

**Analýza poruchových stavov s využitím rôznych modelov
transformátorov v programe EMTP-ATP**

Obsah

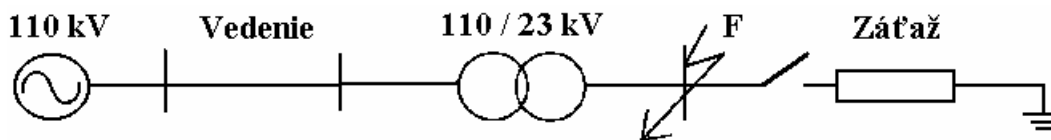
Analýza poruchových stavov pri skrate na sekundárnej strane transformátora	1
Nastavenie parametrov prvkov elektrického obvodu v ATP	3
Ideálny trojfázový transformátor	4
Použitie všeobecného dvojvinuťového 3-fázového saturačného transformátora (bez saturácie)	5
Použitie všeobecného dvojvinuťového 3-fázového saturačného transformátora (so saturáciou)	7
Použitie transformátora typu BCTRAN	8
Porovnanie výsledných hodnôt skratových prúdov	10

Analýza poruchových stavov s využitím rôznych modelov transformátorov v programe EMTP-ATP

V tejto časti budú skúmané rôzne modely transformátorov a ich vplyv na priebeh poruchových prúdov pri rôznych typoch skratov.

Analýza poruchových stavov pri skrate na sekundárnej strane transformátora

Cieľom tejto kapitoly bude analyzovať poruchové prúdy na sekundárnej strane transformátora pri použití rôznych modelov transformátorov v EMTP-ATP. Na obr. 1 je zjednodušená schéma elektrického obvodu pre prípad poruchy na sekundárnej strane transformátora. Sústava pred poruchou je v stave naprázdno.



Obr. 1 Schéma elektrického obvodu

Výpočet prvkov elektrickej siete:

- parametre vonkajšej siete: $U_n = 110 \text{ kV}$
- parametre vedenia: $R_v = 0,025 \text{ } \Omega/\text{km}$ $X_v = 0,4 \text{ } \Omega/\text{km}$
 $l = 60 \text{ km}$ $X_{v0} = 3 \cdot X_{v1}$
- parametre záťaže: $R_z = 150 \text{ } \Omega$ $L_z = 24 \text{ } \Omega$
- parametre transformátora: trojjadrový, 3-fázový, 2-vinuťový transformátor s nasledujúcimi údajmi získanými zo štítkových údajov transformátora:
 Nominálny výkon: $S_N = 40 \text{ MVA}$
 Nominálne napätie: $U_{N2} = 110 \text{ kV}$ (vinutie zapojené do hviezdy)
 $U_{N1} = 23 \text{ kV}$ (vinutie zapojené do hviezdy)
 Napätie nakrátko: $u_k = 11,5 \%$ (súsledná zložka)
 Straty nakrátko: $\Delta P_k = 130 \text{ kW}$ (súsledná zložka, pri nominálnom prúde)
 Straty naprázdno: $P_0 = 20 \text{ kW}$ (súsledná zložka, pri nominálnom napätí)
 Typ zapojenia: YNyn0(d)
 Neutrálny bod sekundárneho vinutia transformátora je uzemnený cez odpor $R_F = 10 \text{ } \Omega$.

Keďže neboli k dispozícii merané dáta pre netočivú zložku transformátora, predpokladá sa, že netočivá zložka reaktancie nakrátko X_{0k} je okolo 85 % súslednej zložky reaktancie nakrátko X_{1k} (keďže transformátor je jadrového typu).

Pre modelovanie STC, vinutie zapojené do hviezdy na strane s nižším napätím bude označená ako vinutie 1, kde je pripojená magnetizačná vetva a vetva netočivej zložky magnetizačnej indukčnosti. V ideálnom prípade, nelineárna magnetizačná indukčnosť by mala byť pripojená na taký bod v ekvivalentnom obvode, kde integrované napätie je rovné toku v železnom jadre. Pre valcové cievky môžeme predpokladať, že tok vo vinutí bude tiecť prevažne cez jadro, keďže tam má byť veľmi malý rozptyl.

Výpočet parametrov prvkov elektrickej siete:*Vedenie:*

$$R_{v1} = R_v \cdot I \cdot \frac{U_{N1}^2}{U_{N2}^2} = 0,025 \cdot 60 \cdot \frac{23^2}{110^2} = 0,06558 \Omega$$

$$R_{v0} = R_{v1} = 0,06558 \Omega$$

$$X_{v1} = X_v \cdot I \cdot \frac{U_{N1}^2}{U_{N2}^2} = 0,4 \cdot 60 \cdot \frac{23^2}{110^2} = 1,0492 \Omega$$

$$X_{v0} = 3 \cdot X_{v1} = 3,1472 \Omega$$

Transformátor :

$$R_{T1} = \frac{\frac{\Delta P_k}{S_N}}{S_N} \cdot \frac{U_{N1}^2}{S_N} = \frac{0,325}{100} \cdot \frac{23^2}{40} = 0,043 \Omega$$

$$R_{T0} = R_{T1} = 0,043 \Omega$$

$$R_{T1} = \frac{u_k}{100} \cdot \frac{U_{N1}^2}{S_N} = \frac{11,5}{100} \cdot \frac{23^2}{40} = 1,521 \Omega$$

$$X_{T0} = 0,85 \cdot X_{T1} = 1,293 \Omega$$

Celková skratová impedancia obvodu:

$$R_1 = R_{v1} + R_{T1} = 10,108 \Omega$$

$$X_1 = X_{v1} + X_{T1} = 2,5702 \Omega$$

$$R_0 = R_{v0} + R_{T0} = 10,108 \Omega$$

$$X_0 = X_{v0} + X_{T0} = 4,4402 \Omega$$

$$Z_1 = R_1 + j \cdot X_1 = 0,108 + j \cdot 2,5702 = 2,572 \cdot e^{j87,59^\circ} \Omega$$

$$Z_0 = R_0 + j \cdot X_0 = 0,108 + j \cdot 4,4402 = 4,442 \cdot e^{j88,61^\circ} \Omega$$

Výpočty skratových prúdov:*Amplitúda fázového napätia na strane poruchy:*

$$U_m = \frac{\sqrt{2} \cdot U_{N1}}{\sqrt{3}} = \frac{\sqrt{2} \cdot 23}{\sqrt{3}} = 18,78 \text{ kV}$$

Maximálna ustálená hodnota skratového prúdu:

$$I_{mu} = \frac{U_m}{Z_1} = \frac{18,78}{2,572} = 7,302 \text{ kA}$$

Časová konštanta obvodu:

$$t_a = \frac{L_1}{R_1} = \frac{X_1}{\omega \cdot R_1} = \frac{2,5702}{2 \cdot \pi \cdot 50 \cdot 0,108} = 0,0758 \text{ s}$$

Efektívna hodnota fázového napätia na strane poruchy:

$$E_1 = \frac{c \cdot U_V}{\sqrt{3}} = \frac{1 \cdot 23}{\sqrt{3}} = 13,279 \text{ kV}$$

Okamžitá hodnota skratového prúdu:

$$i_k(t) = I_{mu} \cdot \sin(\omega \cdot t + \alpha - \varphi_k) + [I_{m[u]} \cdot \sin(\alpha - \varphi) - I_{mu} \cdot \sin(\alpha - \varphi_k)] \cdot e^{-\frac{t}{t_a}}$$

Špičkový prúd pri trojfázovom skrate:

$$I_p = i_k(0,01) = 7,302 \cdot [\sin(2 \cdot 180^\circ \cdot 50 \cdot 0,01 + 0^\circ - 87,59^\circ) - \sin(0^\circ - 87,59^\circ)] \cdot e^{-\frac{0,01}{0,0758}}$$

$$I_p = 13,689 \text{ kA}$$

Počiatkový rázový skratový prúd pri trojfázovom skrate:

$$I''_{k3} = \left| \frac{U_V}{\sqrt{3} \cdot Z_1} \right| = \left| \frac{23}{\sqrt{3} \cdot 2,572} \right| = 5,163 \text{ kA}$$

Počiatkový rázový skratový prúd pri dvojfázovom skrate:

$$I''_{k2} = \left| \frac{U_V}{2 \cdot Z_1} \right| = \left| \frac{23}{2 \cdot 2,572} \right| = 4,471 \text{ kA}$$

Počiatkový rázový skratový prúd pri dvojfázovom zemnom skrate:

$$I''_{k2,1} = \left| \frac{\frac{U_V}{Z_1 + 2 \cdot Z_0}}{-\frac{\sqrt{3}}{2} + j \cdot \left(\frac{1}{2} + \frac{Z_0}{Z_1} \right)} \right| = 4,798 \text{ kA}$$

Počiatkový rázový skratový prúd tečúci zemou pri dvojfázovom zemnom skrate:

$$I''_{k2,1E} = 2 \cdot \sqrt{3} \cdot U_V \cdot \left| \frac{2 \cdot Z_1}{4 \cdot Z_1 \cdot (Z_1 + Z_0 + 3 \cdot R_F) + 2 \cdot Z_1 \cdot (2 \cdot Z_0 + 6 \cdot R_F)} \right| = 649 \text{ A}$$

Počiatkový rázový skratový prúd pri jednofázovom skrate:

$$I''_{k1} = \left| \frac{3 \cdot E_1}{2 \cdot Z_1 + Z_0 + 3 \cdot Z_F} \right| = \left| \frac{39,837}{31,8} \right| = 1,253 \text{ kA}$$

Nastavenie parametrov prvkov elektrického obvodu v ATP

Pre prvky elektrického obvodu je potrebné zadať požadované vstupné hodnoty. Nastavenie parametrov transformátorov je uvedené v nasledujúcej časti.

Vstupné hodnoty pre vedenie:

$$R_{_1} = R_{_2} = R_{_3}: R_v = R_1 \cdot l = 0,025 \cdot 60 = 1,5 \Omega$$

$$L_{_1} = L_{_2} = L_{_3}: X_v = X_1 \cdot l = 0,4 \cdot 60 = 24 \Omega$$

Vstupné hodnoty pre zdroj:

$$\text{Amp: } U_m = \frac{\sqrt{2} \cdot 110}{\sqrt{3}} = 89,815 \text{ kV} \quad f = 50 \text{ Hz}$$

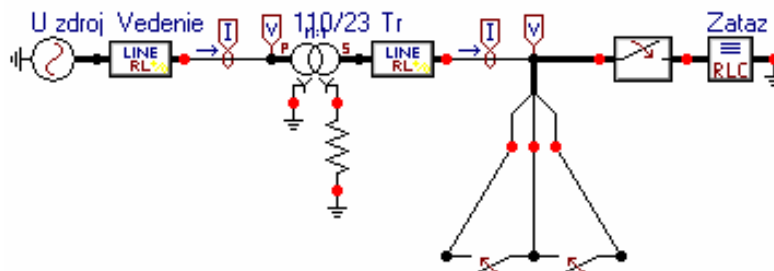
Vstupné hodnoty pre záťaž:

$$R_{_1} = R_{_2} = R_{_3}: R_z = 150 \Omega$$

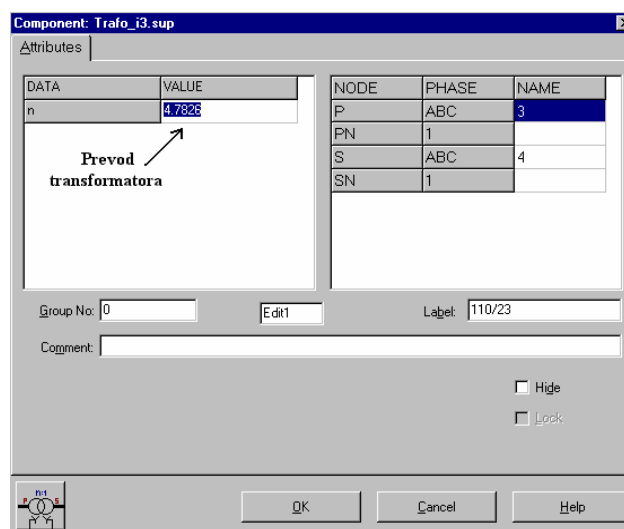
$$L_{_1} = L_{_2} = L_{_3}: X_z = 24 \Omega$$

Ideálny trojfázový transformátor

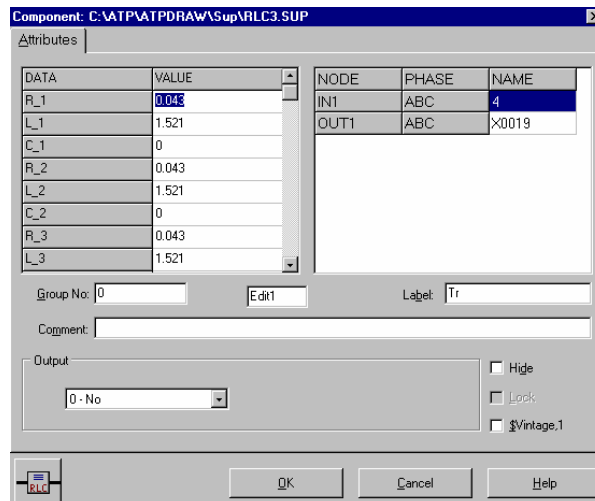
Na obr. 2 je uvedené zapojenie elektrického obvodu pre prípad trojfázového skratu. Pre iný typ poruchy sa obvod modifikuje len v mieste poruchy. Keďže sa pri tomto type transformátora neuvažuje s jeho impedanciou, je potrebné k modelu sériovo pripojiť impedanciu, v ktorej zadáme parametre transformátora podľa obr. 4. Ako už bolo skôr uvedené, sekundárna strana transformátora je uzemnená cez odpor s veľkosťou 10 Ω .



Obr. 2 Zapojenie elektrického obvodu v ATP



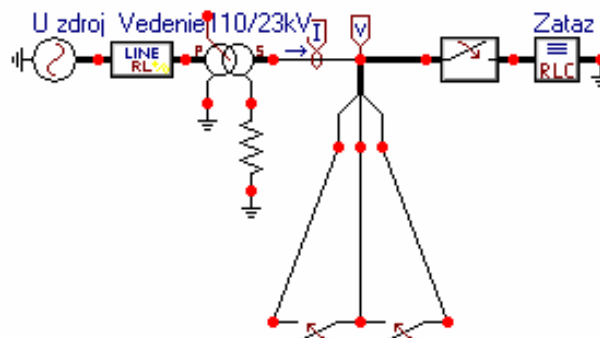
Obr. 3 Vstupné hodnoty pre transformátor



Obr. 4 Vstupné hodnoty impedancie transformátora

Použitie všeobecného dvojnútového 3-fázového saturačného transformátora (bez saturácie)

Na obr.5 je uvedený obvod pre prípad trojfázového skratu. Parametre pre transformátor vypočítame podľa ďalej uvedených vzťahov.



Obr. 5 Zapojenie elektrického obvodu v ATP

Nominálny prúd (vzťahnutý na stranu s vyšším napätím):

$$I_{N2} = \frac{S_{NT}}{\sqrt{3} \cdot U_{N2}} = 209,95 \text{ A}$$

Celková skratová rezistancia (vzťahnutá na stranu s vyšším napätím):

$$R_{k2} = \frac{\Delta P_k}{3 \cdot I_{N2}^2} = 0,9831 \Omega$$

Celková skratová impedancia:

$$Z_{k2} = \frac{u_k \cdot U_{N2}^2}{S_N} = 34,7875 \Omega$$

Celková skratová reaktancia:

$$X_{k2} = \sqrt{Z_{k2}^2 - R_{k2}^2} = 34,7736 \Omega$$

Rezistencia zo strát naprázdno (strana s nižším napätím):

$$R_{\text{mag}} = 3 \cdot \frac{U_{N1}^2}{P_0} = 79,35 \text{ k}\Omega$$

Rezistencia zo strát naprázdno R_{mag} je určená pre vinutie zapojené do hviezdy (vinutie 1) pomocou U_1 (napätie na vinutí 1) a $\frac{P_0}{3}$ (straty pri prevádzke jednej fázy) (viď obr. 4).

V skutočnosti, celková skratová impedancia je rozdelená nerovnomerne medzi primárne a sekundárne vinutia. Tu je zvolený pomer $\frac{1}{4}$ pre $\frac{Z_{k1}}{Z_{k2}}$. Požadované údaje pre model STC (viď obr. 4) môžu byť určené z vyššie uvedených hodnôt:

Vinutie 1: zapojené do hviezdy (s napätím $\frac{23}{\sqrt{3}}$ kV)

Vinutie 2: zapojené do hviezdy (s napätím $\frac{110}{\sqrt{3}}$ kV)

$$R_1 = 0,2 \cdot \frac{23^2}{110^2} \cdot R_{k2} = 0,008596 \Omega$$

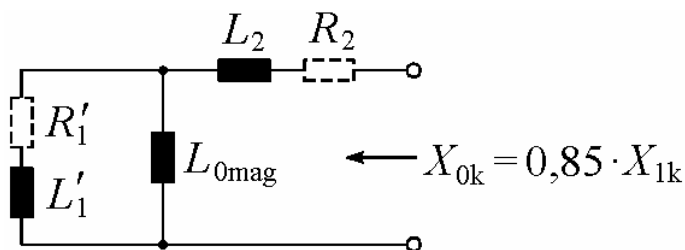
$$X_1 = 0,2 \cdot \frac{23^2}{110^2} \cdot X_{k2} = 0,304 \Omega$$

$$R_2 = 0,8 \cdot R_{k2} = 0,78648 \Omega$$

$$X_2 = 0,8 \cdot X_{k2} = 27,8189 \Omega$$

Transformátor je trojjadrový, teda homopolárny magnetizačný odpor je vysoký a $\frac{X_{0k}}{X_{1k}} = 0,85 \leq 1$. Netočivá zložka magnetizačnej indukčnosti $L_{0\text{mag}}$ (na strane s nižším napätím) potrebná pre model STC, má byť určená spätné.

Ekvivalentný obvod pre netočivú zložku transformátora, vzťahnutý na vinutie s vyšším napätím, je daný na obr. 6.



Obr. 6 Ekvivalentný obvod pre výpočet $L_{0\text{mag}}$

Na obr. 5 R'_1 a L'_1 sú impedancie vinutia na strane s nižším napätím vzťahnuté na vinutie s vyšším napätím. Pri učení $L_{0\text{mag}}$ sa zanedbajú rezistancie R'_1 a R_2 , lebo $R'_1 \ll X'_1$ a $R_2 \ll X_2$.

$$X'_1 = 0,2 \cdot X_{k2} = 6,95472 \Omega$$

$$\frac{1}{X'_{0\text{mag}}} = \frac{1}{X_{0k} - X_2} + \frac{1}{X'_1} \quad \Rightarrow \quad X'_{0\text{mag}} = 1,391 \Omega$$

$$L_{0\text{mag}} = \frac{U_{N1}^2}{U_{N2}^2} \cdot \frac{X'_{0\text{mag}}}{\omega} = \frac{23^2}{110^2} \cdot \frac{1,391}{2 \cdot \pi \cdot 50} = 0,19367 \text{ mH}$$

(vzťahnuté na vinutie na strane nižšieho napätia)

EMTP očakáva tiež ako vstupný údaj hodnotu magnetického odporu R_0 s jednotkou $\frac{\text{kV}^2}{\text{H}}$:

$$R_0 = \frac{U_{N1}^2}{3 \cdot L_{0\text{mag}}} = 910483 \frac{\text{kV}^2}{\text{H}}$$

Nakoniec, lineárna magnetizačná indukčnosť pre SATURA vetvu môže byť definovaná použitím prvej dvojice dát (0,412 A, 18584 V) z merania súslednej zložky zadaním prúdu I a toku (ustálený stav):

$$i = \sqrt{2} \cdot 0,412 \text{ A} = 0,5827 \text{ A}$$

$$\psi = \frac{\sqrt{2} \cdot U}{\omega} = 83,7 \text{ V} \cdot \text{s} \quad (\text{pozn. } [\text{V} \cdot \text{s}] = [\text{Wb}])$$

Tieto hodnoty môžeme zadať do modelu transformátora podľa obr. 7.

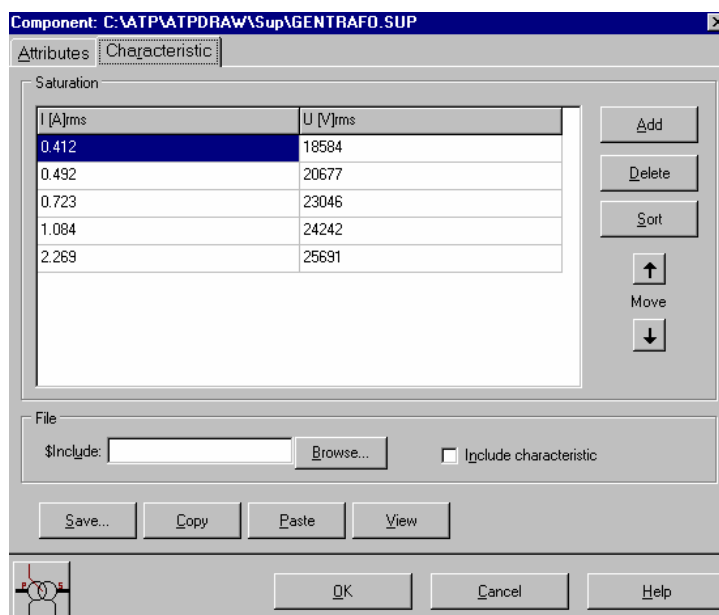
Obr. 7 Vstupné hodnoty pre transformátor

Použitie všeobecného dvojinutového 3-fázového saturačného transformátora (so saturáciou)

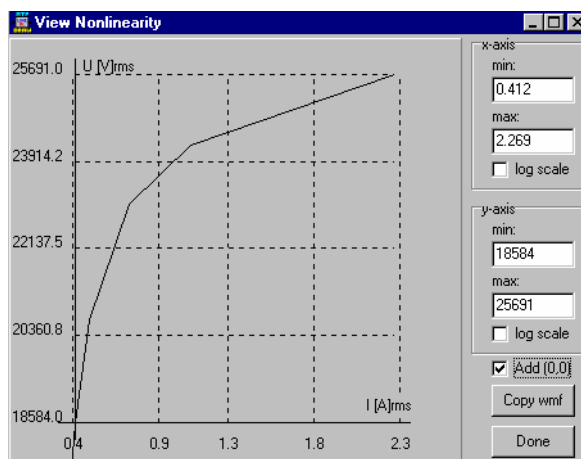
Zapojenie v ATP a vstupné hodnoty pri tomto type sú tie isté ako u predchádzajúceho typu (obr. 6 a obr. 7). Pri tomto type navyše zadávame saturačnú krivku (obr. 8) podľa tabuľky 1.

Tab. 1 Vstupné hodnoty pre saturačnú krivku.

I [A] efektívne hodnoty	U [V] efektívne hodnoty
0,412	18584
0,492	20677
0,723	23046
1,084	24262
2,269	25691



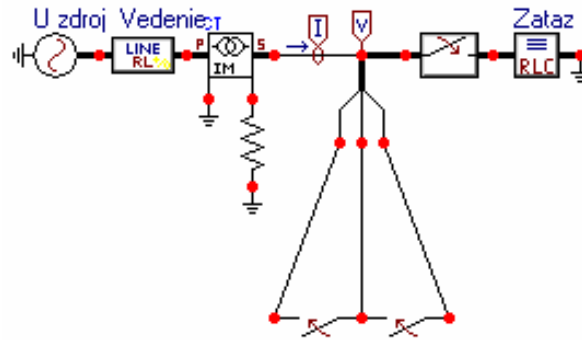
Obr. 8 Vstupné hodnoty saturačnej krivky



Obr. 9 Zobrazenie saturačnej krivky

Použitie transformátora typu BCTRAN

Zapojenie elektrického obvodu pre trojfázový skrat je uvedené na obr. 10. Pri tomto type navyše zadávame hodnoty z meraní podľa obr. 11.



Obr. 10 Zapojenie elektrického obvodu v ATP

Structure

Number of phases: 3
 Number of windings: 2
 Type of core: 3-legged stacked core
 Test frequency [Hz]: 50
 AR Output

Ratings

	HV	LV
L-L voltage [kV]	110	23
Power [MVA]	40	40
Connections	Y	Y
Phase shift [deg]	0	0

Factory tests

Open circuit | Short circuit

Performed at: LV | Connect at: LV | Zero sequence data available

positive sequence

Volt (%)	Curr (%)	Loss (kW)
80.8	0.041	12.5
89.9	0.049	16

Positive core magnetization:
 Linear internal | External Lm | External Lm || Rm

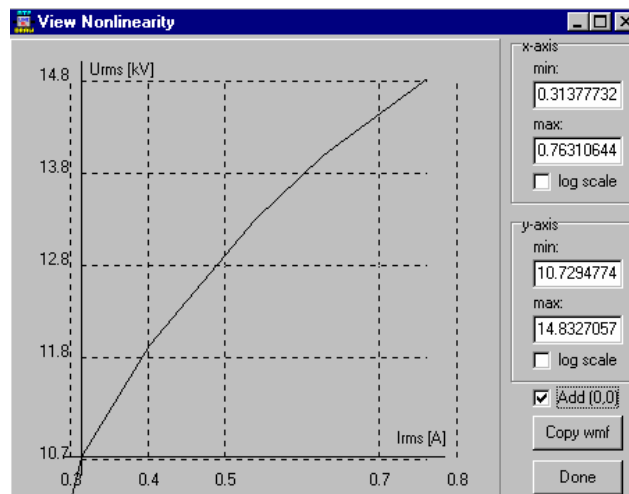
View/Copy:
 Rm | Lm-rms | Lm-flux

Group No: 0 | Label: | Factory test data | Hide

Comment:

Buttons: OK, Cancel, Import, Save As, Run ATP, View +, Copy +, Help

Obr. 11 Vstupné hodnoty pre transformátor



Obr.12 Zobrazenie magnetizačnej krivky

Výsledné hodnoty získané zo simulácií a výpočtom sú uvedené v nasledovnej tabuľke 2. Z týchto priebehov je možné určiť hodnoty špičkového prúdu a maximálne hodnoty skratových prúdov pre rôzne typy skratov. Pri simuláciách sa uvažuje, že skrat nastal v čase

0,1 s. Špičkový prúd bol teda odčítavaný v čase 0,11 s. Odčítané maximálne hodnoty ustálených skratových prúdov sú v tabuľke prepočítané na efektívne hodnoty.

Porovnanie výsledných hodnôt skratových prúdov

Výsledné hodnoty získané výpočtom a pri simuláciách sú uvedené v tabuľke 2. Z týchto priebehov je možné určiť hodnoty špičkového prúdu a maximálne hodnoty skratových prúdov pre rôzne typy skratov. Pri simuláciách sa uvažuje, že skrat nastal v čase 0,1 s. Špičkový prúd bol teda odčítavaný v čase 0,11 s. Odčítané maximálne hodnoty ustálených skratových prúdov sú v tabuľke prepočítané na efektívne hodnoty.

Tab. 2 Výsledné hodnoty skratových prúdov

Typ skratu	3F-skrat A-B-C	3F-skrat A-B-C	2F-skrat B-C	2F-skrat B-C-N	2F-skrat B-C-N	1F-skrat A-N
Typ transformátora	I_p [A]	I''_{k3} [A]	I''_{k2} [A]	$I''_{k2,1}$ [A]	$I''_{k2,1E}$ [A]	I''_{k1} [A]
Vypočítané hodnoty	13689	5163	4471	4798	649	1253
Ideálny (TRAFO_13)	13638	5164	4470	4785	649	1252
GENTRAFO	13705	5165	4469	4786	648	1247
GENTRAFO (saturácia)	13609	5280	4470	4785	646	1256
BCTRAN	13706	5166	4472	4787	647	1250