

ЛОКАЛЬНЫЙ РЕЖИМ ТРАНСФОРМАТОРА И ГЕНЕРАТОРА КАК ИНДИКАТОР ИХ ПОВРЕЖДЁННОГО СОСТОЯНИЯ

Кочетов И.Д., ЧГУ, ООО «Релематика», г. Чебоксары, Россия.

Лямец Ю.Я., ЧГУ, ООО «Релематика», г. Чебоксары, Россия.

***Аннотация:** рассматриваются локальные режимы, возникающие при внутренних коротких замыканиях (КЗ) в трансформаторе и генераторе. Информационную базу идентификации КЗ составляет текущая информация в виде наблюдаемых токов и напряжений, а также априорная информация о наблюдаемом объекте, содержащаяся в его модели. Полнота информационной базы позволяет выделить из наблюдаемых величин виртуальные компоненты, активируемые на зашунтированных или разомкнутых входах модели объекта источником тока внутреннего повреждения.*

***Ключевые слова:** трансформатор, генератор, модель локального режима, короткое замыкание*

Развитие микропроцессорных технологий в релейной защите и автоматике открывает возможность применять такие алгоритмы защиты, которые используют всю доступную информационную базу [1,2]. Она может быть представлена не только в виде текущей информации о токах и напряжениях со всех сторон наблюдаемого объекта, но и в виде априорной информации о его структуре и параметрах, сконцентрированной в модели неповреждённого объекта [3-5]. Было обнаружено, что модель наблюдаемого объекта позволяет в наблюдаемых токи и напряжениях выделить своеобразные виртуальные компоненты, получившие название нормальных и локальных [6, 7]. Нормальный режим возникает в модели неповреждённого энергообъекта, активируемой источниками, равными одной из наблюдаемых на каждом выводе величин, в то время как локальный режим концентрирует в себе информацию о повреждении, произошедшем на наблюдаемом объекте. Локальный режим, возникающий в модели наблюдаемого объекта, места наблюдения которого зашунтированы или

отключены от внешних связей, создаётся источником неизвестного тока КЗ, протекающего в неизвестном месте повреждения.

Для начала рассмотрим локальный режим трехобмоточного трансформатора при межвитковом замыкании или замыкании обмотки на корпус. Он создаётся неизвестным током КЗ \underline{I}_f в трансформаторе с зашунтированной повреждённой обмоткой и с разомкнутыми остальными обмотками (рис. 1). Повреждённая первичная обмотка разделяется местом КЗ f на две части w_f и $w_1 - w_f$ с собственными сопротивлениями $\underline{Z}_f = R_f + j\omega L_f$ и $\underline{Z}_1 - \underline{Z}_f$.

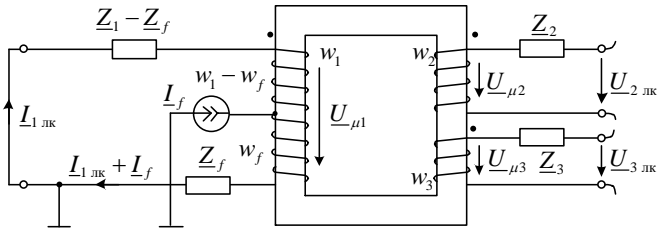


Рис. 1. Локальный режим трансформатора при повреждении первичной обмотки

МДС контура магнитной цепи $\underline{F}_\Sigma = w_1 \underline{I}_{1\text{лк}} + w_f \underline{I}_f$ определяет локальные величины $\underline{I}_{1\text{лк}}$, $\underline{U}_{2\text{лк}}$ и $\underline{U}_{3\text{лк}}$. Информацию о повреждении несут в себе их отношения

$$\underline{Z}_{q\text{лк}} = \frac{\underline{U}_{q\text{лк}}}{\underline{I}_{1\text{лк}}} = -j\omega w_q \underline{Y}_\mu \frac{w_f \underline{Z}_1 - w_1 \underline{Z}_f}{\underline{Z}_f + j\omega w_1 w_f \underline{Y}_\mu}, \quad q = 2, 3. \quad (1)$$

В трансформаторе с однородными равномерно распределёнными обмотками, для которых $\underline{Z}_1 = w_1 \underline{Z}^0$, $\underline{Z}_f = w_f \underline{Z}^0$, где \underline{Z}^0 – сопротивление одного витка обмотки, величины локальных напряжений разомкнутых обмоток будут оставаться на нулевом уровне.

Во временном базисе в пренебрежении потерями локальные напряжения разомкнутых обмоток выражаются через производную локального тока

$$u_{q \text{ лк}}(t) = -w_q G_\mu \frac{w_f L_1 - w_1 L_f}{L_f + w_1 w_f G_\mu} \frac{di_{1 \text{ лк}}(t)}{dt}, \quad (2)$$

отображающие данный тип КЗ в область на плоскости $u_{q \text{ лк}}$, $di_{1 \text{ лк}}/dt$, расположенную вблизи оси производной тока.

Локальный режим при замыкании между двумя заземлёнными обмотками одной фазы создаётся неизвестным током КЗ I_f , протекающим в повреждённых частях двух обмоток (рис. 2).

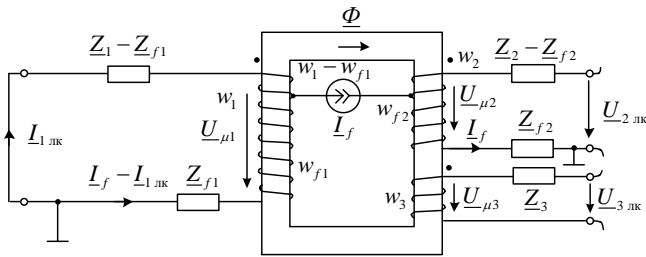


Рис. 2. Локальный режим трансформатора при межобмоточном КЗ

В контуре магнитной цепи действует МДС $F_\Sigma = w_1 I_{1 \text{ лк}} + (w_{f2} - w_{f1}) I_f$, которая определяет новые локальные величины $I_{1 \text{ лк}}$, $U_{2 \text{ лк}}$ и $U_{3 \text{ лк}}$. Из уравнения контура первой обмотки вытекает взаимосвязь локального тока с током повреждения I_f , а из уравнения вторичной обмотки определяются зависимость от I_f локальных напряжений, из которых определяются собственные параметры повреждённого трансформатора, независимые от тока I_f

$$\underline{Z}_{21 \text{ лк}} = \frac{\underline{Z}_{f2} \underline{Z}_1 + j\omega \underline{Y}_\mu (w_1^2 \underline{Z}_{f2} + w_1 w_2 \underline{Z}_{f1} + w_2 \underline{Z}_1 (w_{f2} - w_{f1}))}{\underline{Z}_{f1} + j\omega w_1 \underline{Y}_\mu (w_{f1} - w_{f2})}, \quad (3)$$

$$\underline{Z}_{31 \text{ лк}} = \frac{j\omega w_3 \underline{Y}_\mu (w_1 \underline{Z}_{f1} + \underline{Z}_1 (w_{f2} - w_{f1}))}{\underline{Z}_{f1} + j\omega w_1 \underline{Y}_\mu (w_{f1} - w_{f2})}. \quad (4)$$

В базисе мгновенных значений зависимости между локальными величинами принимают следующий вид

$$u_{2_лк}(t) = \frac{L_{f2} (L_1 + w_1^2 G_\mu) + w_2 G_\mu (w_1 L_{f1} + (w_{f2} - w_{f1}) L_1)}{L_{f1} + w_1 (w_{f1} - w_{f2}) G_\mu} \frac{di_{1_лк}(t)}{dt}, \quad (5)$$

$$u_{3_лк}(t) = \frac{w_3 G_\mu (w_1 L_{f1} + (w_{f2} - w_{f1}) L_1)}{L_{f1} + w_1 (w_{f1} - w_{f2}) G_\mu} \frac{di_{1_лк}(t)}{dt}. \quad (6)$$

На рис. 3 показаны области отображения зависимостей локальных компонентов разных обмоток для режимов межвитковых замыканий (2) и замыканий между двумя заземлёнными обмотками (5), (6) на примере однофазного трёхобмоточного трансформатора мощностью 25/3 МВА. Напряжения обмоток трансформатора $U_1 = 115/\sqrt{3}$, $U_2 = 38,5/\sqrt{3}$, $U_3 = 11/\sqrt{3}$ число витков обмоток $w_1 = 1150$, $w_2 = 385$, $w_3 = 110$, их сопротивления $R_1 = 1,375$ Ом, $R_2 = 0,154$ Ом, $R_3 = 0,013$ Ом и индуктивности $L_1 = 180,962$ мГн, $L_2 = 0,004$ мГн, $L_3 = 1,039$ мГн. Границы области отображения (5), (6) относятся к таким повреждениям, в которых выполняется равенство числа замкнувшихся витков первичной и вторичной обмотки $w_{f1} = w_{f2}$.

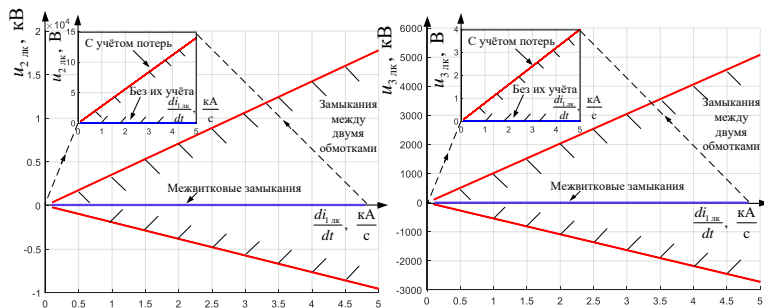


Рис. 3. Отображение режимов КЗ в первичной обмотке и замыкания между двумя заземлёнными обмотками одной и той же фазы трансформатора на плоскости их локальных компонентов

Далее перейдём к рассмотрению локального режима генератора, локальная модель которого имеет закороченные входы со стороны нейтральных выводов и разомкнутые со стороны фазных. Локальный режим при междуфазном замыкании фаз A и B (рис. 4) в обмотке генератора обусловлен

действием источника тока КЗ \underline{I}_f в разных местах x_A и x_B обмоток двух фаз.

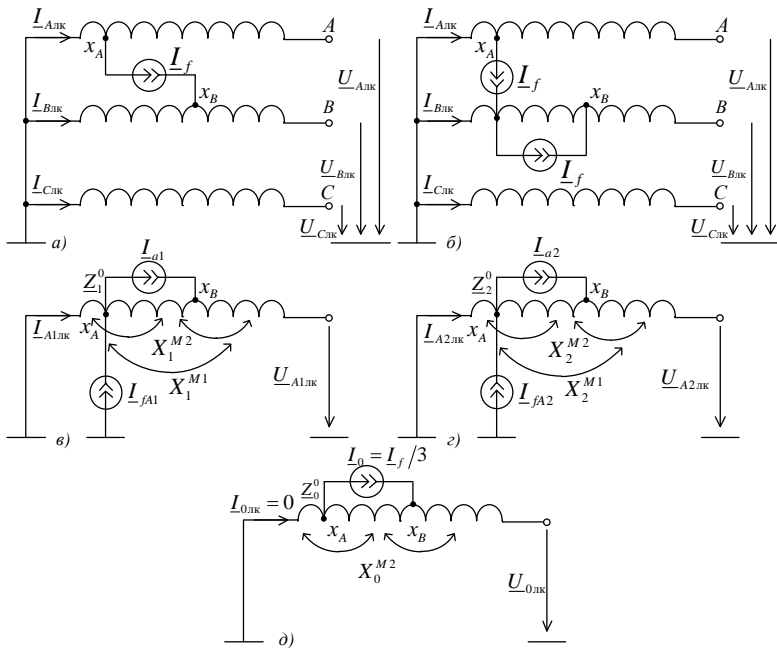


Рис. 4. Модели локального режима электрической машины при междуфазном КЗ: *а*, *б* – трёхфазная модель; *в* – модель прямой последовательности; *г* – модель обратной последовательности; *д* – модель нулевой последовательности

Граничные условия в месте x_A двух фаз A и B $\underline{I}_{fA} = -\underline{I}_{fB} = \underline{I}_f$, $\underline{I}_{fC} = 0$ определяют величины локальных токов прямой, обратной и нулевой последовательностей $\underline{I}_{A1.лк} = \underline{I}_{fA1} = \underline{I}_f / (1 - \underline{a}^2)$, $\underline{I}_{A2.лк} = \underline{I}_{fA2} = -\underline{a}^2 \underline{I}_f / (1 - \underline{a}^2)$, $\underline{I}_{0.лк} = \underline{I}_{f0} = 0$, $\underline{a} = e^{j120^\circ}$, а граничные условия в двух местах фазы B $\underline{I}_{fB} = \underline{I}_f$, $\underline{I}_{fA} = \underline{I}_{fC} = 0$ – токи, протекающие в обмотке фазы B , $\underline{I}_{a0} = 1/3 \underline{I}_f$, $\underline{I}_{a1} = 1/2 \underline{I}_f (1/3 + 1/(a^2 - a))$, $\underline{I}_{a2} = 1/2 \underline{I}_f (1/3 - 1/(a^2 - a))$, необходимые для определения локальных напряжений в месте

наблюдения

$$\underline{U}_{A1лк} = -\underline{I}_{\beta A1} \left(\underline{Z}_1^0 x_A + jX_1^{M1} \right) + \underline{I}_{\alpha 1} \left(\underline{Z}_1^0 (x_B - x_A) + jX_1^{M2} \right) \quad (7)$$

$$\underline{U}_{A2лк} = -\underline{I}_{\beta A2} \left(\underline{Z}_2^0 x_A + jX_2^{M1} \right) + \underline{I}_{\alpha 2} \left(\underline{Z}_2^0 (x_B - x_A) + jX_2^{M2} \right) \quad (8)$$

$$\underline{U}_{0лк} = \underline{I}_{\alpha 0} \left(\underline{Z}_0^0 (x_B - x_A) + jX_0^{M2} \right) \quad (9)$$

где $X_p^{M1} = k_{св} w_A (w - w_A) X_p^0$, $X_p^{M2} = k_{св} (w_A (w_B - w_A) + (w - w_B) \times (w_B - w_A)) X_p^0$ – взаимные индуктивности обмоток, $p = 1, 2, 0$, $k_{св} = 1$.

Тогда по аналогии с трансформатором соотношения локальных напряжений и токов различных последовательностей представляют собой собственные параметры повреждённой машины, которые несут в себе информацию не только о факте повреждения синхронного генератора, но и о месте его расположении.

Выводы

Сочетание текущей информации о наблюдаемых токах и напряжениях трансформатора и электрической машины с априорной информацией об их структуре и параметрах, сосредоточенных в их моделях, обнаруживают закономерности, способствующие идентификации повреждения. Локальный режим, будучи составной частью наблюдаемого процесса, открывает возможность для построения алгоритмов распознавания повреждений, возникающих в наблюдаемом объекте.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Шнеерсон Э. М. Цифровая релейная защита / Э. М. Шнеерсон. – М.: Энергоатомиздат, 2007.

2. Фадке А. Г. Компьютерная релейная защита в энергосистемах / А. Г. Фадке, Д. С. Торп, пер. с англ. – М.: Техносфера, 2019.

3. Атнишкин А. Б. Модификации алгоритма дифференциальной защиты / А. Б. Атнишкин, Ю. Я. Лямец // Электрические станции. – 2019. – № 7. – С. 44-49.

4. Атнишкин А. Б. Адаптивные модификации алгоритма дифференциальной защиты трансформатора: автореф. дис. на соиск.

учен. степ. канд. техн. наук. (05.14.02) / Атнишкин Александр Борисович; Чувашский ун-т. – Чебоксары, 2019. – 24 с.

5. *Широкин М. Ю.* Совершенствование микропроцессорных защит трансформаторов на основе опыта эксплуатации: автореф. дис. на соиск. учен. степ. канд. техн. наук. (05.14.02) / Широкин Максим Юрьевич; Чувашский ун-т. – Чебоксары, 2022. – 24 с.

6. *Белянин А. А.* Метод локализации для распознавания внутренних повреждений силового трансформатора, происходящих на фоне внешних / А. А. Белянин, А. Н. Маслов, И. В. Смирнова, М. Ю. Широкин // Вестник Чувашского ун-та. – 2019. – № 3. – С. 22-28.

7. *Кочетов И. Д.* Распознавание витковых замыканий в обмотке трансформатора по локальным составляющим наблюдаемых напряжений и токов / И. Д. Кочетов, Ю. Я. Лямец // Изв. РАН. Энергетика. – 2022. – № 1. – С. 57-65.

Авторы:

Кочетов Иван Дмитриевич, инженер-исследователь, ООО «Релематика», аспирант, ЧГУ им. И.Н. Ульянова. E-mail: kochetov_id@relematika.ru.

Лямец Юрий Яковлевич, д.т.н., профессор кафедры ТОЭ и РЗА ЧГУ, председатель НТС ООО «Релематика». Окончил в 1962 г. энергетический факультет Новочеркасского политехнического института. В 1994 г. защитил во ВНИИЭ докторскую диссертацию на тему «Адаптивные реле: теория и приложение к задачам релейной защиты и автоматики электрических систем», E-mail: yu.ya.liamets@gmail.com