ИЗВЕСТИЯ
ТОМСКОГО ОРДЕНА ТРУДОВОГО КРАСНОГО ЗНАМЕНИ
ПОЛИТЕХНИЧЕСКОГО ИНСТИТУТА имени С. М. КИРОВА

Том 159 1967 г.

К МОДЕЛИРОВАНИЮ СИЛОВЫХ ТРАНСФОРМАТОРОВ НА РАСЧЕТНЫХ УСТРОЙСТВАХ ПОСТОЯННОГО ТОКА

Р. И. БОРИСОВ, В. В. ЛИТВАК

(Представлена кафедрой электрических сетей и систем)

Для трехобмоточных трансформаторов, оборудованных устройствами РПН, при отклонениях напряжения со стороны источника питания возможно установление 45 значений коэффициентов трансформации, что сильно затрудняет решение задачи по моделированию трансформаторов на расчетных устройствах постоянного тока. Приближение по коэффициентам трансформации при заданных отклонениях напряжения сокращает число расчетных режимов и облегчает решение задачи.

Определение коэффициентов трансформации силовых трансформаторов, не имеющих устройств РПН, производится подбором по расчетным значениям напряжений в максимальном и минимальном режимах. Приближение к желаемому напряжению осуществляется для фиксированных значений напряжений со стороны источника питания.

Предлагается выбор коэффициентов трансформации производить с учетом возможных изменений напряжения со стороны источника питания, что обеспечит меньшие отклонения напряжения у потребителей, а следовательно, лучшие условия их работы.

Установление диапазона и шкалы значений коэффициентов трансформации силовых трансформаторов и автотрансформаторов требуется также при их проектировании.

Рассмотрим задачу определения коэффициента трансформации силового двухобмоточного трансформатора при заданной его загрузке и изменениях напряжения со стороны источника питания. Для схемы замещения на рис. 1 может быть записано следующее выражение для напряжения на зажимах нагрузки в функции коэффициента трансформации K и параметров схемы:

$$U_{\text{н}} = \frac{U_1 z_{\text{н}} K^2}{z_{S_1} + (z_{S_2} + z_{\text{н}})K^2} \, \frac{1}{K} = \frac{U_1}{\dfrac{z_{S_1}}{z_{\text{н}} K} + \dfrac{z_{\text{н}} + z_{S_2}}{z_{\text{н}}} K} =$$

$$= \frac{U_1}{\dfrac{\alpha_1}{K} + \beta_1 K + j\left(\dfrac{\alpha_2}{K} + \beta_2 K\right)},$$

где $\dfrac{z_{S_1}}{z_{\text{н}}} = \alpha_1 + j\alpha_2$; $\qquad 1 + \dfrac{z_{S_2}}{z_{\text{н}}} = \beta_1 + j\beta_2$.

Реактивности рассеивания обмоток можно считать не зависимыми от положения переключателя ответвлений. Полагая, что напряжение на первичной стороне трансформатора может изменяться в пределах $U_1' \div U_1''$ для каждого расчетного режима его загрузки, определяем значение коэффициента трансформации „K“, которое обеспечит наименьшие отклонения от желаемого напряжения на вторичной стороне. В качестве желаемого выбирается номинальное напряжение сети. Приближение по коэффициенту трансформации осуществляется по формуле наименьших квадратов.

$$\frac{\partial}{\partial K} \cdot \int_{U_1''}^{U_1'} \left[U_{2ж} - \frac{U_1}{\dfrac{\alpha_1 + j\alpha_2}{K} + (\beta_1 + j\beta_2) K} \right]^2 dU_1 = 0. \qquad (1)$$

Преобразования уравнения (1) по модулю или действительной части комплекса $U_1(K)$ оказывается весьма громоздкими. Поэтому предлагается приближение к $U_{2ж}$ осуществлять по обратным функциям, что дает

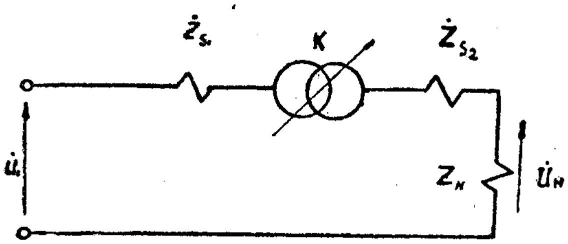

Рис. 1. Схема замещения двухобмоточного трансформатора с переменным коэффициентом трансформации.

разницу в приближениях 0,2% при разнице функций в 10%. Такая сходимость процесса позволяет считать оба способа приближения по одинаковым переменным соответствующим требованиям к точности расчета.

$$\frac{1}{U_1(K)} = \frac{\dfrac{\alpha_1 + j\alpha_2}{K} + (\beta_1 + j\beta_2) K}{U_1};$$

$$\frac{1}{|U_1(K)|} = \frac{\left[\left(\dfrac{\alpha_1}{K} + \beta_1 K \right)^2 + \left(\dfrac{\alpha_2}{K} + \beta_2 K \right)^2 \right]^{\frac{1}{2}}}{U_1} = \frac{\gamma^{\frac{1}{2}}(K)}{U_1}.$$

Тогда

$$\frac{\partial}{\partial K} \int_{U_1''}^{U_1'} \left[\frac{1}{U_{2ж}} - \frac{\gamma(K)}{U_1} \right]^2 dU_1 = -2 \frac{1}{U_{2ж}} \ln U_1 \Big|_{U_1''}^{U_1'} \frac{\partial}{\partial K} \gamma^{\frac{1}{2}}(K) -$$

$$- \frac{1}{U_1} \Big|_{U_1''}^{U_1'} \frac{\partial}{\partial K} \gamma K = 0.$$

Обозначим

$$-\frac{2}{U_{2ж}} \ln U_1 \Big|_{U_1''}^{U_1'} = -A; \qquad -\frac{1}{U_1} \Big|_{U_1''}^{U_1'} = B.$$

Следовательно,

$$-\frac{1}{2} A \gamma^{-\frac{1}{2}}(K) \cdot \gamma'(K) + B \gamma'(K) = \gamma'(K) \left[B - \frac{1}{2} A \gamma^{-\frac{1}{2}}(K) \right] = 0.$$

Что дает биквадратное уравнение относительно K

$$(\beta_1^2+\beta_2^2)K^4+(2\alpha_1\beta_1+2\alpha_2\beta_2)K^2-\frac{A^2}{4B^2}K^2+(\alpha_1^2+\alpha_2^2)=0. \qquad (2)$$

Применительно к трехобмоточным трансформаторам приближения следует осуществлять по двум переменным коэффициентам трансформации: между обмотками высшего и среднего напряжений K и высшего и низшего напряжений N (рис. 2).

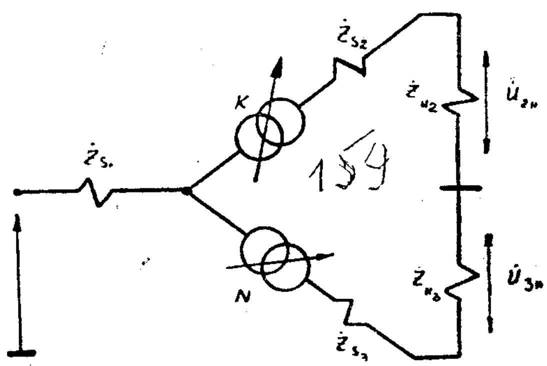

Рис. 2. Схема замещения трехобмоточного трансформатора с РПН.

Напряжения на нагрузках $z_{н2}$ и $z_{н3}$, приведенные к соответствующей ступени:

$$U_2=\frac{U_1 z_{н_3}}{\dfrac{z_{S_1}}{K}+(z_{S_2}+z_{н_2})K+\dfrac{Kz_{S_1}(z_{S_2}+z_{н_2})}{N^2(z_{S_3}+z_{н_3})}}=U_2(KN),$$

$$U_3=\frac{U_1 z_{н_3}}{\dfrac{z_{S_1}}{N}+(z_{S_3}+z_{н_3})N+\dfrac{Nz_{S_1}(z_{S_3}+z_{н_2})}{K^2(z_{S_2}+z_{н_2})}}=U_3(KN).$$

Уравнения приближений по модулям обратных функций $\dfrac{1}{|U_2(KN)|}$ и $\dfrac{1}{U_3(KN)|}$ имеют такой вид:

$$\frac{\partial}{\partial K}\int_{U_1''}^{U_1'}\left[\frac{1}{U_{2ж}}-\frac{1}{|U_2(KN)|}\right]^2 dU_1=0, \qquad (3)$$

$$\frac{\partial}{\partial N}\int_{U_1''}^{U_1'}\left[\frac{1}{U_{3ж}}-\frac{1}{|U_3(KN)|}\right]^2 dU_1=0. \qquad (4)$$

Приведем эти уравнения к виду, удобному для решения:

$$U_2(KN)=\frac{U_1}{\dfrac{\alpha_1+j\beta_1}{K}+\left(\alpha_2+j\beta_2+\dfrac{\alpha_3+j\beta_3}{N^2}\right)K}=$$

$$=\frac{U_1}{\dfrac{\alpha_1}{K}+\alpha_2K+\dfrac{\alpha_3K}{N^2}+j\left(\dfrac{\beta_1}{K}+\beta_2K+\dfrac{\beta_3K}{N^2}\right)}=\frac{U_1}{\alpha(KN)+j\beta(KN)};$$

$$\frac{1}{|U_2(KN)|}=\frac{[\alpha^2(KN)+\beta^2(KN)]^{1/2}}{U_1}=\frac{\varphi(KN)^{1/2}}{U_1};$$

$$\frac{1}{|U_3(KN)|}=\frac{[a^2(KN)+b^2(KN)]^{1/2}}{U_1}=\frac{\psi(KN)^{1/2}}{U_1}.$$

Уравнения (3) и (4) запишутся так:

$$\frac{\partial}{\partial K}\int\limits_{U_1''}^{U_1'}\left[\frac{1}{U_{2ж}}-\frac{\varphi(KN)^{1/2}}{U_1}\right]^2 dU_1=-2\,\frac{1}{U_{2ж}}\ln U_1\Big|_{U_1''}^{U_1'}\frac{\partial}{\partial K}\varphi(KN)^{1/2}-$$

$$-\frac{1}{U_1}\int\limits_{U_1''}^{U_1'}\frac{\partial}{\partial K}\varphi(KN)=-A\frac{\partial}{\partial K}\varphi(KN)^{1/2}+B\frac{\partial}{\partial K}\varphi(KN)=$$

$$=-\frac{1}{2}A\varphi(KN)^{-1/2}\varphi'(KN)+B\varphi'(KN)=\varphi'(KN)\times$$

$$\times\left[B-\frac{1}{2}A\varphi(KN)^{-1/2}\right]=0.$$

$$\frac{\partial}{\partial N}\int\limits_{U_1''}^{U_1'}\left[\frac{1}{U_{3ж}}-\frac{\psi(KN)^{1/2}}{U_1}\right]^2 dU_1=\psi'(KN)\left[B-\frac{1}{2}C\psi(KN)^{-1/2}\right]=0.$$

$$C=-2\frac{1}{U_{3ж}}\ln U_1\Big|_{U_1''}^{U_1'}.$$

Это дает систему нелинейных уравнений относительно искомых коэффициентов трансформации

$$\varphi(KN)-\frac{A^2}{4B^2}=0.$$

$$\psi(KN)-\frac{C^2}{4B^2}=0.$$

Решение этой системы можно выполнить методом Ньютона, принимая в качестве нулевых приближений номинальные значения коэффициентов трансформации.

Пример. Определить нзачение коэффициента трансформации K силового двухобмоточного трансформатора при отклонениях напряжения на первичной стороне в пределах 1,05—0,9 и полной загрузке трансформатора ТДТ-10/110.

$$U_{н_1}=110\,кв,\quad U_{н_2}=38{,}5\,кв,\ S_н=10\,мва,\quad \cos\varphi_н=0{,}9,$$

$$e_к=10{,}5\,\%,\quad \Delta P_{к.з.}=97{,}5\,квт.$$

$$z_н=\frac{35^2}{10}(0{,}9+j0{,}435)=110+j53{,}25;$$

$$x_{S_1}=\frac{0{,}05\cdot 110^2}{10}=61\,ом,\quad R_1=\frac{48{,}75\cdot 110^2}{10^5}=5{,}92\,ом,$$

$$x_{S_2}=\frac{0{,}05\cdot 38{,}5^2}{10}=7{,}42\,ом,\qquad R_2=\frac{48{,}75\cdot 38{,}5^2}{10^5}=0{,}72\,ом,$$

$$\frac{z_{S_1}}{z_н}=\alpha_1+j\alpha_2=\frac{5{,}91+j61}{110+j53{,}25}=0{,}255+j0{,}42;$$

$$1+\frac{z_{S_2}}{z_н}=\beta_1+j\beta_2=1+\frac{0,72+j7,42}{110+j53,25}=1,03+j0,051,$$

$$-A=-2\frac{1}{U_{2ж}}\ln U_1\Big|_{U_1''}^{U_1'}=-2\frac{1}{35}\cdot\frac{1}{0,433}\cdot 0,068=-0,009;$$

$$B=-\frac{1}{U_1}\Big|_{0,9\cdot 110}^{1,05\cdot 110}=-\frac{1}{1,05\cdot 110}+\frac{1}{0,9\cdot 110}=0,0015;$$

$$\frac{A^2}{4B^2}=\frac{0,009^2}{4\cdot 0,0015^2}=9;$$

$$\alpha_1^2+\alpha_2^2=0,255^2+0,42^2=0,241;$$

$$\beta_1^2+\beta_2^2=1,03^2+0,03^2=1,0609;$$

$$2\alpha_1\beta_1+2\alpha_2\beta_2=2\cdot 0,255\cdot 1,03+2\cdot 0,42\cdot 0,03=0,55.$$

Решаем уравнение (2) относительно K

$$1,069\ K^4-8,45\ K^2+0,241=0;\ K=2,8.$$

Выбираем ближайшее стандартное значение $K=2,79$, которое устанавливается при ответвлениях 107,25 на стороне 110 *кв* и номинальном ответвлении на вторичной стороне.