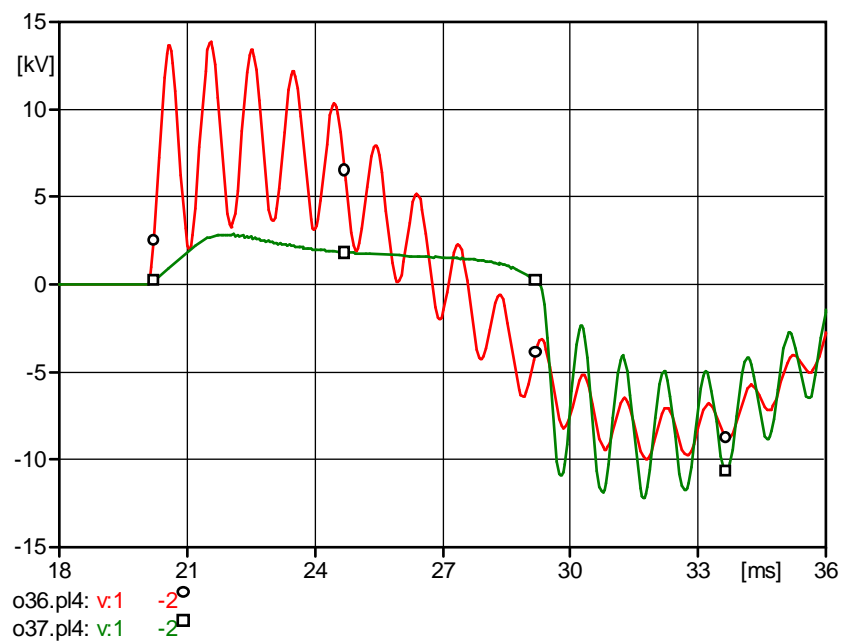
Obr. 3.7 Vypínanie indukčných prúdov vypínačom s uvažovaním vplyvu oblúka

Na obr. 3.8 je uvedený priebeh napätia a prúdu na oblúku, tak ako bol zadaný podľa obr. 3.2 pre Cassieho model.

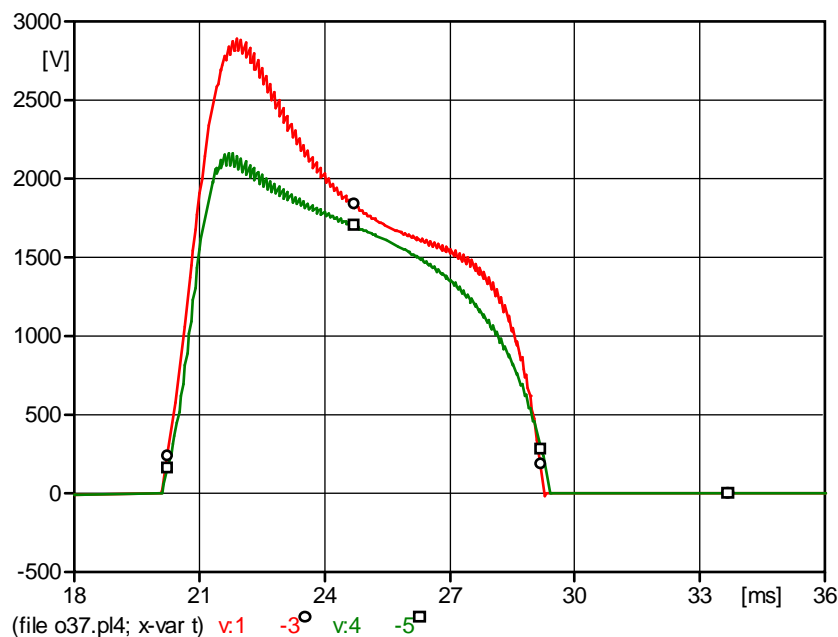


Obr. 3.8 Priebek napätia a prúdu na oblúku pre schému na obr. 3.7b

Na obr. 3.9 je uvedené porovnanie priebehov prepätí pri vypínaní ideálnym vypínačom podľa obr. 3.6 a vypínačom s uvažovaním oblúka podľa obr. 3.7a, model Mayr.



Obr. 3.9 Porovnanie priebehov prepätí pri vypínaní ideálnym vypínačom a vypínačom s uvažovaním oblúka



Obr. 3.10 Porovnanie napätí na oblúku pre model Mayr (uzly 1-3) a Cassie (uzly 4-5)

Na obr. 3.10 sú porovnané priebehy napätí na oblúku pre model Cassie a Mayr. Odchýlky oproti zadaným hodnotám, ktoré znázorňuje obr. 3.2 a obr. 3.4 sú spôsobené prúdom nesínusového prúdu, pretože odpor oblúka ovplyvní celkovú impedanciu obvodu.

Ako už bolo uvedené, Cassieho teória veľmi dobre rešpektuje zapalovacie špičky a priebeh napätia na oblúku v oblasti prechodu prúdu maximom. Táto teória sa lepšie hodí pre výpočet zhášadiel s intenzívnym chladením oblúka, je teda vhodnejšia pre výpočet odporu oblúka vákuového vypínača.

Na druhej strane, z výpočtu napätia pomocou Mayrovej teórie vyplýva, že napätie medzi zhášacou a zapalovacou špičkou má značne sedlovitý priebeh. Tento tvar je typický pri zhášadlách s pomerne nízkou intenzitou chladenia oblúka. Mayrova teória je vhodnejšia pre výpočet odporu oblúka máloolejového vypínača. Veľkosť odporu oblúka je pri máloolejovom vypínači väčšia. Vplyvom nižšieho odporu oblúka vákuového vypínača sa až tak polvlna prúdu neskrátí a k vypnutiu dochádza neskôr.

4 VEDENIA

Jednou z hlavných výhod programu ATP je podrobné spracovanie modelov vonkajších vedení a káblov. Vedenia je možné v programe ATP modelovať mnohými spôsobmi a to od nahradenia vedenia prvkom *RLC* až po procedúry **Line/Cable Constants**, ktoré generujú obvODOVÉ parametre vedenia zo zadaných rozmerov a materiálových konštánt.

4.1 Nastavenie parametrov modelov vedení

ATP umožňuje modelovať vedenie pomocou modelov so sústredenými parametrami, ako aj s rozloženými parametrami.

4.1.1 Sústredené parametre

Pi článok

Vlastnosti:

- vysoká spoľahlivosť,
- len pre pomerne nízku frekvenciu alebo krátke vedenia,
- časový krok výpočtu nie je limitovaný,
- frekvenčne nezávislý (platí pre zadanú frekvenciu).

4.1.2 Rozložené parametre

Transponovaný model (Clarke)

Vlastnosti:

- efektívnosť číselného výpočtu,
- prakticky postačujúca presnosť väčšiny výpočtov prechodných dejov v obmedzenom frekvenčnom rozsahu,
- časový krok výpočtu je limitovaný (musí byť kratší ako doba prechodu vlny po vedení),
- frekvenčne nezávislý (platí pre zadanú frekvenciu),
- nevhodný pre riešenie nesymetrických stavov.

Netransponovaný model (KCLee)

Vlastnosti:

- rovnaké ako predchádzajúce, počíta nesúmernosť vedenia a je vhodný pre nesymetrické stavy.

4.1.3 Frekvenčne závislé modely (J. Marti, Noda, Semlyen)

Vlastnosti:

- presnosť v širokom frekvenčnom rozsahu,
- relatívne efektívny číselný výpočet,
- časový krok výpočtu je limitovaný,
- pre veľmi nízke hodnoty frekvencií môže byť nepresný.

4.1.4 Modely vedení a káblov



Line/Cable

Pomocou tejto procedúry je možné vygenerovať požadovaný typ vedenia postupným zadávaním jednotlivých parametrov. Po voľbe **Line/Cable** sa objaví roletové menu s ponukou počtu fáz pre navrhované vedenie. Po zvolení počtu fáz nasleduje otvorenie dialógového okna. Dialógové okno obsahuje dve záložky **Model** a **Data**.

Model

Užívateľ si volí typ prenosového vedenia v ponuke **System type**:

- **Overhead Line** – vonkajšie vedenie
- **Single Core Cable** – jednožilový kábel
- **Enclosing Pipe** – viacžilový kábel

Data

V záložke **Data** sa zadávajú rozmery vedenia a materiálové konštanty vodičov a izolantov.

4.1.4.1 Overhead Line

Po zvolení vonkajšieho vedenia je možné nastaviť transponované vedenie **Transposed**, pre rešpektovanie povrchového javu, označenie položky **Skin effect**. Voľbou **Units** sa volí **Metric** – metrická sústava alebo **English** – anglická sústava.

Typ modelu (Bergeron, Pi, J. Marti, Noda, Semlyen) sa nastaví v ponuke **Type**. Položka **Standard data** obsahuje tri parametre. **Rho** je merná rezistivita zeme [$\Omega\cdot m$], **Freq. init** je frekvencia, pre ktorú sa budú počítať parametre a **Length**, je dĺžka vedenia v závislosti od zvoleného jednotkového systému, t.j. „km“ alebo „miles“.

Pre model Bergeron a Pi je nastavenie v záložke **Model** ukončené, avšak pri voľbe ostatných modelov je nutné nastaviť **Freq. SS** odpovedajúcu frekvenciu ustáleného stavu a **Freq. matrix** maximálnu frekvenciu, pri ktorej budú parametre počítané [Hz], **Decades** je počet dekád frekvenčného rozsahu a **Points/Dec.** značí počet bodov v jednej dekáde.

V záložke **Data** je **Phase no** poradové číslo fázy, v prípade zemného vodiča sa nastaví 0. Pri každom vodiči sa zadáva **React/Resis** – reaktancia/odpor vodiča na jeden kilometer dĺžky [Ω/km], **Rout** – vonkajší polomer vodiča, polomer celého vodiča alebo lana [cm], pokiaľ sa v predchádzajúcej ponuke **Model** nastaví požiadavka Skin efektu, je treba ešte určiť vnútorný polomer vodiča, polomer ocelevej duše vodiča – lana **Rin** [cm]. Ďalšie tri položky popisujú uloženie a rozmiestnenie jednotlivých fáz a zemných vodičov, kde **Horiz** určuje horizontálnu vzdialenosť lana od stredu stožiaru [m], **Vtower** je výška lana nad zemou pri stožiaru [m] a **Vmid** je výška lana nad zemou v mieste najväčšieho previsu [m].

Po ukončení zadávania je možné dáta uložiť voľbou **Save as** na dolnej tlačidlovej lište. Dáta je možné taktiež importovať z už skôr vytvorených súborov pomocou **Import**. Pre overenie rozmiestnenia jednotlivých vodičov je možné použiť **View**. Pre kontrolu správnosti zadania jednotlivých parametrov slúži **Verify**. Pokiaľ je všetko v poriadku, je možné pristúpiť k vygenerovaniu vedenia, resp. kábla pomocou príkazu **Run ATP** a voľbou **OK**.

4.1.4.2 Single Core Cable

Zadávanie parametrov kábla je podobné ako v predchádzajúcom prípade. Rovnaké je nastavenie štandardných dát v ponuke **Standard data**. Doplnená je ponuka **Snaking** pre točený (transponovaný) kábel. Uloženie kábla sa špecifikuje v ponuke **Cables in**. Je možné

uloženie vo vzduchu (**Air**), v zemi (**Ground**) alebo na povrchu zeme (**Surface**). Označenie ponuky **Matrix output** umožňuje získať výslednú impedanciu a dáta admitančnej matice (R , ωL , ωC). Pre voľbu **Add G**, **Add C** sa vyznačia príslušné matice. V záložke **Data** sa podobne ako v predchádzajúcom prípade nastavujú parametre týkajúce sa vlastného kábla. Štandardne sa nastavujú najskôr parametre jadra (**Core**), kde **Rin** je vnútorný polomer vodiča, **Rout** vonkajší polomer vodiča [m]. **Rho** je rezistivita materiálu vodiča [$\Omega \cdot m$], **mu** je pomerná permeabilita materiálu vodiča, **mu (ins)** je pomerná permeabilita izolácie na vonkajšej strane vodiča a **eps (ins)** je pomerná permitivita izolácie na vonkajšej strane vodiča. Pre nastavenie parametrov plášťa a panciera kábla je nutné najskôr označiť v ponuke **Conductors** položky **Sheath**, resp. **Aarmor**. Celkový polomer kábla (vonkajšia izolácia) sa nastaví v **Total radius** [m].

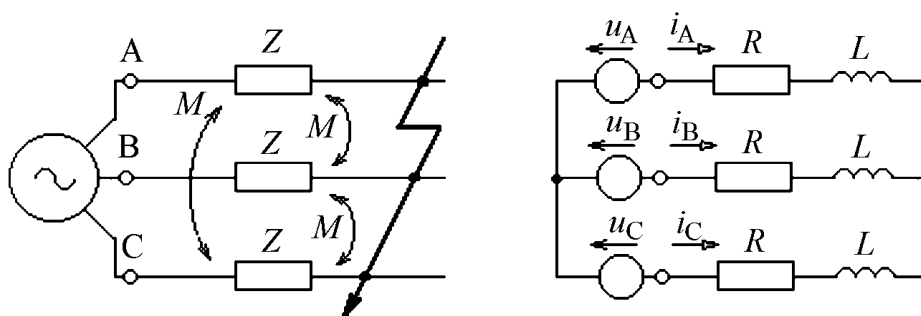
4.1.4.3 Enclosing Pipe

V tomto prípade ide o viacžilový kábel v spoločnom puzdre. Doplnená je tu preto ponuka zadávania **Pipe data**, kde sa nastavujú parametre trubice (puzdra). **Depth** značí vzdialenosť v metroch medzi stredom trubice a povrchom zeme. Význam parametrov **Rin**, **Rout**, **Rins**, **Rho** a **Mu** je rovnaký ako v predchádzajúcom prípade s tým rozdielom, že tentoraz sa netýkajú parametrov kábla, ale trubice. **Eps (in)** je relatívna permitivita vnútornej izolácie, teda izolácie medzi káblom a trubicou, **Eps (out)** je relatívna permitivita vonkajšej izolácie, izolácie okolo trubice. Pri nastavení možnosti **infinite thickness** sa uvažuje nekonečná hrúbka vodivej trubice.

4.2 Prevádzka vedenia

4.2.1 Trojfázový skrat napájaný ideálnym napät'ovým zdrojom

Na obr. 4.1 je uvedený prípad vzniku trojfázového kovového skratu. Obvod je napájaný ideálnym napät'ovým zdrojom s harmonickým napätím.



Obr. 4.1 Trojfázový skrat napájaný ideálnym napät'ovým zdrojom

Pre fázu A platí:

$$u_A(t) = U_m \cdot \sin(\omega \cdot t + \alpha) \quad (4.1)$$

kde U_m je amplitúda sínusového napätia, α je uhol fázora napätia referenčnej fázy v okamihu $t = 0$.

V súlade s obr. 4.1 platí diferenciálna napät'ová rovnica:

$$u_A(t) = R \cdot i_A(t) + L_K \cdot \frac{di_A(t)}{dt} + M \cdot \left(\frac{di_B(t)}{dt} + \frac{di_C(t)}{dt} \right) \quad (4.2)$$

Po zjednodušení je možné napísať:

$$u_A(t) = R \cdot i_A(t) + L_K \cdot \frac{di_A(t)}{dt} \quad \text{pre } t \geq 0 \quad (4.3)$$

$$L_K = L - M \quad (4.4)$$

a pre výsledný prúd potom platí rovnica:

$$i_A(t) = i_{Au}(t) + i_{Av}(t) \quad (4.5)$$

kde $i_{Au}(t)$ je partikulárne riešenie rovnice (4.2), ktoré je označované ako ustálená zložka výsledného prúdu fázy A a predstavuje striedavú periodickú zložku skratového prúdu. Pre ideálny napäťový zdroj, má ustálený skratový prúd konštantnú amplitúdu a jeho frekvencia je daná frekvenciou zdroja. Všeobecné riešenie rovnice (4.2) je $i_{Av}(t)$, ktoré je prechodnou zložkou výsledného prúdu a predstavuje jednosmernú aperiodickú zložku skratového prúdu. Tento prúd je označovaný ako voľný prúd. Jednosmerná zložka skratového prúdu doznieva s časovou konštantou $\tau_K = L_K/R$. Počiatočná hodnota tejto zložky je závislá od rozdielu veľkosti predchádzajúceho ustáleného prevádzkového stavu a ustáleného skratového prúdu. Maximálna veľkosť jednosmernej zložky skratového prúdu závisí ako od uhla α , tak aj od veľkosti prúdu predchádzajúceho prevádzkového stavu.

Pre zložku $i_{Au}(t)$ platí:

$$i_{Au}(t) = \frac{U_m}{Z_K} \cdot \sin(\omega \cdot t + \alpha - \varphi_K) \quad (4.6)$$

kde Z_K je impedancia skratového obvodu:

$$Z_K = \sqrt{R^2 + (\omega \cdot L_K)^2} \quad (4.7)$$

φ_K je uhol skratovej impedancie:

$$\varphi_K = \arctan \frac{L_K}{R} \quad (4.8)$$

Pre zložku $i_{Av}(t)$ platí:

$$i_{Av}(t) = [i_{A[u]}(0) - i_{Au}(0)] \cdot e^{-\frac{t}{\tau_K}} \quad (4.9)$$

kde $i_{A[u]}(t)$ je prúd predchádzajúceho prevádzkového stavu v čase $t = 0$ a τ_K časová konštanta.

4.2.1.1 Riešenie programom ATP

Uvažuje sa jednoduché 110 kV vedenie AlFe6 120 mm² s dĺžkou 20 km. K 3-fázovému skratu dôjde vo vzdialenosti 10 km od zdroja. Pre nastavenie parametrov ideálneho zdroja s frekvenciou je nutné najprv určiť veľkosť amplitúdy fázovej hodnoty napätia **Amp**, pre ktorú platí:

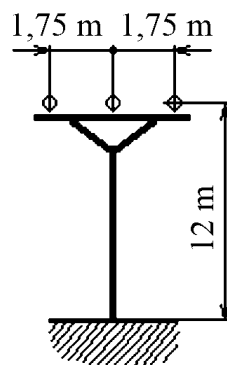
$$U_{\max} = \frac{U}{\sqrt{3}} \cdot \sqrt{2} = \frac{110}{\sqrt{3}} \cdot \sqrt{2} = 89,815 \text{ kV} \quad (4.10)$$

Vedenie je modelované pomocou procedúry **Line Constants** s uvažovaním Skin efektu a je nahradené frekvenčne nezávislým modelom π s parametrami podľa Tab. 4.1. Nie je uvažované previs lana a platí **Vtower = Vmid**.

Tab. 4.1 Parametre prenosového vedenia 110 kV, AlFe6 120 mm² s dĺžkou 20 km

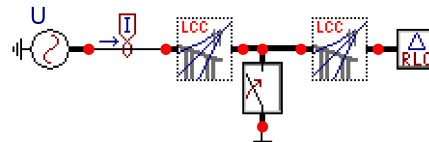
Phase no číslo fázy	Rin [cm] polomer oceľovej duše vodiča	Rout [cm] vonkajší polomer vodiča-lana	Resis [Ω/km] odpor vodiča na jeden kilometer dĺžky	Horiz [m] Horizontálna vzdialenosť lana od stredu stožiaru	Vtower [m] výška lana nad zemou pri stožiaru	Vmid [m] výška lana nad zemou v mieste najväčšieho previsnutia
1	0.258	1.565	0.234	-1.75	12	12
2	0.258	1.565	0.234	0	12	12
3	0.258	1.565	0.234	1.75	12	12

Merná rezistivita zeme **Rho** 100 Ω·m, frekvencia **Freq. init** 50 Hz a dĺžka polovice vedenia **Length** 10 km.

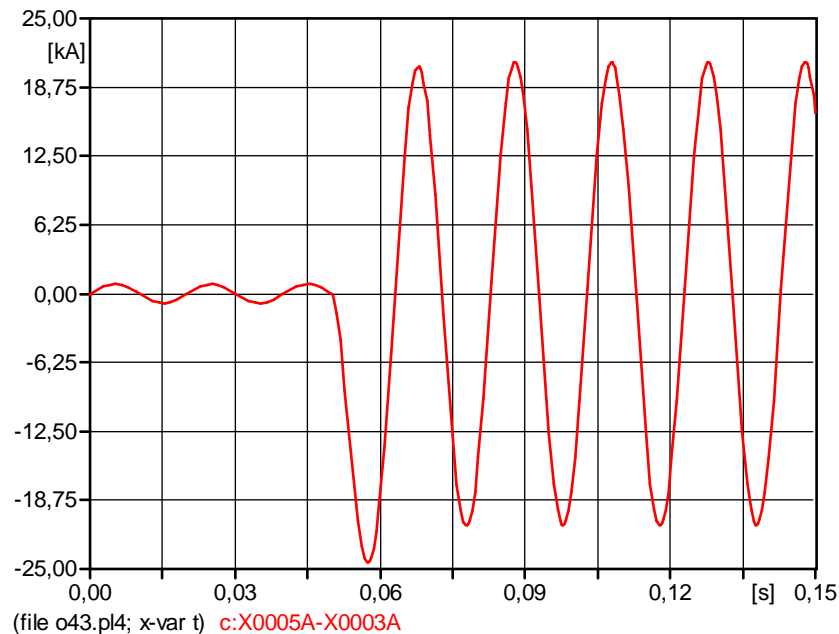


Obr. 4.2 Rozmiestnenie vodičov na stožiaru

Zaťaž je realizovaná pomocou 3-fázového RLC obvodu v zapojení do trojuholníka s parametrami $R_1 = R_2 = R_3 = 300 \Omega$ a $L_1 = L_2 = L_3 = 0,1 \text{ mH}$. Priebeh prúdu sa sníma vo vetve fázy A.



Obr. 4.3 Schéma zapojenia v ATPDraw pre 3-fázový kovový skrat napájaný ideálnym zdrojom napätia



Obr. 4.4 Priebeh prúdu pred a po skrate vo fáze A

Skrat nastal v čase 50 ms pri prechode prúdu vo fáze A nulou a skratový prúd má jednosmernú, rýchle tlmenú zložku. Nárazový skratový prúd činí 24,4 kA.

V prípade 3-fázového skratu sa jednalo o tzv. symetrický skrat. Tento druh skratu je pri vonkajších vedeniach skôr ojedinelý. Častejšie dochádza k tzv. nesymetrickým skratom.

4.2.2 Metóda symetrických zložiek

V 3-fázových sústavách je možné každú trojicu nesymetrických fázorov nahradiť zložením symetrických fázorov súslednej, spätnej a netočivej sústavy. Pokiaľ je zvolená fáza A ako referenčná, platí:

$$\begin{aligned}\underline{U}_A &= \underline{U}_1 + \underline{U}_2 + \underline{U}_0 \\ \underline{U}_B &= a^2 \cdot \underline{U}_1 + a \cdot \underline{U}_2 + \underline{U}_0 \\ \underline{U}_C &= a \cdot \underline{U}_1 + a^2 \cdot \underline{U}_2 + \underline{U}_0\end{aligned}\quad (4.11)$$

$$a = e^{j120^\circ} \quad (4.12)$$

Po označení:

$$[\underline{U}] = \begin{pmatrix} \underline{U}_A \\ \underline{U}_B \\ \underline{U}_C \end{pmatrix} \quad [\underline{U}_F] = \begin{pmatrix} \underline{U}_1 \\ \underline{U}_2 \\ \underline{U}_0 \end{pmatrix} \quad (4.13)$$

je možné sústavu prepísať do maticového tvaru:

$$[\underline{U}] = [\underline{F}] \cdot [\underline{U}_F] \quad (4.14)$$

kde pre maticu $[\underline{F}]$ platí:

$$[\mathbf{F}] = \begin{pmatrix} 1 & 1 & 1 \\ a^2 & a & 1 \\ a & a^2 & 1 \end{pmatrix} \quad (4.15)$$

Pretože determinant matice $[\mathbf{F}]$ je rôzny od nuly, je možné uskutočniť jej inverziu a prejsť od fázových hodnôt k hodnotám jednosmerných zložiek:

$$[\mathbf{U}_F] = [\mathbf{F}]^{-1} \cdot [\mathbf{U}] \quad (4.16)$$

kde pre inverznú maticu $[\mathbf{F}]^{-1}$ platí:

$$[\mathbf{F}]^{-1} = \frac{1}{3} \cdot \begin{pmatrix} 1 & a & a^2 \\ 1 & a^2 & a \\ 1 & 1 & 1 \end{pmatrix} \quad (4.17)$$

4.2.2.1 Symetrické zložky v podmienkach nesymetrického prevádzkového stavu

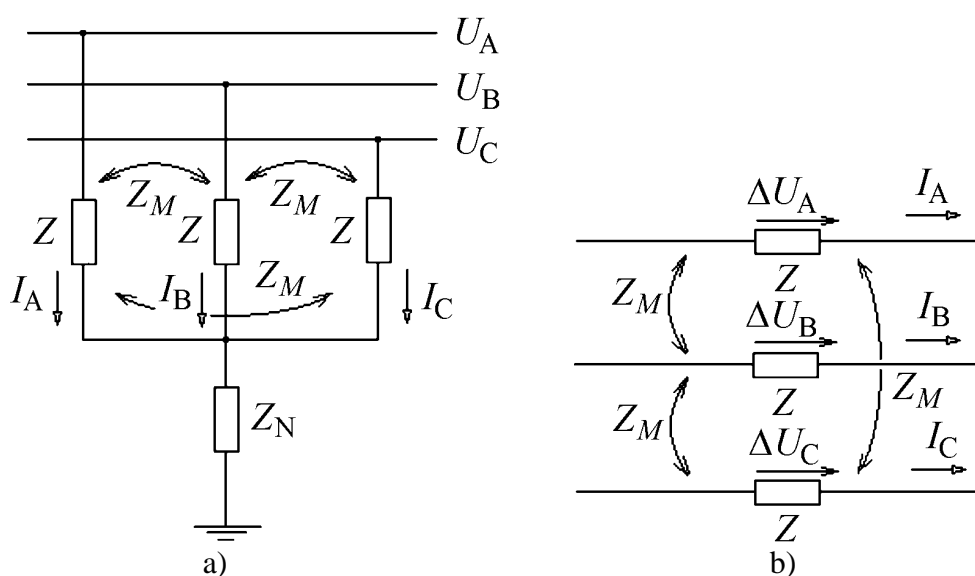
V tejto podkapitole budú uvedené rozборы nesymetrických prevádzkových stavov s obmedzením na prípady jedinej miestnej nesymetrie, t.j. platí predpoklad, že nesymetria je spôsobená jediným nesymetrickým článkom a ostatné články ES sú symetrické. Sieť medzi zdrojmi a miestom nesymetrie je možné vyjadriť kombináciou symetrických pasívnych článkov zapojených pozdĺžne a priečne.

Zapojenia pre **priečny symetrický článok** odpovedajú nasledujúcej rovnici:

$$[\mathbf{U}] = [\mathbf{Z}] \cdot [\mathbf{I}] + [\mathbf{Z}_N] \cdot [\mathbf{I}] \quad (4.18)$$

Pre jednotlivé matice platí:

$$[\mathbf{Z}] = \begin{pmatrix} \mathbf{Z} & \mathbf{Z}_M & \mathbf{Z}_M \\ \mathbf{Z}_M & \mathbf{Z} & \mathbf{Z}_M \\ \mathbf{Z}_M & \mathbf{Z}_M & \mathbf{Z} \end{pmatrix} \quad [\mathbf{Z}_N] = \begin{pmatrix} \mathbf{Z}_N & \mathbf{Z}_N & \mathbf{Z}_N \\ \mathbf{Z}_N & \mathbf{Z}_N & \mathbf{Z}_N \\ \mathbf{Z}_N & \mathbf{Z}_N & \mathbf{Z}_N \end{pmatrix} \quad (4.19)$$



Obr. 4.5 Zapojenie a) priečného symetrického článku, b) pozdĺžneho symetrického článku

Po prechode k súmerným zložkám platí:

$$[\underline{U}_F] = [\mathbf{F}]^{-1} \cdot [\mathbf{Z}] \cdot [\mathbf{F}] \cdot [\underline{I}_F] + [\mathbf{F}]^{-1} \cdot [\mathbf{Z}_N] \cdot [\mathbf{F}] \cdot [\underline{I}_F] = [\mathbf{Z}_P] \cdot [\underline{I}_F] \quad (4.20)$$

$$[\underline{I}_F] = \begin{pmatrix} \underline{I}_1 \\ \underline{I}_2 \\ \underline{I}_0 \end{pmatrix} \quad [\underline{I}] = \begin{pmatrix} \underline{I}_A \\ \underline{I}_B \\ \underline{I}_C \end{pmatrix} \quad (4.21)$$

Pričom prúdy I_1, I_2, I_0 sú súsledné, spätné a netočivé zložkové prúdy.

$$[\mathbf{Z}_P] = \begin{pmatrix} \mathbf{Z} - \mathbf{Z}_M & 0 & 0 \\ 0 & \mathbf{Z} - \mathbf{Z}_M & 0 \\ 0 & 0 & \mathbf{Z} + 2 \cdot \mathbf{Z}_M + 3 \cdot \mathbf{Z}_N \end{pmatrix} \quad (4.22)$$

$[\mathbf{Z}_P]$ je matica zložkových impedancií priečného článku.

Zapojeniu pre *pozdĺžny symetrický článok* zodpovedajú nasledujúce rovnice:

$$[\Delta \underline{U}] = [\mathbf{Z}] \cdot [\underline{I}] \quad (4.23)$$

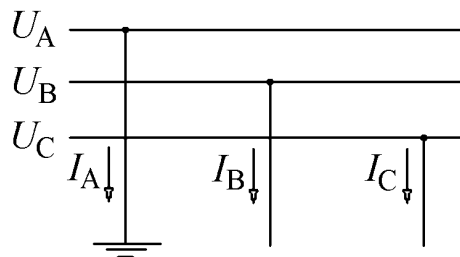
Odkiaľ pre súmerné zložky:

$$[\Delta \underline{U}_F] = [\mathbf{F}]^{-1} \cdot [\mathbf{Z}] \cdot [\mathbf{F}] \cdot [\underline{I}_F] = [\mathbf{Z}_S] \cdot [\underline{I}_F] \quad (4.24)$$

$$[\mathbf{Z}_S] = \begin{pmatrix} \mathbf{Z} - \mathbf{Z}_M & 0 & 0 \\ 0 & \mathbf{Z} - \mathbf{Z}_M & 0 \\ 0 & 0 & \mathbf{Z} + 2 \cdot \mathbf{Z}_M \end{pmatrix} \quad (4.25)$$

$[\mathbf{Z}_S]$ je matica zložkových impedancií pozdĺžneho článku.

4.2.3 Jednofázový kovový skrat



Obr. 4.6 Schematické znázornenie jednofázového skratu

Jedná sa o priečnu nesymetriu a z vyššie uvedeného obrázka je zrejmé, že platí:

$$\underline{U}_A = 0 \quad \underline{I}_B = \underline{I}_C = 0 \quad (4.26)$$

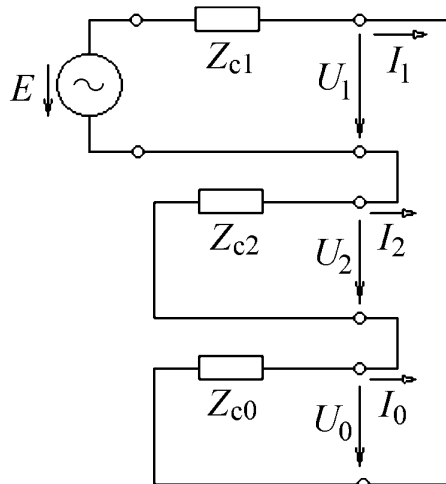
Prechodom k zložkovým veličinám platí pre zložkové prúdy rovnica:

$$[\underline{I}_F] = [\mathbf{F}]^{-1} \cdot [\underline{I}] = \frac{1}{3} \cdot \begin{pmatrix} \underline{I}_A \\ \underline{I}_A \\ \underline{I}_A \end{pmatrix} \quad (4.27)$$

Z rovnice vyplýva:

$$\underline{I}_1 = \underline{I}_2 = \underline{I}_0 = \frac{1}{3} \cdot \underline{I}_A \quad (4.28)$$

Je možné zostaviť náhradnú zložkovú schému:



Obr. 4.7 Náhradná zložková schéma pre jednofázový skrat

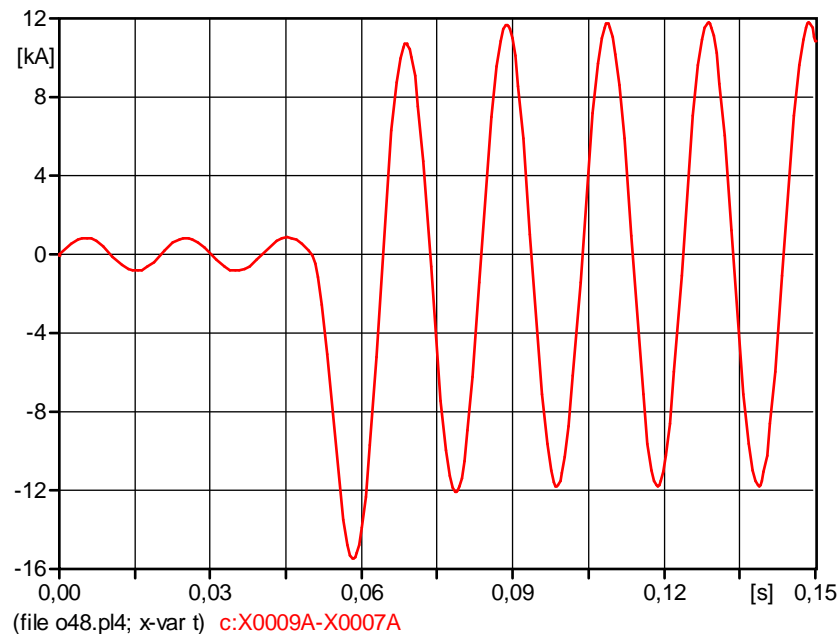
Pre zložkové napätia platí:

$$\begin{aligned} \underline{U}_1 &= (\underline{Z}_{c2} + \underline{Z}_{c0}) \cdot \underline{I}_1 \\ \underline{U}_2 &= -\underline{Z}_{c2} \cdot \underline{I}_1 \\ \underline{U}_0 &= -\underline{Z}_{c0} \cdot \underline{I}_1 \end{aligned} \quad (4.29)$$

$[\underline{Z}_{c1}]$, $[\underline{Z}_{c2}]$, $[\underline{Z}_{c0}]$ sú celkové impedancie súslednej, spätnej a netočivej zložkovej sústavy.

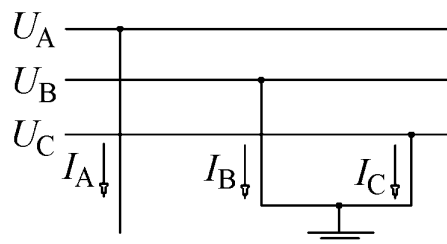
4.2.3.1 Riešenie programom ATP

Pri riešení je použitý obvod z predchádzajúceho príkladu (viď obr. 4.3), kde v čase 50 ms je spojená fáza A so zemou.



Obr. 4.8 Priebeh prúdu pred a po 1-fázovom skrate vo fáze A

4.2.4 Dvojfázový kovový zemný skrat



Obr. 4.9 Schematické znázornenie 2-fázového zemného skratu

Z vyššie uvedeného obrázku je zřejmé, že platí:

$$\underline{I}_A = 0 \quad \underline{U}_B = \underline{U}_C = 0 \quad (4.30)$$

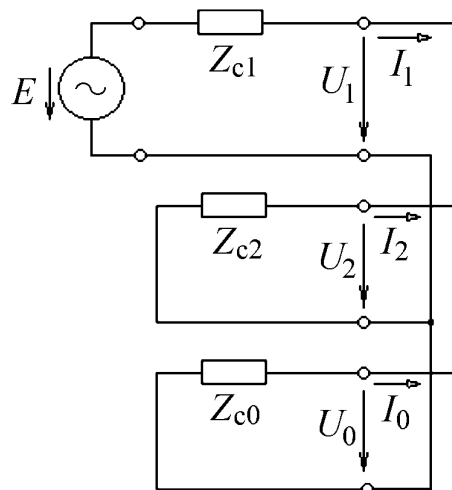
Prechodom k zložkovým veličinám platia pre zložkové napätia rovnice:

$$\underline{[U_F]} = \underline{[F]}^{-1} \cdot \underline{[U]} = \frac{1}{3} \cdot \begin{pmatrix} \underline{U}_A \\ \underline{U}_A \\ \underline{U}_A \end{pmatrix} \quad (4.31)$$

Z rovnice vyplýva:

$$\underline{U}_1 = \underline{U}_2 = \underline{U}_0 = \frac{1}{3} \cdot \underline{U}_A \quad (4.32)$$

Je možné zostaviť náhradnú zložkovú schému:



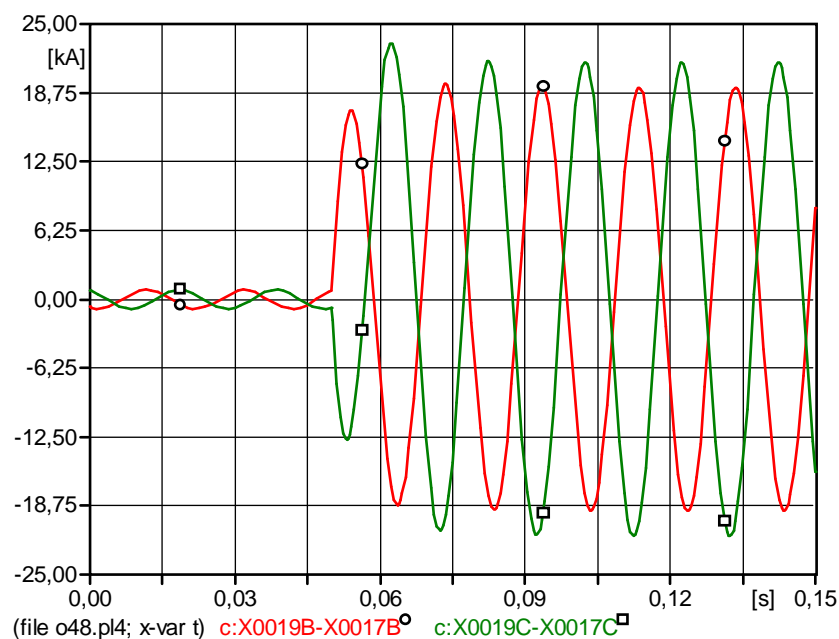
Obr. 4.10 Náhradná zložková schéma pre 2-fázový zemný skrat

Pre zložkové prúdy je možné pomocou vzorcov pre prúdový delič určiť:

$$\begin{aligned} \underline{I}_1 &= \frac{\underline{E}}{\underline{Z}_{c1} + \frac{\underline{Z}_{c2} \cdot \underline{Z}_{c0}}{\underline{Z}_{c2} + \underline{Z}_{c0}}} \\ \underline{I}_2 &= -\frac{\underline{Z}_{c0}}{\underline{Z}_{c2} + \underline{Z}_{c0}} \cdot \underline{I}_1 \\ \underline{I}_0 &= -\frac{\underline{Z}_{c2}}{\underline{Z}_{c2} + \underline{Z}_{c0}} \cdot \underline{I}_1 \end{aligned} \quad (4.33)$$

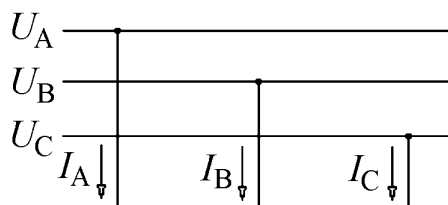
4.2.4.1 Riešenie programom ATP

Pri riešení je použitý obvod z predchádzajúceho príkladu (viď obr. 4.3), kde v čase 50 ms je v súlade s obr. 4.9 spojená fáza B a fáza C so zemou (viď obr. 4.11).



Obr. 4.11 Priebeh prúdu pred a po 2-fázovom zemnom skrate vo fáze B a C

4.2.5 Dvojfázový kovový skrat



Obr. 4.12 Schematické znázornenie 2-fázového skratu

Z vyššie uvedeného obrázka je zrejmé, že platí:

$$\underline{I}_A = 0 \quad \underline{U}_B = \underline{U}_C \quad \underline{I}_B = -\underline{I}_C \quad (4.34)$$

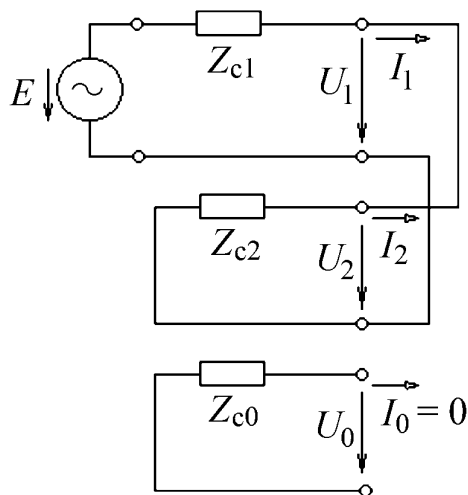
Prechodom k zložkovým veličinám platia pre zložkové prúdy rovnice:

$$[\underline{I}_F] = [\underline{F}]^{-1} \cdot [\underline{I}] = \frac{1}{3} \cdot \begin{pmatrix} j \cdot \sqrt{3} \cdot \underline{I}_B \\ -j \cdot \sqrt{3} \cdot \underline{I}_B \\ 0 \end{pmatrix} \quad (4.35)$$

Z rovnice vyplýva:

$$\underline{I}_1 = -\underline{I}_2 \quad \underline{I}_0 = 0 \quad (4.36)$$

Je možné zostaviť náhradnú zložkovú schému:



Obr. 4.13 Náhradná zložková schéma pre 2-fázový skrat

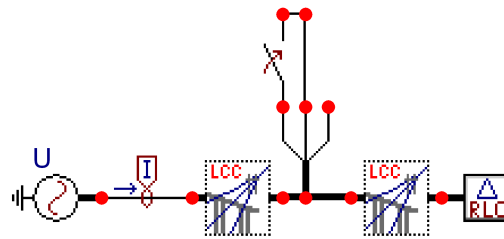
Pre zložkové veličiny je možné na základe náhradnej schémy na obr. 4.13 napísať:

$$\underline{I}_1 = \frac{\underline{E}}{\underline{Z}_{c1} + \underline{Z}_{c2}} \quad \underline{I}_2 = -\underline{I}_1 \quad \underline{I}_0 = 0 \quad (4.37)$$

$$\underline{U}_1 = \underline{U}_2 = -\underline{Z}_{c2} \cdot \underline{I}_2 = \underline{Z}_{c2} \cdot \underline{I}_1 \quad \underline{U}_0 = 0 \quad (4.38)$$

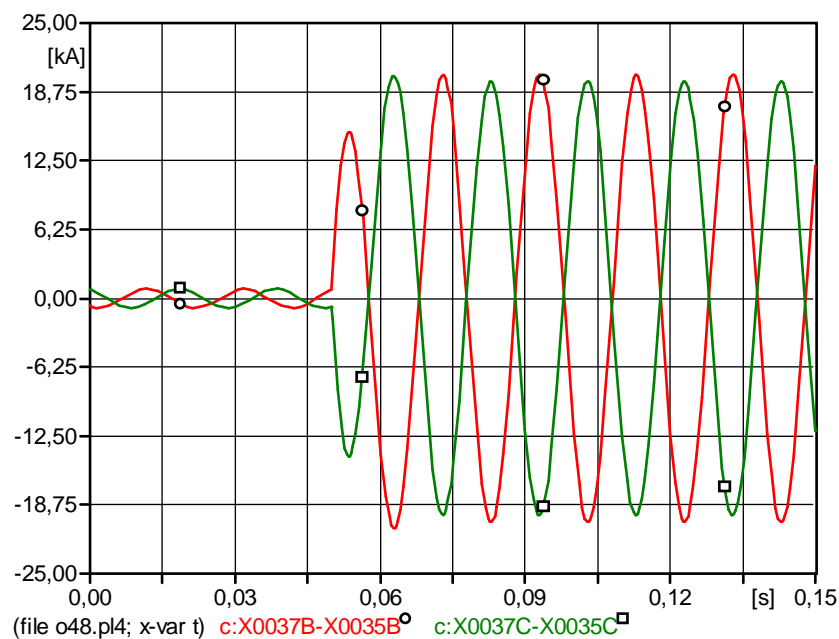
4.2.5.1 Riešenie programom ATP

Pri riešení je použitý obvod z predchádzajúceho príkladu (viď obr. 4.3), iné je len umiestnenie spínača. V čase 50 ms v súlade s obr. 4.12 sú vzájomne spojené fáza B a fáza C.



Obr. 4.14 Obvod 2-fázového skratu

Mnohokrát je vhodné poznať pomer veľkostí skratových prúdov v jednom mieste sústavy pri rôznych druhoch skratov. V nižšie uvedených vzorcoch je urobené porovnanie hodnôt počiatočných rázových prúdov nesymetrických skratov s prúdom 3-fázového symetrického skratu. Porovnania budú uskutočnené pre okamih $t = 0$. Pri orientačných výpočtoch môžu byť zanedbané rezistancie a je možné predpokladať symetrické celkové reaktancie $X_{c2} = X_{c1}$.



Obr. 4.15 Priebeh prúdu pred a po 2-fázovom skrate vo fáze B a C

4.2.6 Porovnanie skratových prúdov

Trojfázový kovový skrat

$$I_{k3}'' = I_1 = \frac{E''}{X_{c1}} \quad (4.39)$$

Jednofázový kovový skrat

$$I''_{k1} = 3 \cdot I_1 = \frac{E''}{2 \cdot X_{c1} + X_{c0}} = \frac{3}{2 + \frac{X_{c0}}{X_{c1}}} \cdot I''_{k3} \quad (4.40)$$

Pomer reaktancií X_{c0}/X_{c1} sa môže meniť od 0 až do nekonečna, preto môže skratový prúd nadobúdať hodnoty:

$$I''_{k1} = (0 \div 1,5) \cdot I''_{k3} \quad (4.41)$$

Dvojfázový kovový zemný skrat

Skratový prúd pri dvojfázovom kovovom zemnom skrate je možné určiť pomocou zložkových prúdov zo vzťahu (4.33).

Pri hodnotách (X_{c0}/X_{c1}) blízkyh nule platí:

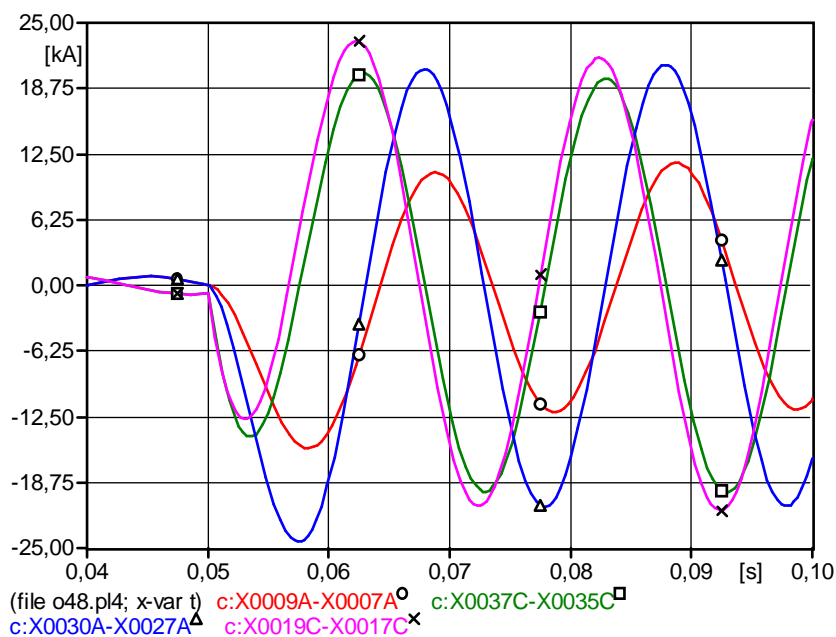
$$I''_{k2,N} = \sqrt{3} \cdot I''_{k3} \quad (4.42)$$

Pri hodnotách (X_{c0}/X_{c1}) blízkyh nekonečnu platí:

$$I''_{k2,N} = \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot I''_{k3} \quad (4.43)$$

Dvojfázový kovový skrat

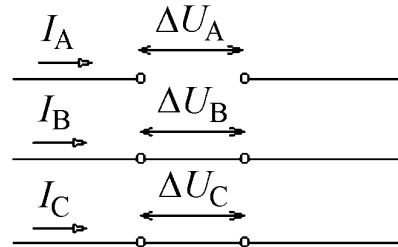
$$I''_{k2} = \sqrt{3} \cdot I_1 = \frac{E''}{2 \cdot X_{c1} + X_{c0}} = \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot I''_{k3} \quad (4.44)$$



X0009A-X0007A 1-fázový skrat, X0037C-X0035C 2-fázový skrat,
 X0030A-X0027A 3fázový skrat, X0019C-X0017C 2-fázový zemný skrat
 Obr. 4.16 Porovnanie priebehov prúdov pri rôznych druhoch skratov

4.2.6 Prerušenie jednej fázy

Prerušenie jednej fázy je možné chápať ako zapojenie nesymetrického pozdĺžneho článku (podľa obr. 4.5b) v mieste poruchy, charakterizovaného úbytkami napätia v jednotlivých fázach.



Obr. 4.17 Schematické znázornenie prerušenia jednej fázy

Podľa obr. 4.17 je možné napísať:

$$\underline{I}_A = 0 \quad \Delta \underline{U}_B = \Delta \underline{U}_C \quad (4.45)$$

Po porovnaní rovníc pre 2-fázový zemný skrat je zrejماً zhoda, preto bude i podobný postup pri odvodení výsledných vzťahov pre zložkové napätia a prúdy:

$$\Delta \underline{U}_1 = \Delta \underline{U}_2 = \Delta \underline{U}_0 = \frac{1}{3} \cdot \Delta \underline{U}_A \quad (4.46)$$

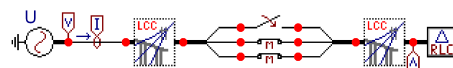
$$\underline{I}_1 = \frac{\underline{E}}{\underline{Z}_{c1} + \frac{\underline{Z}_{c2} \cdot \underline{Z}_{c0}}{\underline{Z}_{c2} + \underline{Z}_{c0}}}$$

$$\underline{I}_2 = -\frac{\underline{Z}_{c0}}{\underline{Z}_{c2} + \underline{Z}_{c0}} \cdot \underline{I}_1$$

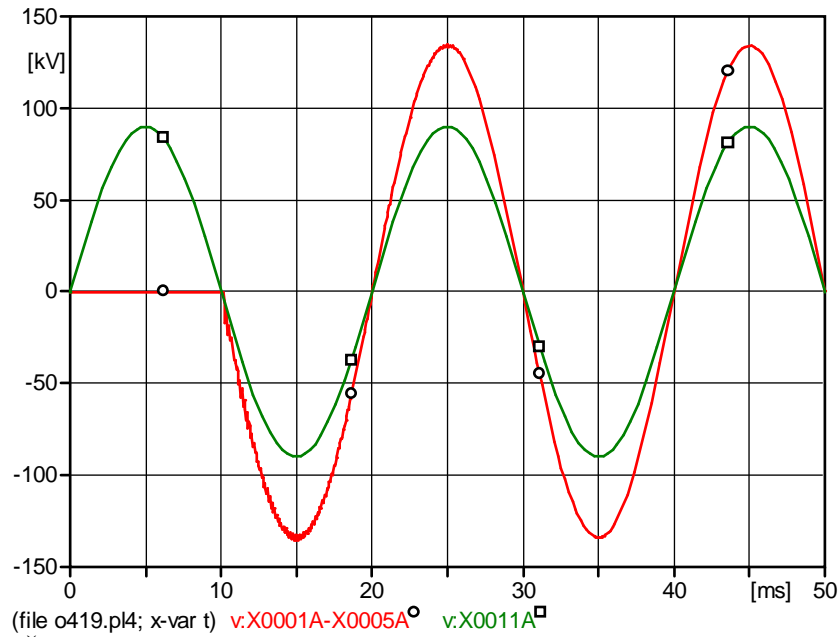
$$\underline{I}_0 = -\frac{\underline{Z}_{c2}}{\underline{Z}_{c2} + \underline{Z}_{c0}} \cdot \underline{I}_1 \quad (4.47)$$

4.2.6.1 Riešenie programom ATP

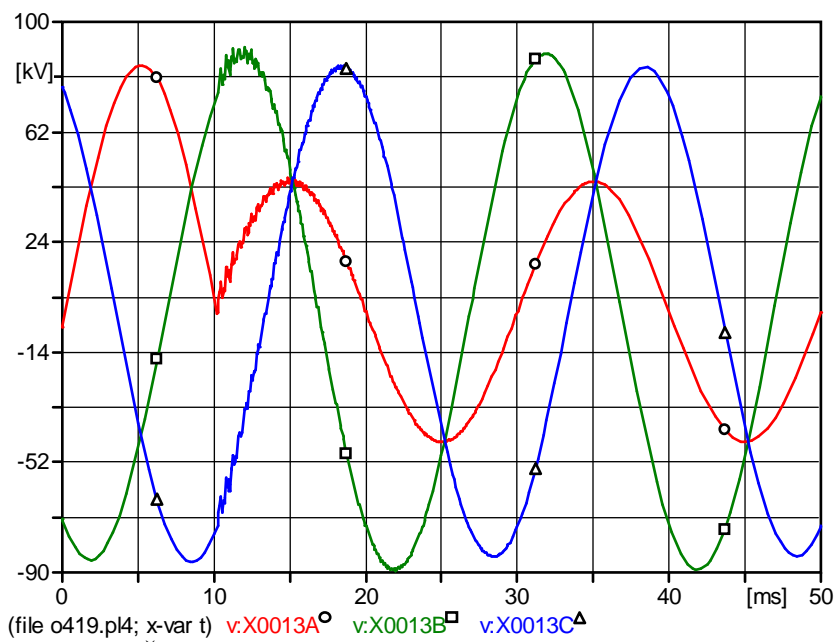
Pri riešení sa znova ako v predchádzajúcich prípadoch využijú parametre vedenia obvodu na obr. 4.3. V čase 10 ms je prerušená fáza A (vid' obr. 4.18). Na obr. 4.19, obr. 4.20 a obr. 4.21 je zobrazený priebeh zotaveného napätia v mieste prerušenia (X0001A-X0005A), napätie zdroja (X0011A), napätie na záťaži (X0013) a prúdy zo zdroja (X0011-X0009).



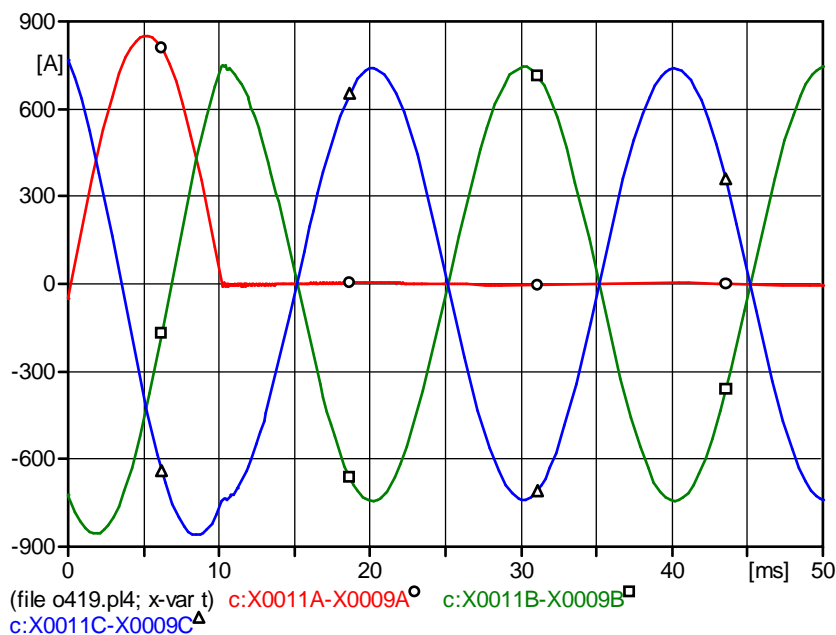
Obr. 4.18 Obvod prerušenia jednej fázy



Obr. 4.19 Časová závislosť zotaveného napätia v mieste prerušenia a napätia zdroja



Obr. 4.20 Časová závislosť napätí na záťaži pri prerušení fázy A

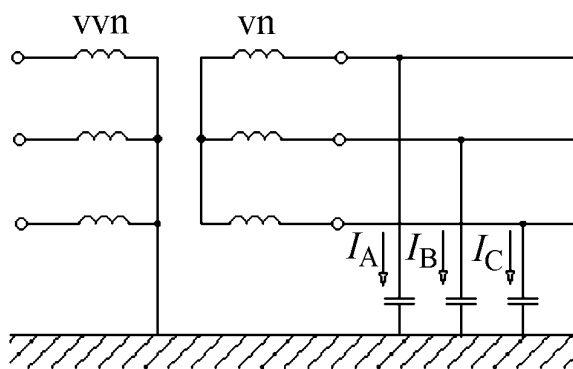


Obr. 4.21 Časová závislosť prúdov pri prerušení fázy A

4.2.7 Zemné spojenie

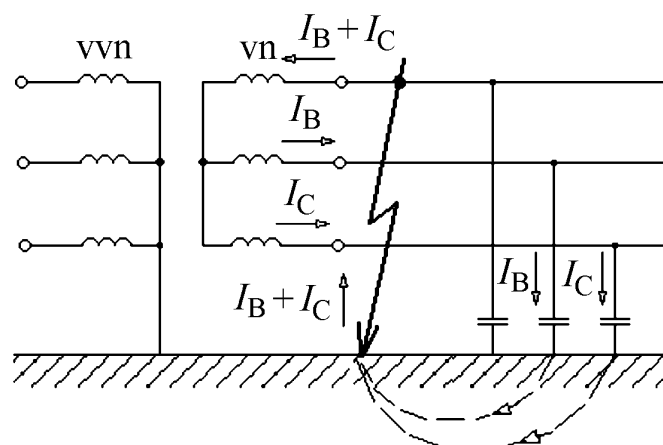
V kapitole 4.2.3 bolo vodivé spojenie jednej fázy so zemou nazývané jednofázový skrat, avšak pri predpoklade, že k takému vodivému spojeniu došlo v sieťach prevádzkovaných s priamo uzemneným uzlom. V sieťach prevádzkovaných s izolovaným uzlom, prípadne v sieťach kompenzovaných, t.j. v sieťach, ktorých uzol je spojený so zemou cez zhášaciu tlmivku alebo pri ktorých je vytvorený umelý bod pomocou zhášacích transformátorov, môže vzniknúť zemné spojenie. Pri 1-fázovom skrate je skratový prúd niekoľkonásobne väčší ako prevádzkový (alebo je blízky prevádzkovému), ďalej má induktívny charakter, zatiaľ čo miesto zemného spojenia prechádza len malý prúd kapacitného charakteru a jeho veľkosť nezávisí od vzdialenosti od zdroja.

V izolovaných sieťach v ustálenom prevádzkovom stave prechádzajú kapacitami voči zemi kapacitné prúdy, ktorých súčet v symetrickej sieti a symetrickom napätí je rovný nule (viď obr. 4.22).



Obr. 4.22 Schematické znázornenie siete s izolovaným uzlom

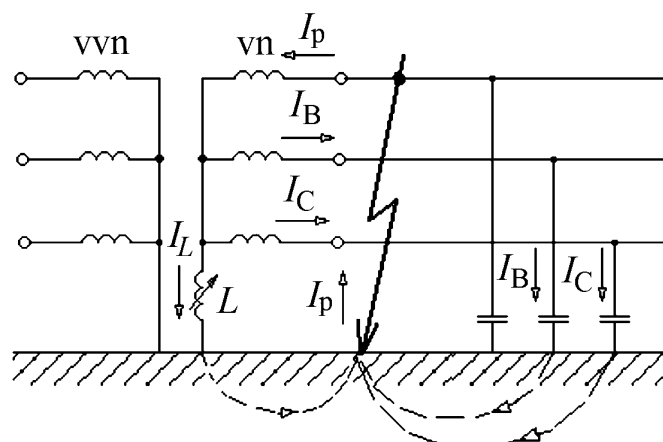
V prípade, že dôjde v takejto sieti k spojeniu niektorej fázy so zemou, uzatvárajú sa kapacitné prúdy neporušených fáz cez zem, miesto kontaktu vodiča so zemou a vinutia transformátora. Zemou prechádzajú prúdy, ktoré pri rozsiahlejších sieťach môžu dosahovať značné veľkosti.



Obr. 4.23 Schematické znázornenie siete s izolovaným uzlom pri zemnom spojení

Pokiaľ poruchový prúd neprekročí stanovenú hodnotu, môže byť sieť s izolovaným uzlom ponechaná v prevádzke. Komplikácie nastávajú pri zemnom spojení, keď elektrický oblúk horí nestabilne, t.j. dochádza k jeho uhasnutiu a opätovnému zapáľovaniu (vznikne tzv. prerušované zemné spojenie). V týchto prípadoch môže byť prerušované zemné spojenie zdrojom nebezpečných prepätí v sieti. V sieťach s väčšou rozlohou, kde poruchový zemný prúd presiahne hodnotu asi 5 A vzniká pri zemných spojeniach spravidla oblúk, ktorý sa rozrastie do značných dĺžok. Býva veľmi pohyblivý a takmer vždy zasiahne susedné fázy. Dôsledkom toho sú potom 2- alebo 3-fázové skraty. Horiace oblúkové zemné spojenie prepaľuje vodiče, drevené stožiare a ničí izolátory.

Účinným prostriedkom pre potlačenie oblúka v mieste zemného spojenia je uzemnenie neutrálneho bodu transformátora cez tlmivku, ktorej indukčnosť sa dá nastaviť tak, aby indukčný prúd tečúci od nej k miestu zemného spojenia kompenzoval kapacitné prúdy zdravých fáz a aby tak došlo k uhasnutiu oblúka.



Obr. 4.24 Schematické znázornenie vplyvu zhášacej tlmivky

4.2.7.1 Výpočet trvalého zemného spojenia

Výpočty zemného spojenia sa často uskutočňujú vo fázových hodnotách. Pretože kapacitné reaktancie elektrického vedenia sú značne väčšie ako rezistancie a indukčné reaktancie článkov, je možné tieto rezistancie a reaktancie zanedbať.

Pre riešenie zemného spojenia z obr. 4.24, kde je uvažované zemné spojenie v sieti s uzlom transformátora uzemneným cez zhášaciu tlmivku, vychádza hodnota poruchového prúdu, ktorý preteká zemou:

$$I_p = \frac{X_C - 3 \cdot X_L}{X_L \cdot X_C} \cdot E \quad (4.48)$$

Pre nulovú hodnotu poruchového prúdu je potrebná veľkosť indukčnosti tlmivky, ktorá daná vzťahom:

$$L = \frac{1}{3 \cdot \omega^2 \cdot C_0} \quad (4.49)$$

kde C_0 je kapacita vodiča voči zemi v izolovanej sieti.

4.2.7.2 Riešenie programom ATP

Obvod bude zostavený najprv v súlade s obr. 4.23, teda bez použitia tlmivky. Ideálny zdroj napätia napája transformátor 110/22 kV. Na sekundárnu stranu transformátora je pripojené vedenie 22 kV. K zemnému spojeniu dôjde na konci vedenia v čase 3 ms.

Pre nastavenie parametrov ideálneho zdroja s frekvenciou je nutné najprv určiť veľkosť amplitúdy fázovej hodnoty napätia **Amp**, ktorá sa určila na základe vzťahu (4.10) a ktorej hodnota je: **Amp** = 89,815 kV.

Bol použitý transformátor 110/22 kV, 40 MVA s týmito parametrami: $S_n = 40$ MVA, $u_k = 11,5$ %, $\Delta P_k = 205$ kW, $i_0 = 0,4$ %, $\Delta P_0 = 40$ kW v zapojení Dy. Model transformátora bol na základe týchto parametrov vygenerovaný pomocou procedúry BCTRAN.

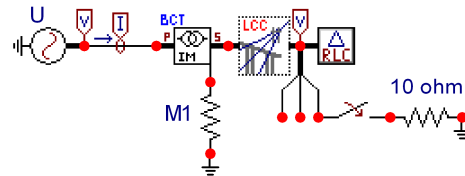
Záťaž je realizovaná pomocou 3-fázového RLC obvodu v zapojení do trojuholníka s parametrami $R_1 = R_2 = R_3 = 600 \Omega$. Odpor miesta zemného spojenia má hodnotu 10Ω .

Vedenie 22 kV je pri riešení zemného spojenia modelované pomocou procedúry Line/Cable Constants ekvivalentným π -článkom s uvažovaním **Skin efektu** s parametrami podľa Tab. 4.2. Rovnako ako v predchádzajúcich prípadoch nie je uvažovaný previs lana a je zadané **Vtower** = **Vmid**. Merná rezistivita zeme **Rho** je zvolená $100 \Omega \cdot m$, frekvencia **Freq. init** 50 Hz a dĺžka vedenia **Length** je 100 km.

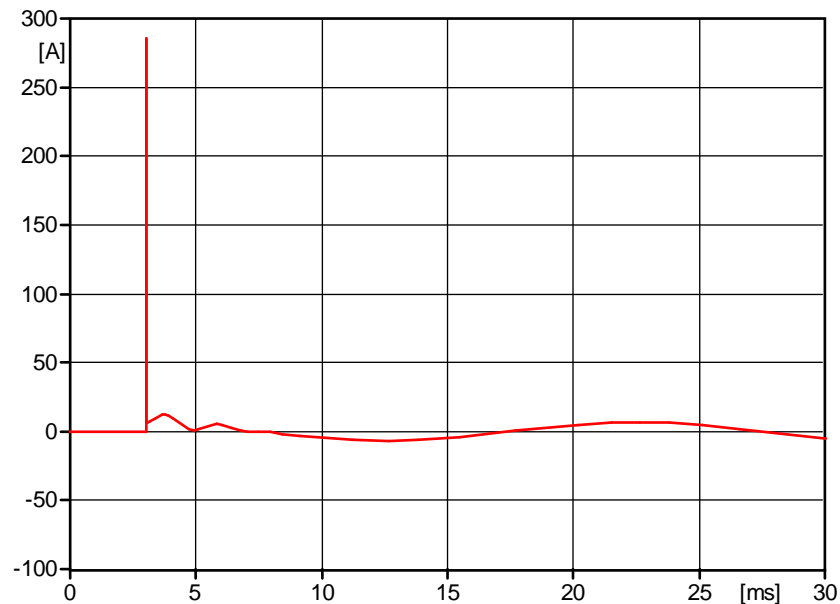
Po vygenerovaní modelu vedenia (**Run ATP**) a uložení (**Save as**) je možné prísť k zostaveniu celkovej schémy obvodu podľa obr. 4.25.

Tab. 4.2 Parametre vedenia 22 kV, AlFe6 95 mm² s dĺžkou 100 km

Phase no číslo fázy	Rin [cm] polomer ocelevej duše vodiča	Rout [cm] vonkajší polomer vodiča-lana	Resis [Ω /km] odpor vodiča na jeden kilometer dĺžky	Horiz [m] horizontálna vzdialenosť lana od stredu stožiaru	Vtower [m] výška lana nad zemou pri stožiaru	Vmid [m] výška lana nad zemou v mieste najväčšieho previsu
1	0,218	1,335	0,319	-1.75	12	12
2	0,218	1,335	0,319	0	12	12
3	0,218	1,335	0,319	1.75	12	12

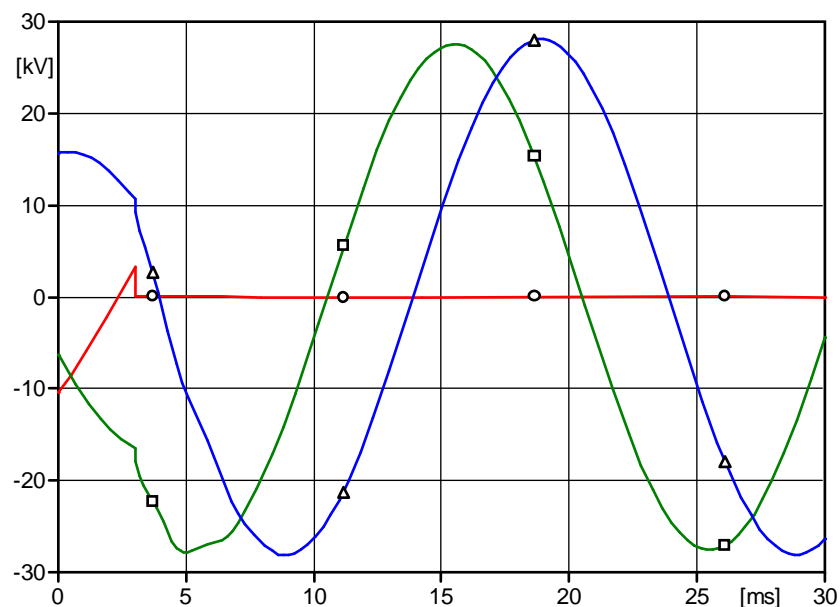


Obr. 4.25 Obvod siete s izolovaným neutrálnym bodom transformátora pri zemnom spojení



(file o425.p4; x-var t) c:X0001A-XX0014

Obr. 4.26 Priebeh nekompensovaného poruchového prúdu pri zemnom spojení

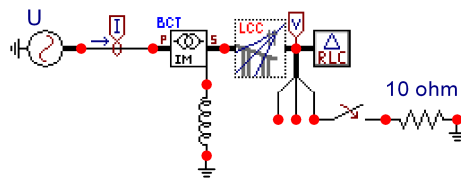


(file o425.p4; x-var t) v:X0001A v:X0001B v:X0001C

Obr. 4.27 Priebeh napätia v mieste zemného spojenja

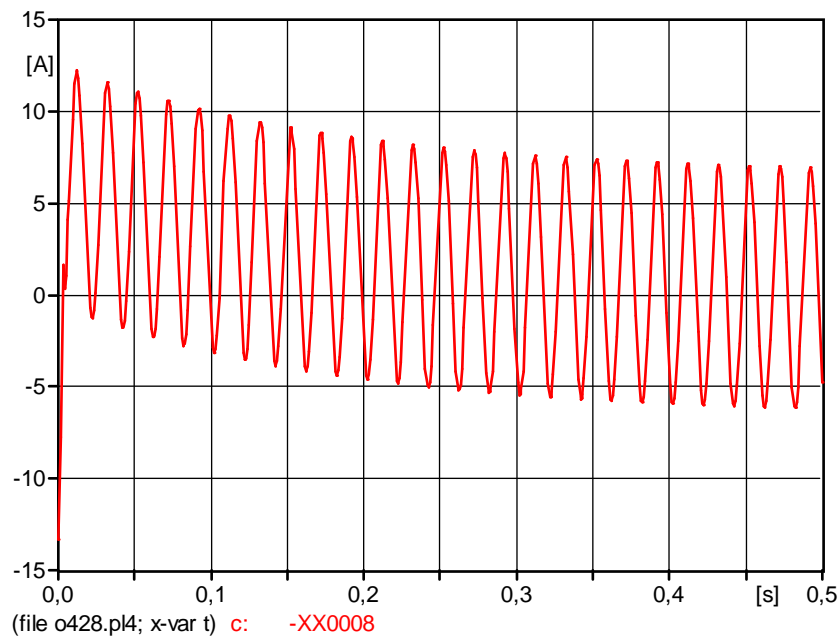
Indukčnosť kompenzačnej tlmivky sa určí z amplitúdy poruchového prúdu $I = 6,7$ odčítanej z obr. 4.26 a z amplitúdy napätia $U = 27,6$ odčítanej z obr. 4.27 vzťahom:

$$L = \frac{U}{\sqrt{3} \cdot I \cdot \omega} = \frac{27,6}{\sqrt{3} \cdot 6,7 \cdot 314} = 7,57 \text{ H} \quad (4.49)$$



Obr. 4.28 Obvod zemného spojenia s použitím zhašacej tlmivky

Následným doladením tlmivky je možné dosiahnuť prakticky nulovú hodnotu poruchového prúdu, ktorý mal v tomto prípade amplitúdu menšiu ako jeden ampér. Tlmivkou pritom preteká striedavý prúd s prechodnou jednosmernou zložkou.



Obr. 4.29 Výsledný priebeh prúdu kompenzačnou tlmivkou

5 TOČIVÉ ELEKTRICKÉ STROJE

Modelovaním točivých strojov sa dajú simulovať aj elektromechanické prechodné deje v elektrizačných sústavách. Sem patrí problematika stability, ostrovná prevádzka alebo len rozbehy motorov a pod. ATP má k dispozícii model synchronného stroja SM59 a model univerzálneho motora UM.

5.1 Model SM59

Pre stroj s konštantným budením a mechanickým momentom sa použije neriadený model, v inom prípade riadený model pomocou ôsmich in/out signálov TACS. Neriadený model má len trojfázový vývod z kotvy.



Model neobsahuje saturáciu a počítá s jednou hmotnosťou na hriadeli (v ATP je možnosť brať viac hmotností). Zadávať sa elektrické a mechanické parametre stroja. Požadované veličiny sú popísané v **Helpe**. Každý z vývodov pre riadenie umožňuje voľbu typu medzi 0 a 22. **Help** rovnako popisuje, či ide o vstupný alebo výstupný signál a čo definuje. Typ 0 ignoruje signál, typ 15 nie je použitý a zvyšné do 20 sú rôzne výstupné premenné. Typ 21 slúži pre riadenie budenia a 22 pre riadenie mechanického výkonu.

5.2 Model UM

ATPDraw (verzia 4) poskytuje voľbu 5 typov, program ATP ich pozná 12. UM1 je model trojfázového synchronného stroja, UM3 indukčný kľetkový stroj a UM4 krúžkový, UM6 je jednofázový stroj a UM8 jednosmerný.



V ATPDraw sa jednotlivé požadované hodnoty zadávajú v dialógovom okne a ich význam je popísaný v **Helpe**. Navyše sa pre univerzálne stroje v každom jednotlivom dátovom súbore volí spoločne spôsob inicializácie, použitý systém jednotiek a vzájomné prepojenie strojov prostredníctvom voľby **ATP Settings Switch/UM**.

5.3 Model motorgenerátora

Spôsob práce s modelom UM ukazuje príklad publikovaný na EMTP Summer Course v roku 1989 v Leuvene: J.A. Martinez: Simulation of a three-phase synchronous motor-generator using the U. M. code.

UM model synchronného stroja umožňuje zostaviť obvod so strojmi s rôznou frekvenciou, zatiaľ čo SM59 zadáva tú istú frekvenciu pre každý stroj. Mechanickú väzbu medzi strojmi je možné realizovať dvomi spôsobmi. Priame prepojenie je vhodné pre malú mechanickú sústavu dvoch alebo troch strojov. Druhý spôsob rieši mechanickú sústavu každého hriadeľa zvlášť a vzájomná väzba sa uskutočňuje pomocou TACS. V príklade bude použitý len prvý spôsob.

5.3.1 Parametre obvodu modelu UM

Daná elektrická sieť má amplitúdu napätia 9,8 kV a frekvenciu 50 Hz, jej ekvivalentná impedancia je 0,25 Ω a 3,5 mH. Nastavenie UM v ATP je: automatická iniciácia, jednotky SI a prepojenie má voľbu *prediction*. Pre iniciáciu generátora je zvolená maximálna hodnota

9,4 kV a ekvivalent mechanickej záťaže 5Ω a 4,5 mH. Pomocou rovníc obvodu bola vypočítaná hodnota iniciačného napätia pre motor: 9,444 kV a $-9,4^\circ$. V nasledujúcej tabuľke sú uvedené hodnoty oboch strojov.

odlišné parametre

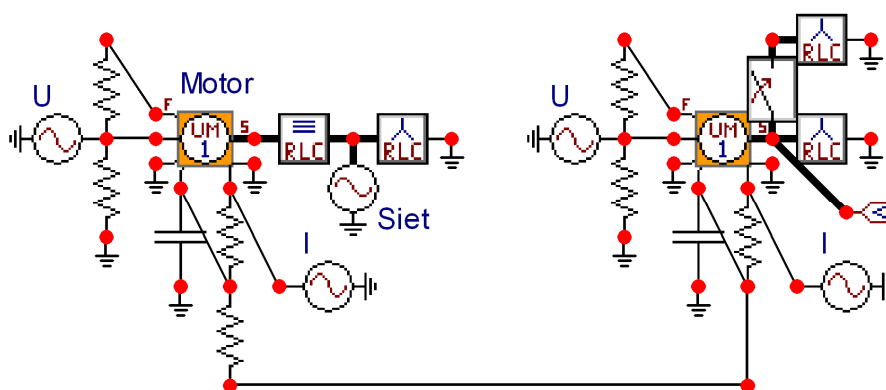
	jednotka	MOTOR	GENERÁTOR
výkon	MVA	50	45
napätie statora	kV	12	12
frekvencia	Hz	50	100
počet pólov	–	6	12

spoločné parametre (pomerné hodnoty)

pozdlžna reaktancia	x_d	1,05	1,12
priečna reaktancia	x_q	0,80	0,90
tranzitná reaktancia	x_d'	0,25	0,30
subtranzitná pozdlžna reaktancia	x_d''	0,16	0,20
subtranzitná priečna reaktancia	x_q''	0,22	0,24
rozptylová reaktancia kotvy	x_l	0,15	0,18
odpor statora	r	0,005	0,008

spoločné parametre – časové konštanty (čas v sekundách)

moment zotrvačnosti	H	1,10	1,20
pozdlžna tranzitná naprázdno	τ_{d0}'	6,4	8,5
pozdlžna subtranzitná nakrátko	τ_{d0}''	0,032	0,036
priečna subtranzitná naprázdno	τ_{q0}''	0,050	0,060



Obr. 5.1 Schéma motorgenerátora v ATPDraw

Ľavý stroj na schéme je motor, pravý generátor. V dialógovom okne sú pre motor (generátor) v jednotlivých oknách zadané nasledujúce hodnoty:

General

spojenie do hviezdy; 3 polpáry (6 polpárov); počet cievok rotora d-2, q-1; frekvencia 50 (100 Hz); tolerancia 1E-12

Magnet.

LMUD je 0,0082506 (0,0095748); *LMUQ* je 0,0059588 (0,0073339); *Saturation*: none

Stator

Hodnoty pre statorové vinutie určuje menovitá impedancia stroja. Pre motor má hodnotu $12 \cdot 12 / 50 = 2,88 \Omega$. Odpor v tabuľke je potom pomerná hodnota $0,005 \cdot 2,88 = 0,0144$. Pre indukčnosť d a q sa berie pomerná hodnota rozptylovej reaktancie $0,15 \cdot 2,88 / (2 \cdot \pi \cdot 50) = 0,0013751$. Pre *LMUD* je pomerná reaktancia 0,9 a pre *LMUQ* 0,65.

	<i>R</i> (Ω)	<i>L</i> (H/p.u.)
0	0,0144 (0)	0,00055 (0)
d	0,0144 (0,0256)	0,0013751 (0,0018335)
q	0,0144 (0,0256)	0,0013751 (0,0018335)

Rotor

	<i>R</i> (Ω)	<i>L</i> (H/p.u.)
1	0,00145 (0,0012913)	0,0010313 (0,0014012)
2	0,020372 (0,027162)	0,0001019 (0,0002445)
3	0,13356 (0,13334)	0,0007192 (0,0006667)

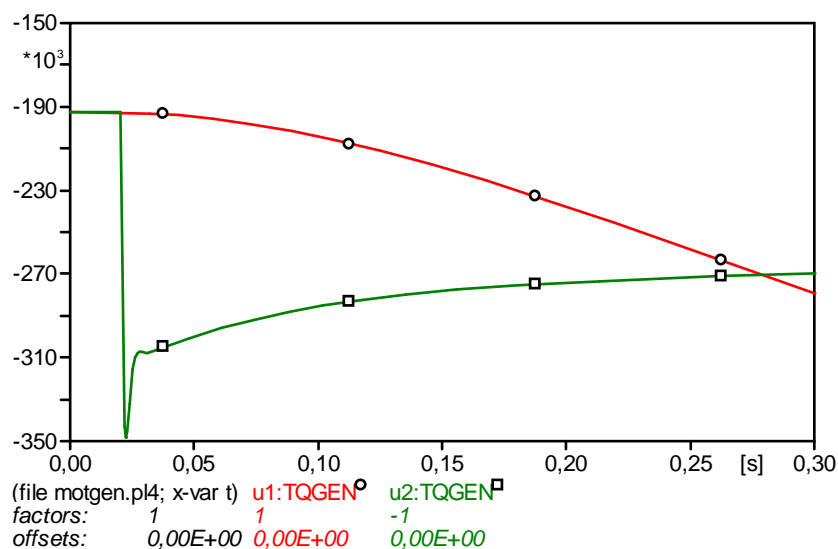
Init

9444 V a $-9,4^\circ$ (9400 V) vid' vyššie

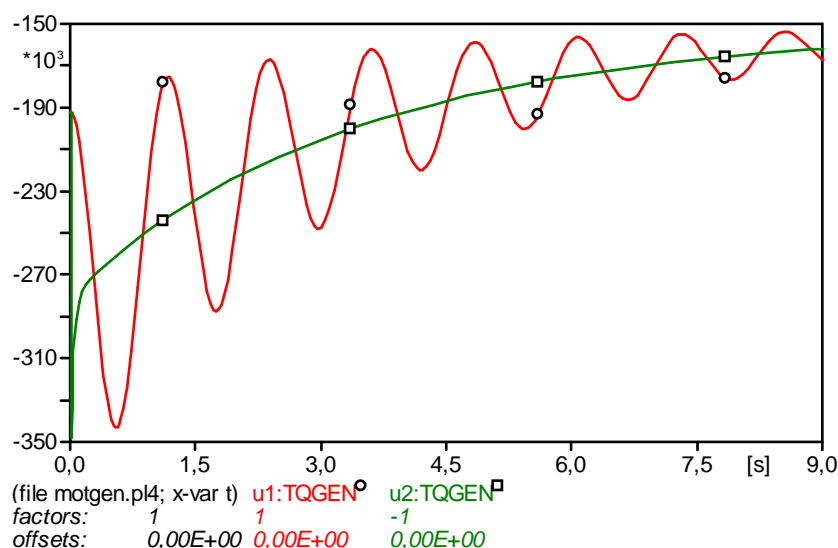
Motor je napájaný zo siete s vyššie uvedenými parametrami. *RLC* obvod vpravo od zdroja je záťaž naprázdno 1 M Ω . Ľavú časť schémy oboch strojov tvorí obvod budenia. Pri oboch strojoch je konštantné budenie (striedavý napäťový zdroj má frekvenciu 10 μ Hz) Napätie zdroja (0,01 V) nie je dôležité, význam má len horný odpor, ktorý musí byť čo najmenší, tu 1E-10 Ω . Dolné dva uzly slúžia k zadaniu mechanickej záťaže. Kapacita kondenzátora vo faradoch zodpovedá momentu zotrvačnosti v kg·m². Pri motore je to hodnota 1E10 a pri generátore 3,9E10 kg·m². Prúd zdroja v ampéroch predstavuje mechanický moment v Nm. V oboch prípadoch je hodnota 0,01 Nm. Vodivosť odporu modeluje trenie na hriadelí. Hodnoty odporov sú rovnaké ako pri budení 1E-10 Ω . Spoločný odpor tak zaisťuje pevnú väzbu medzi oboma hriadelmi. Nakoniec dolný obvod *RLC* pripojený k statoru generátora predstavuje jeho záťaž 5 Ω a 4,5 mH. Horný obvod *RLC* so sériovým spínačom simuluje prechodný dej, keď v čase 20 ms dôjde k zvýšeniu zaťaženia motorgenerátora paralelným pripojením záťaže 4,8 Ω a 4 mH.

5.3.2 Výsledky simulácie prechodného deja na motorgenerátore

Na obr. 5.2 sú porovnané mechanické momenty motora (*u1*) a generátora (*u2*), moment motora je opačný. Skokovej zmene zaťaženia zodpovedá rýchla zmena momentu na generátore, zatiaľ čo moment motora sa vďaka zotrvačnosti mení len pomaly. Priebeh momentu až takmer do ustálenia prechodného deja ukazuje obr. 5.3.



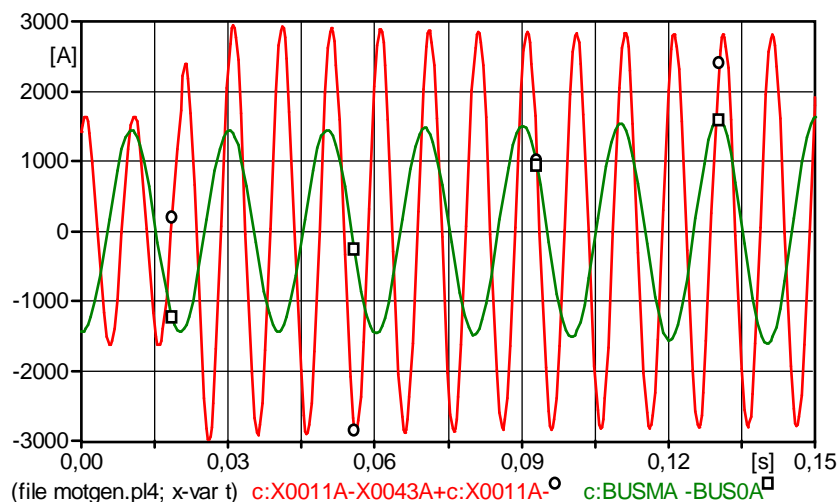
Obr. 5.2 Priebeh mechanických momentov motora (u1) a generátora (u2)



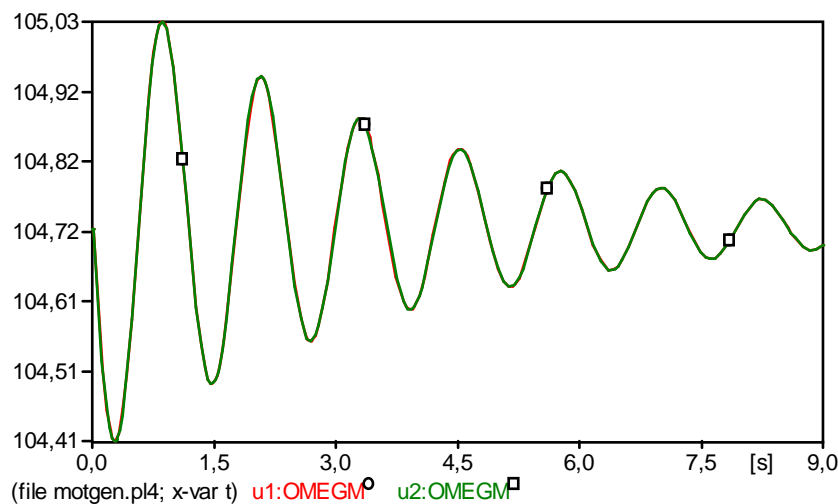
Obr. 5.3 Priebeh mechanických momentov motora (u1) a generátora (u2) do času ustáľovania

Na obr. 5.4 sú priebehy prúdov satorov strojov na začiatku prechodného deja. Prúd motora narastá pozvoľne, prúd generátora skokom a potom mierne klesá. Rovnako je viditeľná rozdielna frekvencia strojov. Porovnanie amplitúd prúdov v časoch uvádza nasledujúca tabuľka. Zvýšenie zaťaženia paradoxne spôsobí v ustálenom stave pokles prúdu do záťaže a zo siete a tomu taktiež zodpovedá pokles veľkosti mechanického momentu na obr. 5.3. Mechanická rýchlosť je pritom pri oboch strojoch rovnaká, ako ukazuje obr. 5.5.

čas [s]	0	0,03	9
motor	1430 A	1430 A	1230 A
generátor	1630 A	3000 A	2140 A



Obr. 5.4 Priebeh prúdov motora BUSMA-BUS0A a generátora na počiatku prechodného deja



Obr. 5.5 Priebeh otáčok motora a generátora počas prechodného deja

5.4 Samostatne pracujúci synchronný generátor

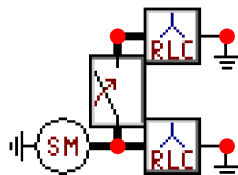
Podobným spôsobom ako v predchádzajúcom prípade sa zadávajú hodnoty pre ostatné modely UM. Nasledujúci príklad ukazuje použitie druhého modelu synchronného stroja SM59. Zatiaľ čo pri motorgenerátore sa mechanické otáčky po skončení prechodného deja nemenia, pretože sú dané frekvenciou siete, ktorá napája motor, tak pri samostatne pracujúcom stroji sa zaťažením znížia, pokiaľ stroj nie je vybavený regulátorom otáčok. Keďže pri modeli SM59 je možné pomocou TACS riadiť len budenie alebo mechanický výkon, ktoré sú v tomto prípade neriadeného modelu konštantné, nedá sa vytvoriť jednoduchý model motorgenerátora (pomocou modelu SM59), pri ktorom sa otáčky oboch strojov musia meniť rovnako. V nadväznosti na predchádzajúci prípad bol preto zvolený model samostatne pracujúceho generátora, ktorý svojimi parametrami zodpovedá synchronnému generátoru v sústrojenstve. Na samostatne pracujúcom stroji je potom simulovaný rovnaký prechodný dej ako pri motorgenerátore.

5.4.1 Parametre obvodu modelu SM59

Do tabuľky stroja sa zadáva napätie, frekvencia, uhol, počet pólov, menovitý výkon a napätie (definujú menovú impedanciu) a ďalšie pomerné hodnoty a časové konštanty, ako

sú uvedené v tabuľkách rozdielnych a spoločných hodnôt strojov uvedených vyššie. Pre moment zotrvačnosti označený $HICO$ pri časovej konštante H platí:

$$HICO = \frac{H \cdot S_N}{\omega_s^2} = \frac{1,2 \cdot 45}{(200 \cdot \pi)^2} = 0,000137 \cdot 10^6 \text{ kg} \cdot \text{m}^2 \quad (5.1)$$



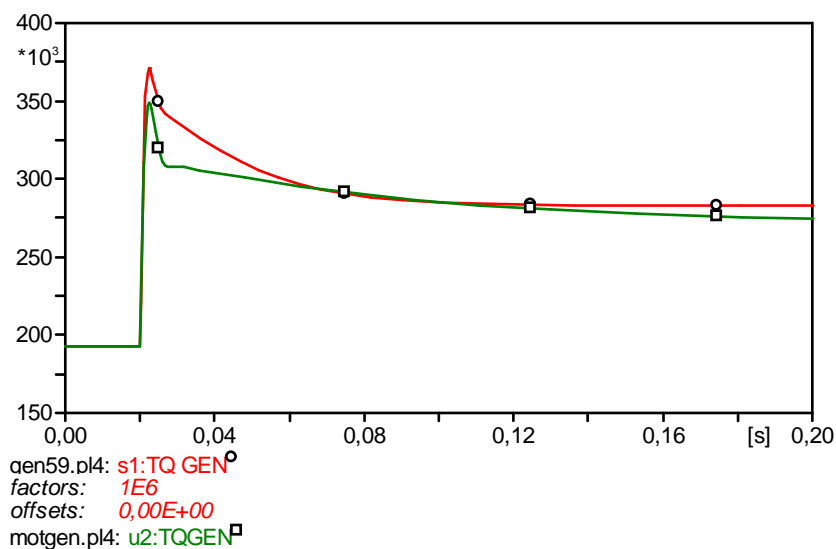
Obr. 5.6 Schéma obvodu so samostatne pracujúcim synchronným generátorom

5.4.2 Výsledky simulácie prechodného deja na synchronnom generátore

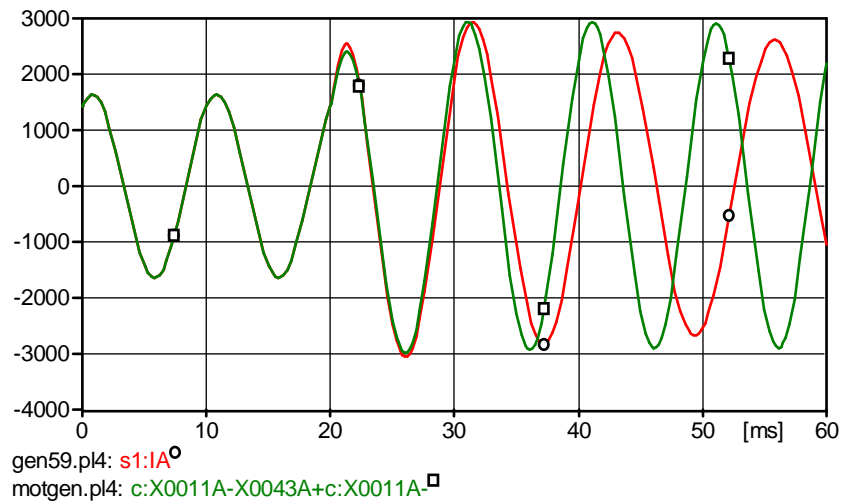
Na obr. 5.7 sú porovnané priebehy mechanického výkonu samostatne pracujúceho stroja a motorgenerátora. Po 9 sekundách prechodného deja klesne mechanický moment z 0,193 MNm na 0,162 MNm, zatiaľ čo na generátore vzrastie na hodnotu 0,28 MNm. Porovnanie prúdov statora na obr. 5.8 ukazuje, ako po zmene zaťaženia začína na generátore klesať frekvencia prúdu a po 9 sekundách klesne frekvencia zo 100 na asi 71 Hz. Tomu zodpovedá v prípade motorgenerátora mechanický výkon P_{mg} a pre samostatne pracujúci generátor výkon P_{sg} :

$$P_{mg} = M \cdot \frac{2 \cdot \pi \cdot f}{p} = 0,162 \cdot \frac{2 \cdot \pi \cdot 100}{6} = 17 \text{ MW} \quad (5.2)$$

$$P_{sg} = M \cdot \frac{2 \cdot \pi \cdot f}{p} = 0,28 \cdot \frac{2 \cdot \pi \cdot 71}{6} = 21 \text{ MW} \quad (5.3)$$



Obr. 5.7 Porovnanie priebehov mechanického momentu samostatne pracujúceho stroja a motorgenerátora



Obr. 5.8 Priebeh statorového prúdu samostatne pracujúceho stroja a motorgenerátora

Z uvedených príkladov je zřejmé, že záleží na riešenom prechodnom deji, ktorý model synchronného stroja bude použitý. V prípade potreby regulácie budenia alebo výkonu stroja sa použije model SM59 s riadením TACS, ako je popísané v kapitole 5.1. Model SM59 požaduje bežné údaje stroja, model UM už potrebuje ďalšie výpočty.

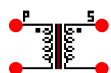
Problematika modelovania točivých strojov patrí v programe ATP k najzložitejším a je preto vhodné mať k dispozícii základné charakteristiky stroja, pomocou ktorých sa dá správnosť modelu verifikovať.

6 TRANSFORMÁTORY

Ako už bolo uvedené v kapitole 2, programom ATP je možné modelovať rôzne druhy transformátorov. Je možné priamo zadávať model ideálneho 1-fázového transformátora alebo model 1- a 3-fázového transformátora 2- alebo 3-vinuťového s danou magnetizačnou charakteristikou (SATURABLE TRANSFORMER). Pritom sa zadávajú hodnoty T článku náhradnej schémy transformátora. Ďalšia možnosť zadávania poskytuje procedúra BCTRAN, ktorá potrebné dáta vygeneruje zo štítkových hodnôt transformátora.

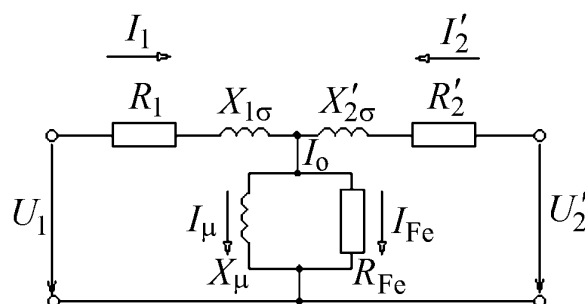
Úvod tejto kapitoly bude znova podrobnejšie zameraný na zadávanie parametrov jednotlivých modelov.

6.1 Nastavenie parametrov modelov



Saturable 1 phase

Model 1-fázového transformátora s uvažovaním saturácie. Dialógové okno zadávania obsahuje dve zložky, a to **Attributes** a **Characteristic**. V **Attributes** sa nastavujú parametre transformátora v súlade s náhradnou schémou na obr. 6.1.



Obr. 6.1 Náhradná schéma transformátora

Zadáva sa:

- I_0 prúd naprázdno [A],
- F_0 magnetický tok v stave naprázdno [Wb-závit],
- R_{mag} náhradný odpor strát v magnetickom obvode [Ω] (R_{Fe} na obr. 6.1),
- R_p odpor primárneho vinutia obvodu [Ω] (R_1 na obr. 6.1),
- L_p indukčnosť primárneho vinutia [mH], resp. reaktancia [Ω],
- V_{rp} efektívna hodnota primárneho napätia [kV], (U_1 na obr. 6.1),
- R_s odpor sekundárneho vinutia obvodu [Ω],
- L_s indukčnosť sekundárneho vinutia [mH], resp. reaktancia [Ω].

Magnetizačná charakteristika transformátora sa zadáva voľbou **Characteristic**, ako závislosť magnetického toku (resp. magnetickej indukcie) od prúdu.



Saturable 3 phases

Všeobecný model 3-fázového transformátora s uvažovaním saturácie. Pre 2- resp. 3-vinuťový transformátor sa v dialógovom okne **Attributes** označí podľa potreby položka **3-wind**. Pre každé vinutie vrátane terciárneho je možné zvoliť zapojenie (Y, D-lag, D-lead, Y180). Ostatné parametre sú rovnaké, ako v predchádzajúcom prípade, R_m je R_{mag} .



Sat. Y/Y 3-leg

3-fázový transformátor v zapojení Yy s uvažovaním saturácie. Jedná sa o trojstĺpcový jadrový transformátor s vysokou homopolárnou reluktanciou. V dôsledku uzatvárania homopolárneho toku cez vzduch a konštrukciu transformátorov je prúd naprázdno nulovej zložky väčší a nemôže byť zanedbaný.

Zadáva sa:

- f frekvencia počas merania [Hz],
- S_o menovitý výkon transformátora [VA],
- V_h menovité fázové napätie na strane vyššieho napätia [V],
- V_l menovité fázové napätie na strane nižšieho napätia [V].

Ďalšie hodnoty sa získajú zo štyroch meraní:

1. Meranie naprázdno zo strany nn pri menovitom napätí na vn:

- P_{ed} straty naprázdno [W],
- I_{ed} prúd naprázdno [A],
- U_{ed} napätie naprázdno [V].

2. Meranie nakrátko zo strany vn pri menovitom prúde:

- P_{sd} sú straty nakrátko [W],
- I_{sd} skratový prúd [A],
- U_{sd} napätie nakrátko [V].

3. Homopolárne zapojenie. Fázy nn strany sú spojené nakrátko do uzla a voči tomuto uzlu a uzlu transformátora je pripojený zdroj s takým napätím, aby na vn strane bolo v stave naprázdno menovité napätie:

- P_{eh} straty naprázdno [W],
- I_{eh} prúd naprázdno [A],
- U_{eh} napätie naprázdno [V].

4. Homopolárne zapojenie. Fázy nn strany sú spojené nakrátko do uzla a voči tomuto uzlu a uzlu transformátora je pripojený zdroj s takým napätím, aby na vn strane v stave nakrátko tiekol menovitý prúd:

- P_{sh} sú straty nakrátko [W],
- I_{sh} skratový prúd [A],
- U_{sh} napätie nakrátko [V].



BCTRAN

ATPDraw umožňuje vygenerovať parametre transformátora pomocou procedúry BCTRAN, na základe zadávania štítkových hodnôt transformátora.

V zložke **Structure** sa zadá počet fáz (1 alebo 3) v **Number of phases**, počet vinutí (1 alebo 2) v **Number windigs** a typ jadra v **Type of core**. Pre jednotlivé typy platí: **Triplex** – tri jednofázové transformátory, **Shell core** – plášťový transformátor, **3- až 5-legged stacked core** a **5-legged wound core** jadrové transformátory. Ďalej sa zadá frekvencia v Hz pomocou **Test frequency** a typ výstupnej matice **LR** alebo **AR Output**.

Parametre, týkajúce sa štítkových hodnôt transformátora a spôsob zapojenia sa nastaví v zložke **Ratings**. V **L-L Voltage** [kV] sa zadávajú hodnoty napätia na primárnej strane vyššieho napätia **HV**, na sekundárnej strane nižšieho napätia **LV** a pri 3-vinut'ovom jadre

taktiež napätie terciárneho vinutia **TV**. Menovitý výkon transformátora sa zadá v **Power** [MV·A] a hodinový uhol v stupňoch v **Phase shift**.

Zložka **Factory tests** obsahuje dáta získané z merania naprázdno **Open circuit** a z merania nakrátko **Short circuit**. V prípade merania naprázdno sa určí, na ktorej strane bolo uskutočnené meranie **Performed at** a kam bolo pripojené napätie **Connect at**. Ďalej sa v zložke **Open circuit** zadajú dáta súsledných zložiek **positive sequence** a pokiaľ sú dosiahnuteľné aj nulové zložky **zero sequence**, kde **Volt** [%] je napätie, pri ktorom bol meraný prúd naprázdno **Curr** [%] a **Loss** [kW] sú straty naprázdno transformátora. Podobne sa zadajú dáta z merania nakrátko **Short circuit**, kde **Imp** [%] je impedancia, resp. napätie nakrátko, **Pow** [MVA] je menovitý výkon a **Loss** sú straty nakrátko [kW].

6.2 Prevádzka transformátorov

6.2.1 Zapínací prúd transformátorov

Značný prúd môže pretekať vinutím nielen pri skratoch alebo veľkých preťaženíach, ale taktiež po pripojení nezaťaženeho transformátora v určitom okamihu na sieť. Pre bezstratový transformátor sa prúd odoberaný transformátorom oneskoruje za napätím o uhol $\pi/2$ a v okamihu pripojenia transformátora je nulový. Nasledujúci priebeh zapínacieho prúdu bude závisieť od hodnoty napätia v okamihu pripojenia:

1. Pripojenie pri maximálnej hodnote napätia. Pre transformátor bez remanentnej indukcie bude indukčný tok začínať nulovou hodnotou a prechodný dej nenastane, transformátorom potečie prúd naprázdno.
2. Pripojenie pri nulovej hodnote napätia. Indukčný tok bude mať jednosmernú zložku, ktorá pri menších transformátoroch zaniká po desiatkach periód a pri väčších transformátoroch po niekoľkých tisíckach periód.
3. Ďalšie zväčšenie, poprípade zmenšenie hodnoty magnetického toku, môže byť spôsobené remanentným magnetizmom obvodu, ktorý nebol v predchádzajúcich prípadoch uvažovaný. Veľkosť tohto zväčšenia je taktiež závislá od usporiadania magnetického obvodu (pri preplátovaných plechoch je zväčšenie dosť výrazné).

Matematicky je možné popísať jednotlivé deje nelineárnou diferenciálnou rovnicou prvého rádu.

$$u_1 = R_1 \cdot i_1 + N_1 \cdot \frac{d\varphi(i)}{dt} \quad (6.1)$$

kde závislosť $\varphi(i)$ je nelineárna. Linearizácia tohto člena je uskutočnená tak, že za prúd sa dosadí:

$$i_1 = N_1 \cdot \frac{\varphi}{L_{11}} \quad (6.2)$$

kde L_{11} je celková indukčnosť vstupného vinutia. Po linearizácii má rovnica (6.1) tvar:

$$u_1 = R_1 \cdot N_1 \cdot \frac{\varphi}{L_{11}} + N_1 \cdot \frac{d\varphi}{dt} = \sqrt{2} \cdot U_1 \cdot \sin(\omega \cdot t + \psi) \quad (6.3)$$

kde ψ určuje okamžitú hodnotu napätia v okamihu pripojenia. Vyriešením tejto rovnice platí pre okamžitú hodnotu celkového magnetického toku:

$$\varphi = \Phi_{1M} \cdot \sin(\omega \cdot t + \psi - \psi_0) - \Phi_{1M} \cdot \sin(\psi - \psi_0) \cdot e^{-\frac{t}{\tau_0}} \quad (6.4)$$

kde:

$$\Phi_{1M} = \frac{\sqrt{2} \cdot U_1}{Z_{11}} \quad (6.5)$$

je maximálna hodnota magnetického toku a

$$\tau_0 = \frac{L_{11}}{R_1} \quad (6.6)$$

je časová konštanta charakterizujúca tlmenie aperiodickej zložky.

Pre chod naprázdno platí:

$$\psi_0 = \arctg \frac{X_{11}}{R_1} \approx 90^\circ \quad (6.7)$$

a výsledná hodnota celkového magnetického toku bude:

$$\varphi = \Phi_{1M} \cdot \cos(\omega \cdot t + \psi) - \Phi_{1M} \cdot \cos(\psi) \cdot e^{-\frac{t}{\tau_0}} \quad (6.8)$$

Prvý člen tohto výrazu je ustálený periodicky sa meniaci magnetický tok a druhý člen predstavuje aperiodickú zložku. Magnetický tok bude mať najväčšiu hodnotu pre $\psi = k \cdot \pi$ (k je prirodzené číslo) teda v okamihu, keď napätie prechádza nulou. Naopak aperiodická zložka nevznikne, ak dôjde k zapnutiu v okamihu, keď hodnota napätia dosiahne svoje maximum. Pri uvážení remanencie, dôjde podľa polarít k ďalšej zmene magnetického toku.

Pre prípad pripojenia transformátora pri prechode priebehu napätia nulou, hodnota magnetickej indukcie môže dosiahnuť veľkosť až:

$$B_{\max} = B_0 + 2 \cdot B = 0,95 + 2 \cdot 1,65 = 4,25 \text{ T} \quad (6.9)$$

Kde B_0 je indukcia remanentného magnetizmu a B hodnota indukcie pri valcovaných plechoch za studena. Pretože indukcia nasýtenia má hodnotu asi 2 T, dôjde k presýteniu jadra a tok sa uzatvára okolím. Prúd pretekajúci obvodom je potom obmedzený odporom vinutia a rozptylovou reaktanciou obvodu a môže dosahovať vysoké hodnoty. Pre maximálnu hodnotu zapínacieho prúdu platí:

$$I_{z\max} = \frac{\sqrt{2} \cdot U_1}{X_p} \quad (6.10)$$

kde X_p predstavuje reaktanciu kruhovej cievky bez železa s výškou vinutia l , ktorá sa určí zo vzťahu:

$$X_p = 2 \cdot \pi \cdot f \cdot N_1^2 \cdot \mu_0 \cdot \frac{S}{l} \quad (6.11)$$

$S = \pi \cdot \frac{D^2}{4}$ je stredný prierez pre stredný priemer cievky D . Intenzita magnetického poľa pri zapínaní máva hodnotu:

$$H_{\max} = (6 \div 9) \cdot 10^5 \text{ A} \cdot \text{m}^{-1} \quad (6.12)$$

čo predstavuje 800 až 1200-násobok intenzity $800 \text{ A} \cdot \text{m}^{-1}$, ktorá odpovedá indukcií 1,65 T v jadre v ustálenom stave. Pretože prúd naprázdno tvorí 0,5 % menovitého prúdu, potom veľkosť maximálnej hodnoty zapínacieho prúdu dosiahne hodnotu:

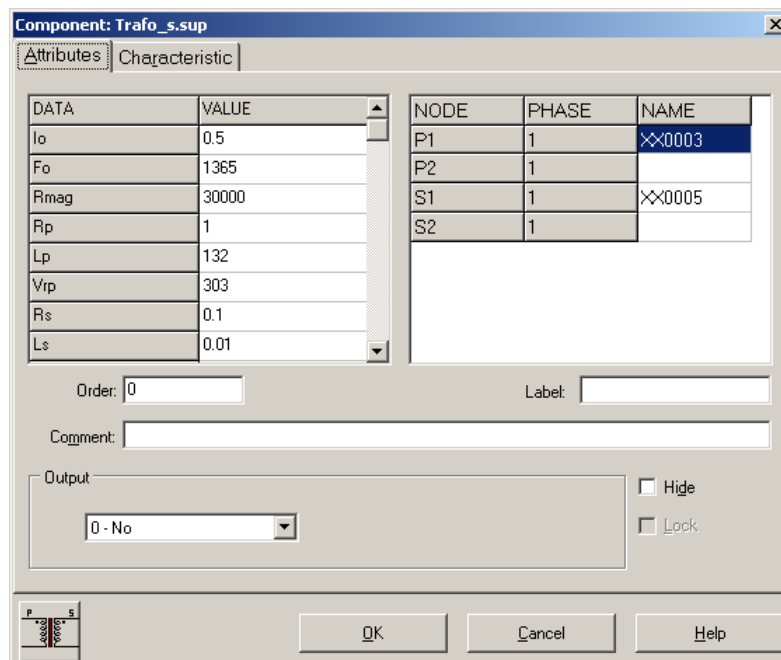
$$I_{z,max} = 0,005 \cdot I_n \cdot (800 \div 1200) = (4 \div 6) \cdot I_n \quad (6.13)$$

Vzorec pre maximálnu hodnotu zapínacieho prúdu bol odvodený pri zanedbaní činného odporu vinutia. V inom prípade tento odpor tlmí jednosmernú zložku magnetického toku a tým znižuje najväčšie možné hodnoty zapínacieho prúdu.

6.2.1.1 Riešenie programom ATP

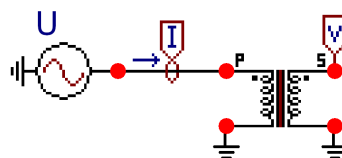
Pri analyzovaní problému bol použitý model jednofázového transformátora 500/300 kV, ktorý bol v ATPDraw zadaný ako SATURABLE TRANSFORMER vrátane magnetizačnej charakteristiky:

I [A]	0,5	5	10	100	5000
Ψ [Wb-závit]	1365	1771	1898	2425	4744



Obr. 6.2 Zadávanie hodnôt náhradnej schémy transformátora v ATPDraw

Transformátor je pripojený ku generátoru s amplitúdou $U_m = 430$ kV a frekvenciou 50 Hz.

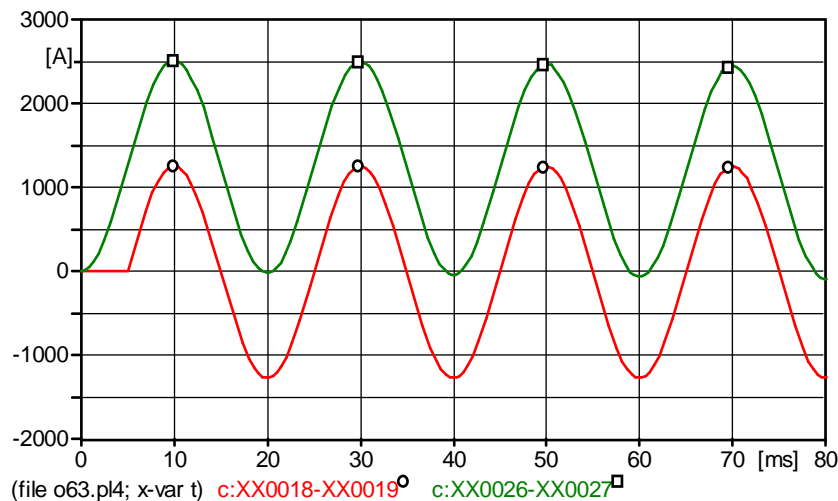


Obr. 6.3 Schéma zapojenia transformátora

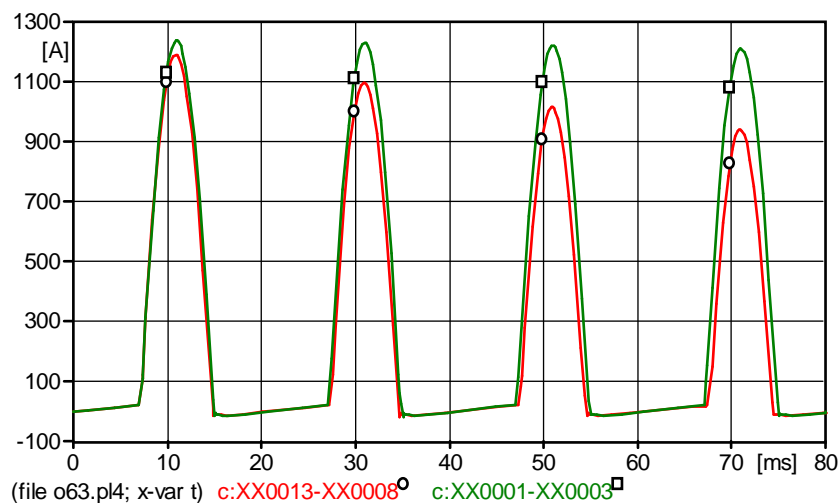
Na obr. 6.4 sú uvedené priebehy prúdov s maximálnou a minimálnou jednosmernou (aperiodickou) zložkou. Priebeh prúdu c:XX0026-XX0027 odpovedá pripojeniu v okamihu nulového napätia a priebeh prúdu c:XX0018-XX0019 odpovedá pripojeniu v okamihu maxima napätia. Linearizácia magnetizačnej charakteristiky je bodom 5 kA a 4,744 kWb-z.

Obr. 6.5 ukazuje priebeh zapínacieho prúdu transformátora:

- a) pri zanedbaní činného odporu vinutia (hodnota $R_p = 0,001 \Omega$) priebeh (XX0001-XX0003)
- b) pri tlmení jednosmernej zložky rešpektovaním činného odporu vinutia a vnútorného odporu zdroja (celkom 10Ω) priebeh (XX0013-XX0008).

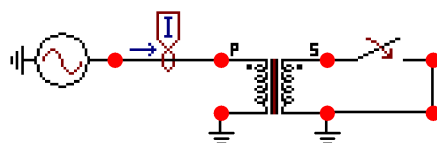


Obr. 6.4 Závislosť zapínacieho prúdu od okamihu pripojenia



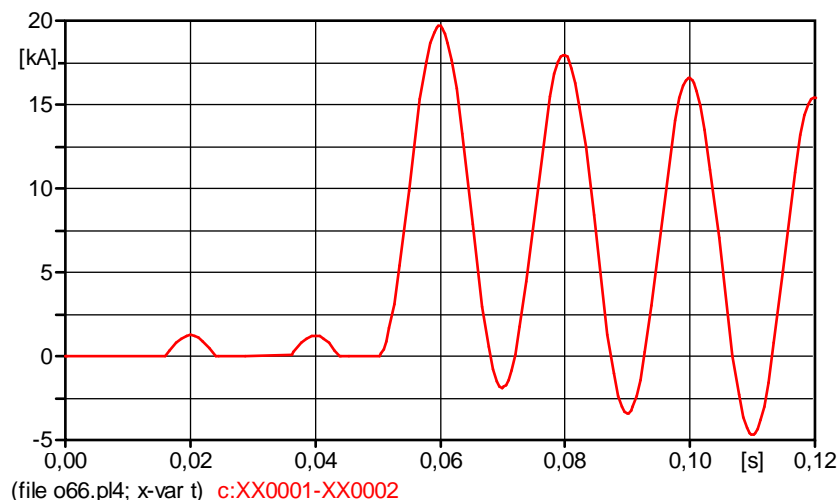
Obr. 6.5 Priebeh zapínacieho prúdu s tlmením a bez tlmenia jednosmernej zložky

Obr. 6.7 porovnáva veľkosť zapínacieho a skratového prúdu podľa zapojenia na obr. 6.6. Prítom pre časové konštanty platí: $\tau_0 \gg \tau_k$ pretože $L_{11} \gg L_{1k}$. Zdroj bol pripojený v čase 10 ms a skrat nastal v čase 50 ms. Je zrejmé, že tlmenie aperiodickej zložky skratového prúdu je rýchlejšie z dôvodu podstatne menšej hodnoty časovej konštanty τ_k .



Obr. 6.6 Schéma zapojenia pre porovnanie skratového a zapínacieho prúdu

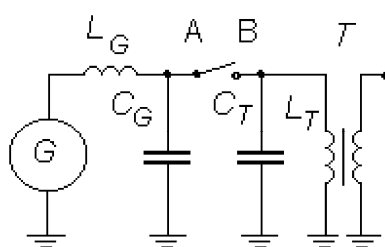
Zapínací prúd nie je nebezpečný svojimi dynamickými ani tepelnými účinkami, môže však spôsobiť chybné odpojenie transformátora v dôsledku presýtenia jadra. Nadmerný zapínací prúd je možné obmedziť veľkosťou dovolenej indukcie v jadre. Skratový prúd už nebezpečný je a o jeho vypnutí rozhoduje nastavenie elektrických ochrán transformátora.



Obr. 6.7 Porovnanie veľkosti skratového a zapínacieho prúdu

6.2.2 Vypínanie malých indukčných prúdov

Vypínanie malých indukčných prúdov nastáva pri vypínaní transformátorov naprázdno alebo zaťažených tlmivkami, pri vypínaní nezaťažených motorov alebo prúdov kompenzačných tlmiviek v prenosoch vvn a zvn. Keď sa vypínajú takéto prúdy vypínačom s účinným zhášadlom, dochádza k prerušeniu prúdu pred prechodom nulou. Vznikajú tým prepätia dosahujúce násobky menovitého napätia, ktoré ohrozujú izoláciu siete. Ako príklad je uvedený prechodný dej pri vypínaní transformátora naprázdno podľa schémy na obr. 6.8. Môžu znova nastať dva hraničné prípady. Buď dôjde k vypnutiu pri prechode prúdu nulou, alebo pri určitej hodnote prúdu v obvode.



Obr. 6.8 Schéma zapojenia pri vypínaní transformátora naprázdno

6.2.2.1 Vypnutie pri nulovom prúde

Uhasnutím oblúka nastáva rozpojenie oboch obvodov a napätie na každom kontakte vypínača prebieha už odlišne. Kontakt A sleduje napätie generátora u_G , kapacita C_T , ktorá je nabitá na plné napätie generátora U_{GM} , sa začne vybíjať cez indukčnosť L_T a odpojený obvod sa rozkmitá frekvenciou f_T . Pre frekvenciu f_T platí vzťah:

$$f_T = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot \sqrt{L_T \cdot C_T}} \quad (6.14)$$

Priebeh napätia na kontakte B je daný touto frekvenciou. Kmity sú tlmené, pretože odpor obvodu nikdy nemôže byť nulový. Zotavené napätie na vypínači je dané rozdielom napätí na jeho kontaktoch.

6.2.2.2 Vypnutie s nenulovým prúdom

Energia v indukčnosti L_T už nie je nulová, ale má veľkosť:

$$W_L = \frac{1}{2} \cdot L_T \cdot I_{\text{usek}}^2 \quad (6.15)$$

kde I_{usek} je veľkosť prúdu v okamihu jeho prerušenia (useknutia). Kapacita C_T , ktorá je v okamihu useknutia prúdu nabitá na napätie zdroja, sa začne nabíjať touto energiou. Napätie na kapacite sa zvýši o hodnotu U_P , ktorá vyplýva z rovnosti magnetickej a elektrickej energie:

$$\frac{1}{2} \cdot L_T \cdot I_{\text{usek}}^2 = \frac{1}{2} \cdot C_T \cdot U_P^2 \quad (6.16)$$

Pre hodnotu prírastku napätia potom platí:

$$U_P = I_{\text{usek}} \cdot \sqrt{\frac{L_T}{C_T}} \quad (6.17)$$

Keďže kapacita C_T bola v okamihu useknutia prúdu nabitá na hodnotu napätia zdroja U_{Gusek} , narastá napätie na kontakte B až na vrcholovú hodnotu $U_{\text{BM}} = U_{\text{Gusek}} + U_P$. Energia v indukčnosti L_T bude najväčšia, ak dôjde k useknutiu prúdu v jeho maxime. Potom platí:

$$I_{\text{usek}} = \frac{U_{\text{GM}}}{\omega \cdot L_T} \quad (6.18)$$

V tomto prípade dosiahne vrchol napätia na kapacite najvyššiu hodnotu:

$$U_{\text{PM}} = \frac{U_{\text{GM}}}{\omega \cdot L_T} \cdot \sqrt{\frac{L_T}{C_T}} \quad (6.19)$$

Po dosadení z (6.14) je výsledný tvar U_{PM} :

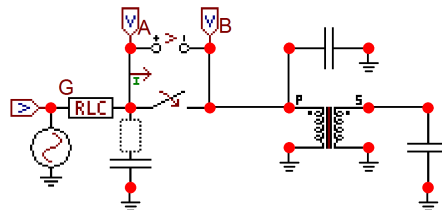
$$U_{\text{PM}} = U_{\text{GM}} \cdot \frac{f_T}{f} \quad (6.20)$$

Frekvencia f_T obvodov vysokonapäťových motorov a transformátorov naprázdno sa pohybuje najčastejšie v rozmedzí 300 až 600 Hz. Z toho vyplýva, že prvá špička napätia medzi kontaktmi môže dosiahnuť veľkosť 6 až 12 U_{GM} .

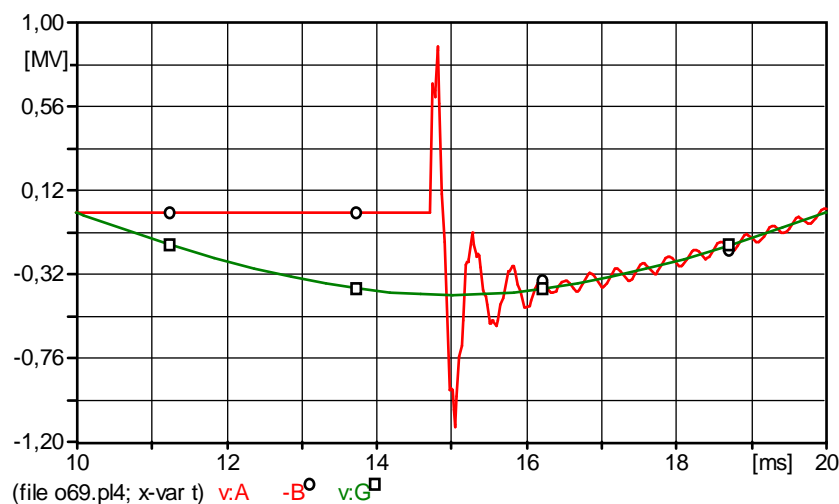
6.2.2.3 Riešenie programom ATP

Na obr. 6.9 je nakreslená schéma v ATPDraw, zodpovedajúca prípadu vypínania transformátora naprázdno. Tu je použitý model jednofázového transformátora z kapitoly 6.1. Transformátor je pripojený ku generátoru s napätím s amplitúdou 430 kV a frekvenciou 50 Hz. Vedenie je realizované pomocou RLC článku s parametrami $R = 0,5 \Omega$, $L = 35 \text{ mH}$. Kapacita generátora sa uvažuje a jej hodnota je $C_G = 0,1 \mu\text{F}$ (faktor sériovej rezistancie je $K_s = 0,15$). Sú taktiež rešpektované kapacity primárneho ($C = 3 \text{ nF}$) a sekundárneho ($C = 10 \text{ nF}$) vinutia transformátora voči zemi. Ak je transformátor vypínaný ako nezaťažovaný, pohybujú sa hodnoty prúdu v lineárnej časti magnetizačnej charakteristiky. Preto stačí

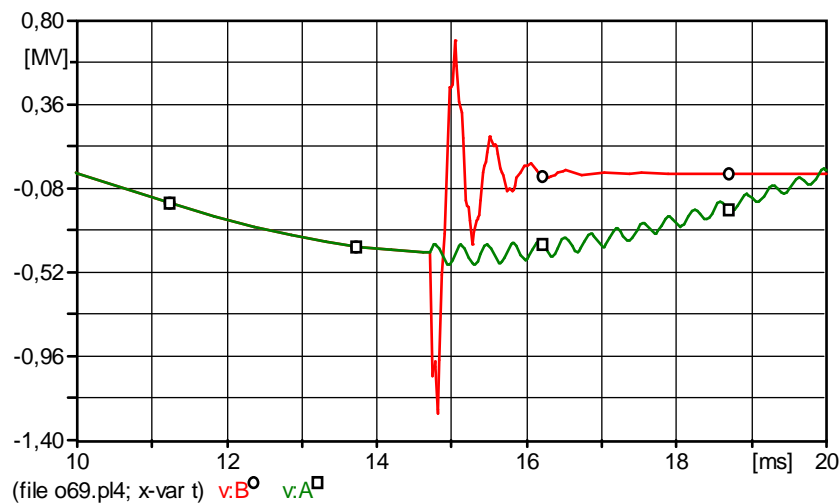
v dialógovom okne parametrov transformátora zadať iba maximálnu hodnotu magnetizačnej krivky, $I = 5000 \text{ A}$ a **Fluxlinked** (magnetický tok) = 4744 Wb. Magnetizačná krivka transformátora je tým považovaná za lineárnu. V prípade odpojenia transformátora je hodnota prúdu obmedzená impedanciou obvodu. V dôsledku toho je hodnota prúdu v lineárnej časti magnetizačnej krivky. Toto je druhý dôvod, prečo je možné v prípade vypínania transformátora naprázdno považovať magnetizačnú krivku za lineárnu. Čas vypnutia je na vypínači nastavený na 10 ms, čo je okamih pred prirodzeným prechodom prúdu nulou. Je to taktiež čas, keď prúd dosiahne svoju maximálnu hodnotu. Ide teda o najnepriaznivejší prípad. Obr. 6.10 ukazuje priebeh zotaveného napätia na kontaktoch (A a B) spolu s napätím generátora (G). Priebehy napätia na jednom a druhom kontakte sú znázornené na obr. 6.11.



Obr. 6.9 Schéma zapojenia pri vypínaní transformátora naprázdno



Obr. 6.10 Priebeh napätia na kontaktoch pri vypínaní v porovnaní s napätím generátora



Obr. 6.11 Priebehy napätí na kontaktoch A a B

6.2.3 Vypínanie malých indukčných prúdov v 3-fázovom obvode

V predchádzajúcom odseku boli sledované vypínacie procesy pri 1-fázovom transformátore. V zásade budú obdobné i v 3-fázových obvodoch; tu sa však priebehy komplikujú tým, že sa jednotlivé fázy medzi sebou ovplyvňujú. Vzájomný vplyv fáz závisí od spôsobu prevádzky uzla transformátora a siete a od konštrukcie transformátora.

6.2.3.1 Riešenie programom ATP

Na obr. 6.12 je pomocou ATPDraw nakreslená schéma 3-fázového obvodu pre vypínanie malých indukčných prúdov. Transformátor 110/22 kV je pripojený k 3-fázovému generátoru, ktorý je modelovaný ideálnym zdrojom napätia s amplitúdou 89,8 kV a frekvenciou 50 Hz. Spojenie je realizované sériovým RLC prvkom, kde jednotlivé fázy majú tieto parametre: $R = 0,5 \Omega$, $L = 35$ mH. Parametre kapacít sú rovnaké ako v predchádzajúcom prípade, ale tu sú modelované taktiež 3-fázovým RLC prvkom. Čas vypnutia je 10 ms, čiže pred prirodzeným prechodom prúdu nulou, prúd v tomto okamihu dosahuje svoju maximálnu hodnotu, ide teda o najnepriaznivejší prípad z hľadiska napät'ového namáhania. Transformátor je modelovaný pomocou procedúry BCTRAN vid'. odsek 6.1. Parametre sú uvedené v nasledujúcich tabuľkách.

Tab. 6.1 Štruktúra transformátora (**Structure**)

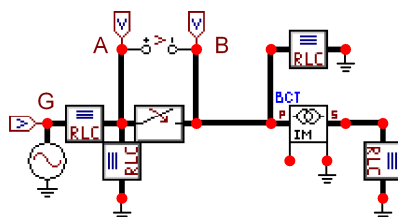
Počet fáz (Number of phases)	Počet vinutí (Number windings)	Typ jadra (Type of core)	Testovacia frekvencia [Hz] (Test frequency)
3	2	Plášťový transformátor	50

Tab. 6.2 Štítkové hodnoty transformátora (**Ratings**)

Primárne napätie [kV] (HV)	Sekundárne napätie [kV] (LV)	Menovitý výkon [MV·A] (Power)	Zapojenie (Connections)	Fázový posun [°] (Phase shift)
63,5	12,5	40	Yyn	30

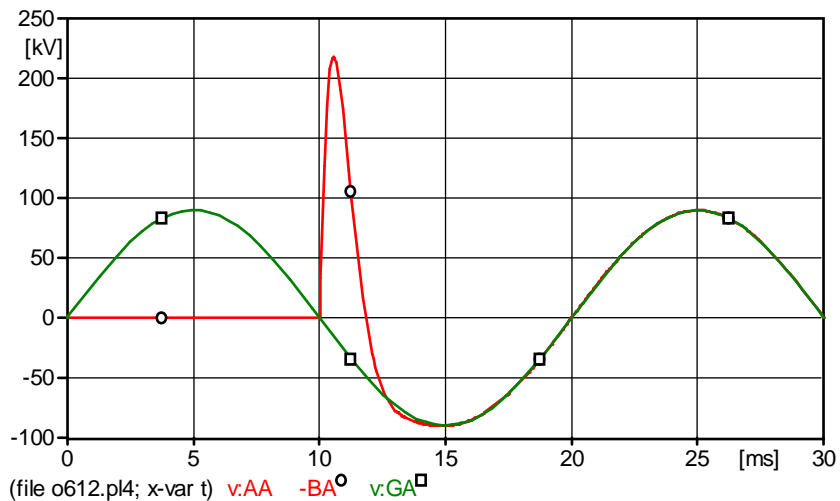
Tab. 6.3 Hodnoty získané z merania naprázdno a nakrátko (**Factory tests**)

Napätie nakrátko [%] (Imp)	Straty nakrátko [kW] (Loss)	Prúd naprázdno [%] (Curr)	Straty naprázdno [kW] (Loss)
11,5	25,6	0,4	40

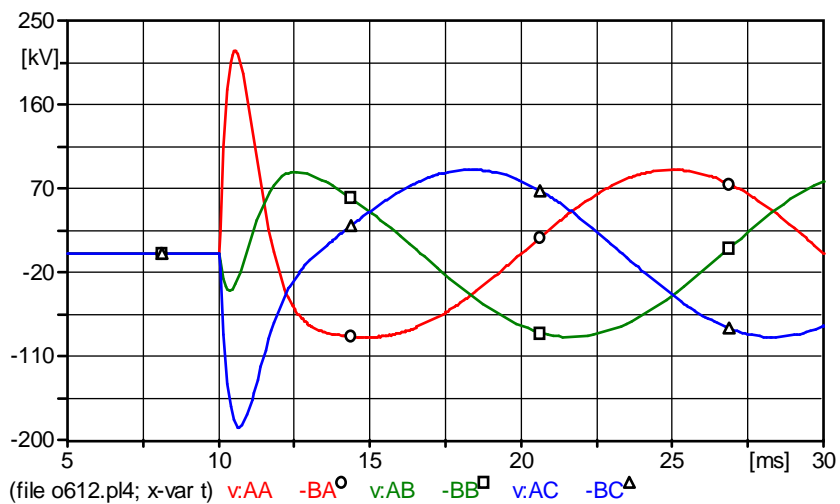


Obr. 6.12 Schéma zapojenia pri vypínaní 3-fázového transformátora naprázdno

Obr. 6.13 ukazuje priebeh napätia medzi kontaktmi vypínača fázy A (AA-BA) v porovnaní s napätím generátora (GA). Priebeh napätia na kontaktoch všetkých fáz vypínača je zobrazený na obr. 6.14.



Obr. 6.13 Priebeh napätia na kontaktoch fázy A pri vypínaní v porovnaní s napätím generátora



Obr. 6.14 Priebeh napätia na kontaktoch jednotlivých fáz

7 MODEL ČASTI ELEKTRIZAČNEJ SÚSTAVY

Pomocou ATPDraw, verzia 4, je zostavený model časti elektrizačnej sústavy podľa obrázka v prvej kapitole. V tejto časti sústavy je simulovaný trojfázový skrat a úder blesku do vedenia ako typické príklady prechodných dejov.

7.1 Parametre elektrizačnej sústavy

Nasledujú parametre jednotlivých prvkov sústavy podľa obr. 7.1 teda transformátorov, vedení a generátorov.

Tab. 7.1 Parametre transformátorov

Transformátor	Menovitý výkon [MVA]	Napätie nakrátko [%]	Prúd naprázdno [%]	Straty nakrátko [kW]	Straty naprázdno [kW]
T1 6/22 kV	10	9,6	0,4	30	13
T2 6/22 kV	10	9,6	0,4	30	13
T3 6/22 kV	10	9,6	0,4	30	13
T4 110/22 kV	40	11,5	0,4	40	25,6

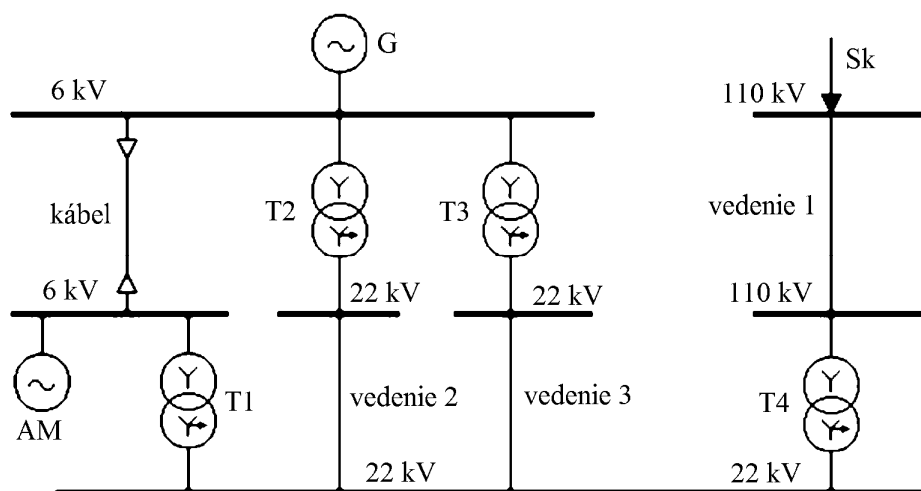
Tab. 7.2 Parametre vedení a kábla

Vedenie, kábel	Dĺžka [km]	Typ	Typ stožiaru, uloženie	Odpor na 1 km dĺžky [Ω /km]	Reaktancia na 1 km dĺžky [Ω /km]	Počet paralelných vetiev
Kábel 6 kV	0,5	3 × 240 Al	Zem	0,326	0,074	Trojité
Vedenie 1 110 kV	6	AlFe6 120 mm ²	vid' obr.7.4	Neuvažuje sa	0,26	Jednoduché
Vedenie 2 22 kV	0,5	AlFe6 95 mm ²	vid' obr.7.3	Neuvažuje sa	0,27	Dvojité
Vedenie 3 22 kV	0,5	AlFe6 95 mm ²	vid' obr.7.3	Neuvažuje sa	0,27	Dvojité

Sieť má na prípojnici 110 kV skratový výkon $S_K = 1000$ MVA. Do prípojnice 6 kV pracuje synchronný generátor s menovitým výkonom $S_G = 100$ MVA. (Parametre generátora vid' Tab. 7.3) Na prípojnici 6 kV je pripojená sústava asynchronných motorov s celkovým inštalovaným výkonom $S_M = 6$ MVA, pomerný záberový prúd je rovný $i_z = 7$, prúdový odber 200 A, účinník 0,9.

Tab. 7.3 Parametre synchronného generátora

Menovitý výkon [MVA]	Menovité napätie [kV]	Rázová reaktancia [-]	Počet pólov
100	6	0,135	4



Obr. 7.1 Schéma uvažovanej časti elektrizačnej sústavy

7.2 Výpočet trojfázového skratu

Ako príklad prechodného deja je uvedený výpočet 3-fázového skratu na prípojnici 6 kV. Výpočet je uskutočnený v pomerných jednotkách, keď vzťahovaný výkon je zvolený $S_v = 1000$ MVA a vzťahované napätie $U_v = 6$ kV. Pre jednotlivé prvky v pomerných veličinách platí:

reaktancia sústavy:

$$x_S = c \cdot \frac{S_v}{S_K} = 1,1 \cdot \frac{1000}{1000} = 1,1 \quad (7.1)$$

reaktancia alternátora:

$$x_G = \frac{x_d''}{100} \cdot \frac{S_v}{S_G} = \frac{13,5}{100} \cdot \frac{1000}{100} = 1,35 \quad (7.2)$$

reaktancia asynchrónnych motorov:

$$x_M = \frac{1}{i_z} \cdot \frac{S_v}{S_M} = \frac{1}{7} \cdot \frac{1000}{6} = 23,81 \quad (7.3)$$

reaktancia transformátorov 6/22 kV (odpory transformátorov sú zanedbané):

$$x_{T1} = x_{T2} = x_{T3} = \frac{u_k}{100} \cdot \frac{S_v}{S_T} = \frac{9,6}{100} \cdot \frac{1000}{10} = 9,6 \quad (7.4)$$

reaktancia transformátora 100/22 kV:

$$x_{T4} = \frac{u_k}{100} \cdot \frac{S_v}{S_T} = \frac{11,5}{100} \cdot \frac{1000}{40} = 2,875 \quad (7.5)$$

reaktancia kábla 6 kV:

$$x_{kab} = X_{kk} \cdot l \cdot \frac{S_v}{U_n^2} = 0,074 \cdot 0,5 \cdot \frac{1000}{6^2} \cdot \frac{1}{3} = 0,343 \quad (7.6)$$

odpor kábla 6 kV:

$$r_{\text{kab}} = R_{\text{kk}} \cdot l \cdot \frac{S_v}{U_n^2} = 0,326 \cdot 0,5 \cdot \frac{1000}{6^2} \cdot \frac{1}{3} = 1,509 \quad (7.7)$$

reaktancia vedenia 110 kV (odpory vedenia sa zanedbávajú):

$$x_{v1} = X_{v1} \cdot l \cdot \frac{S_v}{U_n^2} = 0,4 \cdot 6 \cdot \frac{1000}{110^2} = 0,198 \quad (7.8)$$

reaktancia vedenia 22 kV:

$$x_{v2} = x_{v3} = X_{v2,3} \cdot l \cdot \frac{S_v}{U_n^2} = 0,27 \cdot 6 \cdot \frac{1000}{22^2} \cdot \frac{1}{2} = 1,674 \quad (7.9)$$

Pre 3-fázový skrat na prípojnici 6 kV je uvedená náhradná schéma pre súslednú zložku na obr. 7.2. Po zjednodušení (transfigurácii D → Y) je výsledná hodnota impedancie pre súslednú zložku rovná $z_1 = 1,102 + 1,551j$. Absolútna hodnota výslednej impedancie v pomerných jednotkách je $z_1 = 1,902$.

Pre hodnotu vzťahného prúdu platí:

$$I_v = \frac{S_v}{\sqrt{3} \cdot U_v} = \frac{1000}{\sqrt{3} \cdot 6} = 96,23 \text{ kA} \quad (7.10)$$

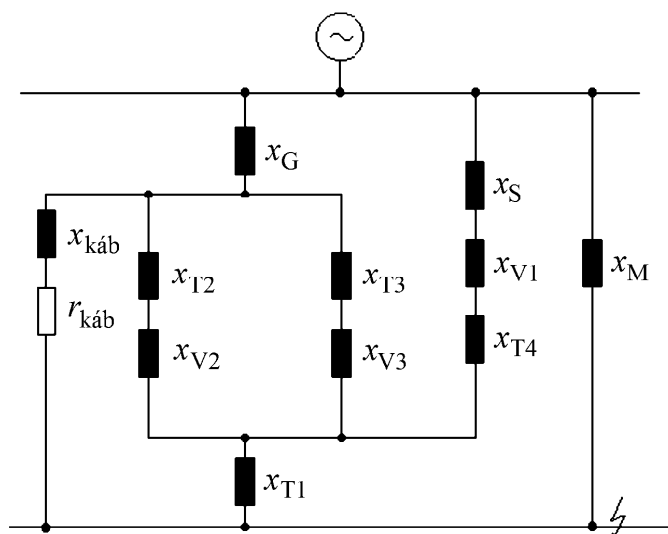
Hodnota ustáleného skratového prúdu je:

$$I_{\text{ku}} = \frac{I_v}{|z_1|} = \frac{96,23}{1,902} = 50,59 \text{ kA} \quad (7.11)$$

Pre nárazový skratový prúd platí:

$$I_{\text{km}} = \sqrt{2} \cdot K \cdot I_{\text{ku}} = \sqrt{2} \cdot 1,5 \cdot 50,59 = 107,3 \text{ kA} \quad (7.12)$$

kde K je nárazový činiteľ. Jeho hodnota býva v sieťach zvolená $K = 1,5$.



Obr. 7.2 Náhradná schéma pre súslednú zložku v prípade 3-fázového skratu na prípojnici 6 kV

7.3 Modelovanie časti elektrizačnej sústavy pomocou ATPDraw

Model časti elektrizačnej sústavy je uvedený na obr. 7.5. Generátor 100 MVA je modelovaný pomocou neriadeného modelu synchronného stroja SM59. Vysvetlenie významu veličín v dialógovom okne je nasledujúce:

Volt	maximálna hodnota fázového napätia [V]
Freq	frekvencia napätia na svorkách stroja pre ustálený stav [Hz]
Angle	uhol fázora napätia fázy A v stupňoch
Poles	počet pólov
SMOVTP	faktor proporcionality, ktorý má význam len pri rozdelení činného výkonu medzi paralelne pracujúce generátory v priebehu spúšťania-nábehu. V prípade neexistencie paralelných generátorov je hodnota SMOVTP = 1
SMOVTQ	faktor proporcionality, ktorý má význam len pri rozdelení jalového výkonu medzi paralelne pracujúce generátory v priebehu spúšťania-nábehu. V prípade neexistencie paralelných generátorov je hodnota SMOVTQ = 1. V prípade výskytu paralelne pracujúcich generátorov: je nutné zadať ručne
RMVA	trojfázová hodnota zdanlivého výkonu stroja [MVA]
RkV	menovitá hodnota združeného napätia stroja, efektívna hodnota [kV]
AGLINE	hodnota kotevného prúdu na charakteristike vzduchovej medzery, pri ktorých je stroj vybudený na menovité napätie. Nepriama špecifikácia vzájomnej indukcie [A]
RA	rezistencia budiaceho vinutia kotvy [p.j.]. RA > 0!
XL	rozptylová reaktancia kotvy [p.j.]
Xd	synchronná reaktancia v smere osi d – pozdĺžna reaktancia [p.j.]
Xq	synchronná reaktancia v smere osi q – priečna reaktancia [p.j.]
Xd'	prechodná pozdĺžna reaktancia [p.j.]
Xq'	prechodná priečna reaktancia [p.j.]
Xd''	rázová pozdĺžna reaktancia [p.j.]
Xq''	rázová priečna reaktancia [p.j.]
Tdo'	pozdĺžna prechodová časová konštanta pri chode stroja naprázdno [s]
Tqo'	priečna prechodová časová konštanta pri chode stroja naprázdno [s]
Tdo''	pozdĺžna rázová časová konštanta pri chode stroja naprázdno [s]
Tqo''	priečna rázová časová konštanta pri chode stroja naprázdno [s]
Xo	nulová (netočivá) reaktancia v zložkovej sústave [p.j.]
RN	činná časť zemnej impedancie, rezistencia zeme [p.j.]
XN	jalová časť zemnej impedancie, rezistencia zeme [p.j.]
XCAN	Canayova charakteristická reaktancia [p.j.]. Keď je neznáma: zadajte XCAN = XL
HICO	moment zotrvačnosti zotrvačných hmôt stroja v ($10^6 \cdot \text{libra} \cdot \text{stopa}^2$), keď MECHUN = 0 v ($10^6 \cdot \text{kg} \cdot \text{m}^2$), keď MECHUN = 1
DSR	koeficient rýchlostnej odchyľky vlastného tlmenia zotrvačných hmôt $T = \text{DSR}(W - W_s)$, kde W (ω) je rýchlosť hmôt a W_s (ω_s) je synchronná rýchlosť v ($(10^6 \cdot \text{libra} \cdot \text{stopa}) / (\text{rad}/\text{sec})$), keď MECHUN = 0 v ($(10^6 \cdot \text{N} \cdot \text{m}) / (\text{rad}/\text{sec})$), keď MECHUN = 1
DSD	koeficient rýchlosti vlastného tlmenia zotrvačných hmôt $T = \text{DSD}(W)$, kde W (ω) je rýchlosť zotrvačných hmôt v ($(10^6 \cdot \text{libra} \cdot \text{stopa}) / (\text{rad}/\text{sec})$), keď MECHUN = 0

- v $((10^6 \cdot \text{N} \cdot \text{m})/(\text{rad}/\text{sec}))$, keď $\text{MECHUN} = 1$
- FM** keď je zadaná hodnota ≤ 2 , potom je časová konštanta pri meraní naprázdno
keď je zadaná hodnota > 2 , potom je časová konštanta pri meraní nakrátko
- MECHUN** keď je zadaná 0, potom je vzťažnou sústavou anglická sústava jednotiek
keď je zadaná 1, potom je vzťažnou sústavou metrická sústava jednotiek

Zadávané hodnoty ukazuje nasledovná tabuľka:

Tab. 7.4 Nastavenie synchronného generátora 100 MVA

Volt	Freq	Angle	Poles	SMOVTQ	SMOVTQ	RMVA	RkV	AGLINE
4898,98	50	0	4	1	1	100	6	100
RA	XL	Xd	Xq	Xd'	Xq'	Xd''	Tdo'	Tqo'
0	0,13	1,79	1,71	0,169	0,228	0,135	4,3	0,85
Tdo''	Tqo''	Xo	RN	XN	XCAN	HICO	DSR	DSD
0,032	0,05	0,13	0	0	0,13	2,5	0	50
FM	MECHUN							
3	1							

Model vedenia 110 kV je použitý z príkladu 4.2.1, dáta sú pre názornosť uvedené v Tab. 7.5. Model vedenia 22 kV je použitý z príkladu 4.2.6 a dáta uvádza Tab. 7.6. Merná rezistivita zeme **Rho** 100 $\Omega \cdot \text{m}$, frekvencia **Freq. Init** 50 Hz. Rozmiestnenie vodičov na stožiaroch pre vedenie 22 kV je na obr. 7.3, hodnoty v Tab. 7.6 a pre 110 kV na obr. 7.4 a v Tab. 7.5. Údaje kábla 6 kV v Tab. 7.7.

Hodnoty transformátora 110/22 kV sú získané z kapitoly 6.2.3. V Tab. 7.8 sú pre názornosť uvedené jeho parametre. Hodnoty transformátora 6/22 kV sú uvedené v Tab. 7.9.

Pri jednotlivých transformátoroch sú rešpektované kapacity primárneho 3 nF a sekundárneho 10 nF vinutia transformátora voči zemi a taktiež kapacita medzi primárnym a sekundárnym vinutím 3 nF. Zapojenie kapacít je z dôvodu prehľadnosti sústredené do jedného bloku pomocou **Edit/Compress**. V dialógovom okne **Compress Group** sa ďalej nastaví počet a označenie vstupných a výstupných svoriek bloku.

Tab. 7.5 Parametre prenosového vedenia 110 kV, AlFe6 120 mm² s dĺžkou 6 km

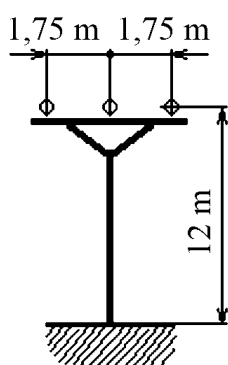
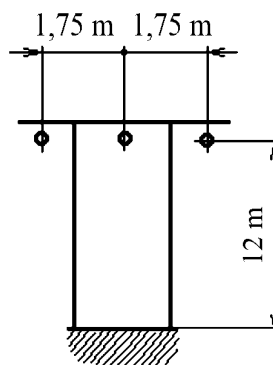
Phase no číslo fázy	Rin [cm] polomer oceľovej duše vodiča	Rout [cm] vonkajší polomer vodiča-lana	Resis [Ω/km] odpor vodiča na jeden kilometer dĺžky	Horiz [m] Horizontálna vzdialenosť lana od stredy stožiara	Vtower [m] výška lana nad zemou pri stožiar	Vmid [m] výška lana nad zemou v mieste najväčšieho previsnutia
1	0,258	1,565	0,234	-1,75	12	12
2	0,258	1,565	0,234	0	12	12
3	0,258	1,565	0,234	1,75	12	12

Tab. 7.6 Parametre vedenia 22 kV, AlFe6 95 mm² s dĺžkou 0,5 km

Phase no číslo fázy	Rin [cm] polomer oceľovej duše vodiča	Rout [cm] vonkajší polomer vodiča-lana	Resis [Ω/km] odpor vodiča na jeden kilometer dĺžky	Horiz [m] Horizontálna vzdialenosť lana od stredy stožiara	Vtower [m] výška lana nad zemou pri stožiar	Vmid [m] výška lana nad zemou v mieste najväčšieho previsnutia
1	0,218	1,335	0,319	-1,75	12	12
2	0,218	1,335	0,319	0	12	12
3	0,218	1,335	0,319	1,75	12	12

Tab. 7.7 Parametre kábla 6 kV (Pí článok, pozícia fázy A: vertikálna 0,7 m, horizontálna 0)

Jadro	Rin [cm] vnútorný polomer vodiča	Rout [cm] vonkajší polomer vodiča	Rho [$\Omega \cdot m$] rezistivita vodiča	Mu relatívna permeabilita materiálu vodiča	mu relatívna permeabilita izolačného materiálu okolo vodiča	Eps relatívna permitivita izolačného materiálu okolo vodiča
Core	0	0,00874	2,7E-8	1,0000207	0,9999905	2,3
Plášť žily	Rin [cm] vnútorný polomer plášťa žily	Rout [cm] vonkajší polomer plášťa žily	Rho [$\Omega \cdot m$] rezistivita plášťa žily	Mu relatívna permeabilita materiálu plášťa žily	mu relatívna permeabilita izolačného materiálu okolo plášťa žily	Eps relatívna permitivita izolačného materiálu okolo plášťa žily
Sheath	0,01674	0,01924	1,555E-8	0,99999031	0,9999905	2,3


 Obr. 7.3 Rozmiestnenie vodičov
na vedení 22 kV

 Obr. 7.4 Rozmiestnenie vodičov
na vedení 110 kV

Tab. 7.8 Menovité parametre a hodnoty získané meraním transformátora 110/22 kV

Počet fáz (Number of phases)	Počet vinutí (Number windigs)	Typ jadra (Type of core)	Testovacia frekvencia [Hz] (Test frequency)	
3	2	Plášťový transformátor	50	
Primárne napätie [kV] (HV)	Sekundárne napätie [kV] (LV)	Menovitý výkon [MVA] (Power)	Zapojenie (Connections)	Fázový posun [°] (Phase shift)
110	22	40	Yyn	0
Napätie nakrátko [%] (Imp)	Straty nakrátko [kW] (Loss)	Prúd naprázdno [%] (Curr)	Straty naprázdno [kW] (Loss)	
11,5	25,6	0,4	40	

Tab. 7.9 Menovité parametre a hodnoty získané meraním transformátora 6/22 kV

Počet fáz (Number of phases)	Počet vinutí (Number windigs)	Typ jadra (Type of core)	Testovacia frekvencia [Hz] (Test frequency)	
3	2	Plášťový transformátor	50	
Primárne napätie [kV] (HV)	Sekundárne napätie [kV] (LV)	Menovitý výkon [MVA] (Power)	Zapojenie (Connections)	Fázový posun [°] (Phase shift)
6	22	10	Yyn	0
Napätie nakrátko [%] (Imp)	Straty nakrátko [kW] (Loss)	Prúd naprázdno [%] (Curr)	Straty naprázdno [kW] (Loss)	
9,6	30	0,4	13	

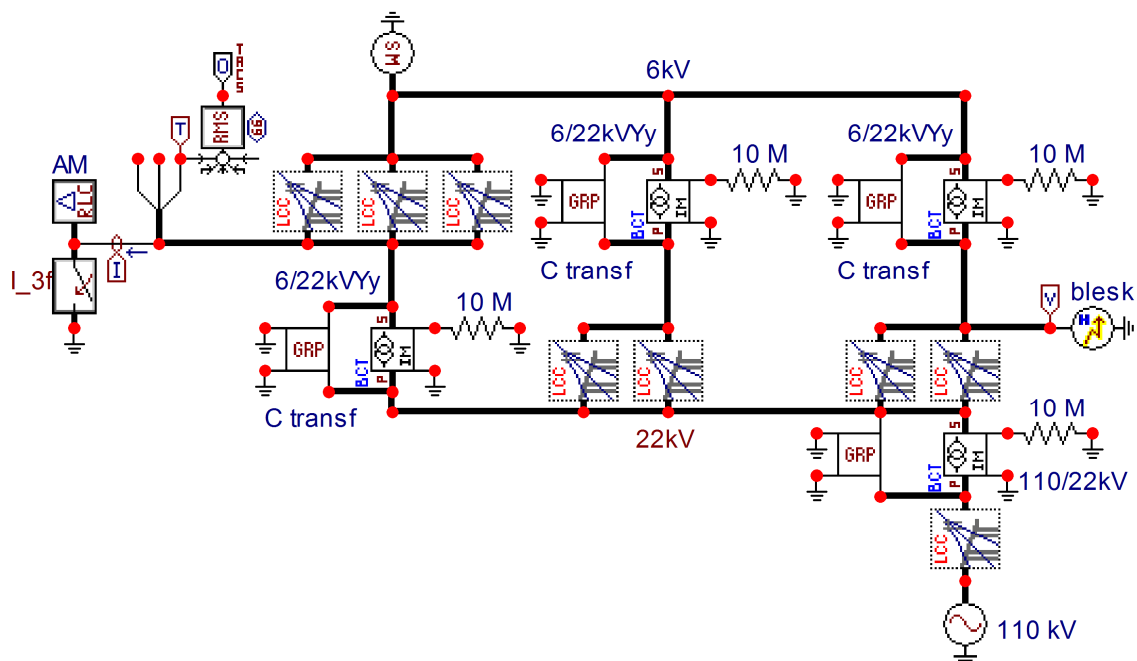
Asynchrónne motory s celkovým výkonom $S_M = 6$ MVA a pomernom záberovom prúde $i_z = 7$ sú nahradené RLC článkom v D zapojení. Parametre RLC článku sú:

$$Z_{nf} = \sqrt{3} \cdot \frac{U_n}{I_n} = \sqrt{3} \cdot \frac{6000}{200} = 51,96 \, \Omega \quad (7.13)$$

$$R_{z1} = Z_{nf} \cdot \cos \varphi = 51,96 \cdot 0,96 = 46,76 \, \Omega \quad (7.14)$$

$$L_{z1} = \frac{Z_{nf} \cdot \sin \varphi}{2 \cdot \pi \cdot f} = \frac{51,96 \cdot 0,436}{2 \cdot \pi \cdot 50} = 72,09 \, \text{mH} \quad (7.15)$$

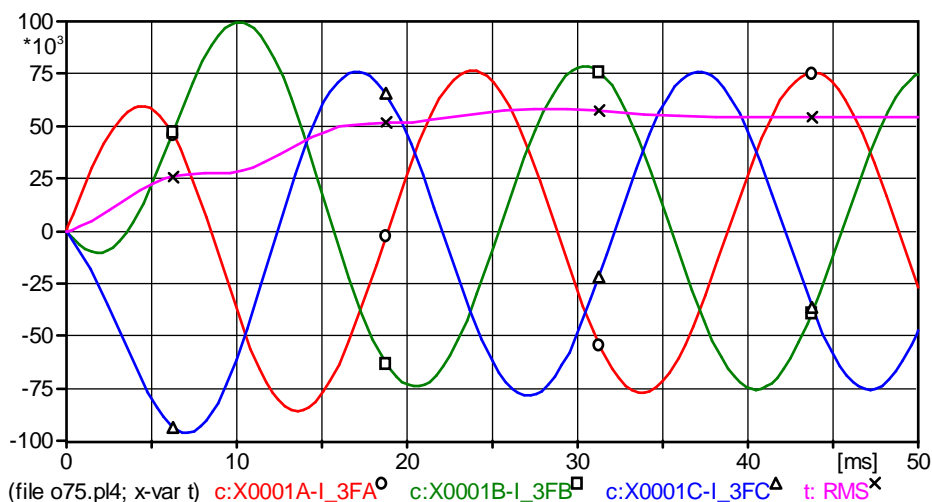
Sústava 110 kV je nahradená ideálnym napät'ovým zdrojom s amplitúdou 89,815 kV.



Obr. 7.5 Schéma časti elektrizačnej sústavy vytvorenej pomocou ATPDraw

7.4 Simulácia 3-fázového skratu

V čase $t = 0$ ms je vytvorený 3-fázový kovový skrat na prípojnici 6 kV a je snímaný priebeh jednotlivých prúdov (X0001A-I_3FA, X0001B-I_3FB, X0001C-I_3FC), vrátane priebehu efektívnej hodnoty ustáleného skratového prúdu (RMS). Krok výpočtu je 0,1 ms.



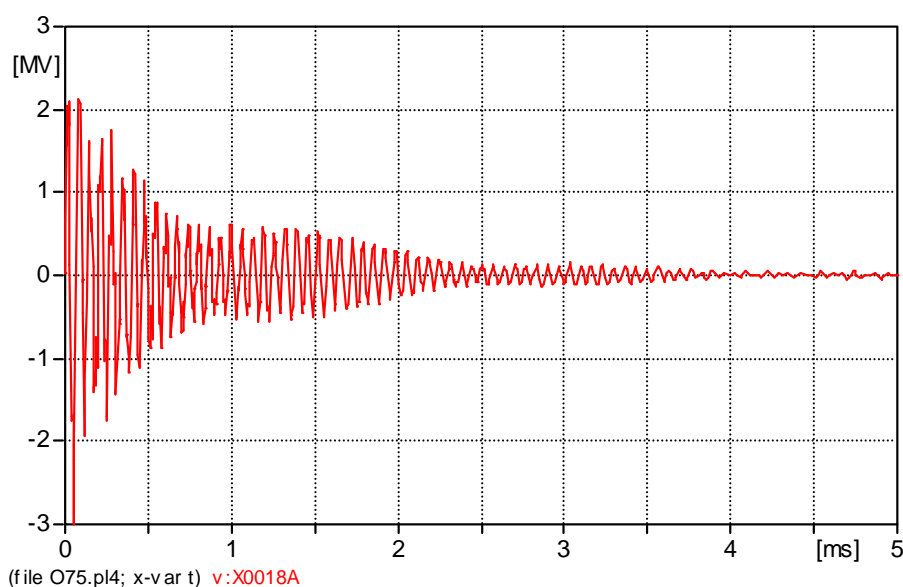
Obr. 7.6 Priebeh prúdov jednotlivých fáz a efektívne hodnoty ustáleného skratového prúdu pri kovovom 3-fázovom skrate na prípojnici 6 kV

Tab. 7.10 Porovnanie vypočítaných hodnôt podľa jednotlivých metód výpočtu

Metóda	Efektívna hodnota ustáleného skratového prúdu [kA]	Nárazový skratový prúd [kA]
výpočet	50,59	107,3
simulácia ATP	51,6	100,0

7.5 Simulácia úderu blesku do vedenia 22 kV

Typickým prechodným dejom, ktorý sa vyskytuje na vedení vysokého napätia, je odozva na atmosférické prepätie. Schéma na obr. 7.5 zachycuje úder blesku do vodiča fázy A v sieti 22 kV. Blesk je modelovaný prúdovým impulzom 8/20 μ s s amplitúdou 10 kA. Priebeh napätia v mieste úderu blesku ukazuje obr. 7.7. Vzniknuté prepätie je dané impedančným charakterom siete v mieste úderu a je pomerne rýchle tlmené. Krok výpočtu je potrebné zmeniť na 0,1 μ s a je nutné skryť RMS modul zaškrtnutím možnosti **Hide**.



Obr. 7.7 Priebeh napätia v mieste úderu blesku

7.6 Ďalšie možnosti modelovania

Program ATP samozrejme poskytuje ďalšie možnosti modelovania, ktoré zatiaľ neboli popísané. Vyčerpávajúcim spôsobom popisuje prácu s EMTP – ATP publikácia ATP Rule Book.

7.6.1 Zdroje

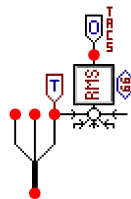
Príkladom ďalších možností ATP v oblasti zdrojov je posledná simulácia, ktorá využíva zdroj typ 15 HEIDLER. Ide o zdroj impulzu, pričom význam jednotlivých veličín v dialógovom okne je nasledujúci:

U/I	nastavenie napäťového (hodnota 0) alebo prúdového zdroja (-1)
Amp	amplitúda napätia (pre hodnotu U/I = 0) blesku, jednotka volt alebo ampér v závislosti od nastavenia U/I.
T_f	doba čela [s]
Tau	doba poltylu [s]
n	faktor definujúci strmosť impulzu napätia/prúdu
Tsta	nastavenie štartovacieho času [s]
Tsto	ukončenie činnosti zdroja [s] v intervale $T_{sto} < T < T_{sta}$ je výstupný signál zdroja nulový.

V simulácii boli pre zdroj impulzu prúdu zadané hodnoty **Amp** 10 kA, časové parametre odpovedajú parametrom normalizovaného atmosférického impulzu prúdu **T_f** 8 μ s, **Tau** 20 μ s a faktor strmosti **n** 2.

7.6.2 TACS a MODELS

V simulácii 3-fázového skratu bol použitý prvok TACS (Transient Analysis of Control Systems). Modul RMS počíta efektívnu hodnotu sumy veličín, ku ktorým sú pripojené vstupy modulu. Zadávanie modulu v ATPDraw ukazuje obr. 7.8.



Obr. 7.8 Zapojenie modulu pre meranie efektívnej hodnoty

Jedná sa o typ RMS meter 66 (**TACS/DEVICES/RMS meter 66**). V dialógovom okne **Attributes** sa nadefinuje použitie prvku:

Type	88 vnútorná veličina 98 výstupná veličina 99 vstupné veličiny
Freq.	počítaná frekvencia [Hz]

Výstupný signál $OUT = rms(\text{sum}(\text{inputs}))$, určí efektívnu hodnotu sumy vstupných signálov (uzly *IN1* až *IN5*).

Pri každom uzle modulu sa ešte nastaví jeho charakter; pre vstupné uzly je možné zadať:

Type 0 výstupný
1 vstupný kladný
2 vstupný záporný
3 ignorovaný

Do uzla s označením *OUT* je nutné pripojiť prvok, prostredníctvom ktorého bude sledovaný priebeh zobrazovaný (**Probes & 3 phase/Probe Tacs**) a do uzla s označením *IN* je nutné pripojiť prvok, ktorý bude snímaný priebeh merať (**EMTP – OUT**). Pri tomto prvku sa nastaví typ sledovaného priebehu:

Type 90 napätie
91 prúd
92 vnútorná premenná
93 definuje stav spínača: spínač zopnutý Probe = 1, spínač vypnutý Probe = 0

T_sta a **T_sto** nastaví čas začiatku a konca snímania [s]

7.6.3 Zhrnutie

Pomocou prostriedkov TACS môžu byť vytvorené sústavy meracích a riadiacich modulov alebo vytvárané modely, ktoré ATP nemá definované. Pre tie prípady, keď by riešenie problému pomocou TACS bolo komplikované prípadne nemožné, bol pre ATP vytvorený programovací jazyk MODELS, pomocou ktorého je možné splniť prakticky ľubovoľnú požiadavku užívateľa. Bližší popis použitia oboch prostriedkov je však mimo uvažovaný rozsah tohto materiálu.

ZOZNAM POUŽITEJ LITERATÚRY

- [1] Meyer, W. S. – Liu, T.-H.: *Alternative Transient Program (ATP) Rule Book*. Canadian/American EMTP User Group, 1987-2000.
- [2] Kizilcay, M.: *Power System Transients and Their Computation*. Osnabrück, 2000.
- [3] Prikler, L. – Høidalen, H. K.: *ATPDraw User's Manual*, 1998-2009.
- [4] Mach, V.: *EMTP – ATP*. [Online] [citované 1. júl 2011] Dostupné na < <http://homen.vsb.cz/~mah30/> >
- [5] Mešter, M. – Hvizdoš, M. – Chladný, V.: *Alternative Transient Program – The Professional Tool for Power Engineering Simulations*. In: The Oradea University Annals, Electrotechnical Section, Oradea, 2003, p. 179-184. ISSN 1223-2106
- [6] Medved', D.: *Electric losses modeling of decentralized power sources connection using EMTP ATP*. In: ELEN 2010, ČVUT Praha, 2010, p. 1-9. ISBN 978-80-254-8089-2
- [7] Kizilcay, M.: *Alternative Transients Program Features*. [Online] [citované 1. júl 2011] Dostupné na < <http://www.emtp.org/> >
- [8] Haginomori, E.: *Applied ATP-EMTP to Highly-sophisticated electric power systems*. [Online] [citované 1. júl 2011] Dostupné na < <http://gundam.eei.eng.osaka-u.ac.jp/haginomori/index.html> >
- [9] Mešter, M. – Hvizdoš, M. – Chladný, V.: *Alternative Transient Program – profesionálny nástroj pre modelovanie prechodných javov v elektrizačných sústavách*. In: EE – Časopis pre elektrotechniku a energetiku, Bratislava, Vol. 9, No. 5/S, 2003, p. 15-17. ISSN 1335-2547
- [10] Hvizdoš, M. – Mešter, M.: *Modelovanie výkonových transformátorov s využitím programu ATP*. In: EE – Časopis pre elektrotechniku a energetiku, Bratislava, Vol. 10, No. 5/S, 2004, p. 45-48. ISSN 1335-2547
- [11] Hvizdoš, M. – Mešter, M.: *Modelovanie zemných porúch na vonkajších vedeniach*. In: EPE 2005, VŠB – TU Ostrava, 2005, p. 1-9. ISBN 80-248-0842-0
- [12] Hvizdoš, M.: *Modelovanie prevádzkových a poruchových stavov v elektrizačnej sústave*. In: E2006/10 – Simulace a dynamické modelování systémů a procesů v elektrizační soustavě, EGÚ Praha, 2006, p. 1-16.
- [13] Medved', D.: *Modelovanie prechodných dejov pri pripojovaní rozptýlených zdrojov energie v prostredí EMTP ATP*. In: Elektroenergetika, Vol. 3, No. 7, 2010, p. 15-18. ISSN 1337-6756

Ing. Dušan Medveď, PhD. – Ing. Marek Hvizdoš, PhD.

Modelovanie v prostredí EMTP – ATP

Vydala Technická univerzita v Košiciach, Letná 9, Košice

Prvé vydanie

Rok vydania: 2011

Náklad: 100 ks

Počet strán: 75

ISBN 978-80-553-0776-3