

МЕТОДИКА ПРИМЕНЕНИЯ П-ОБРАЗНЫХ СХЕМ ЗАМЕЩЕНИЯ ТРАНСФОРМАТОРОВ В РАСЧЕТАХ ТОКОВ КОРОТКОГО ЗАМЫКАНИЯ НА ЭВМ

*К.Е. Горшков, Ю.В. Коровин, Е.И. Пахомов
г. Челябинск, ЮУрГУ*

Рассмотрено применение П-образных схем замещения трансформаторов, показаны достоинства и недостатки. Описана методика их использования в программе расчета симметричных и несимметричных коротких замыканий на ЭВМ.

Согласно руководящим указаниям по расчету токов короткого замыкания (КЗ) погрешность в расчетах не должна превышать 5–10 % [1]. Данная погрешность обусловлена целым рядом допущений: упрощенный расчет по шкале средних номинальных напряжений сетей, учет только реактивных сопротивлений элементов и т.д. Допущения ориентированы на расчеты, проводимые вручную, и введены в целях экономии времени и средств.

Расчет токов короткого замыкания необходим для выбора и проверки электрооборудования и уставок РЗА по условиям КЗ. Если при выборе электрооборудования наличие погрешности в определенной мере нивелируется завышением результатов расчетов в условиях дискретности шкалы номиналов оборудования, то вопрос снижения погрешности в расчетах для РЗА является актуальным, так как точность настройки, в первую очередь цифровых устройств, напрямую зависит от точности расчета токов КЗ.

Применение ЭВМ позволяет не только уменьшить затраты времени, но параллельно с этим повысить точность расчетов, исключив ряд допущений.

Одним из основных допущений является расчет по шкале средних номинальных напряжений сетей. Отказаться от данного допущения можно, применив П-образные схемы замещения трансформаторов [2]. Ниже описан алгоритм применения П-образных схем замещения трансформаторов в разрабатываемой программе по расчету токов короткого замыкания в электроэнергетических системах.

П-образные схемы замещения трансформаторов прямой и обратной последовательности. Как известно, П-образная схема замещения трансформатора сохраняет трансформаторные связи и при соединении обмоток по схеме Y/Y позволяет получить натуральные (действительные величины в именованных единицах) токи и напряжения на обеих сторонах трансформатора [2]. В основе П-образной схемы замещения лежит резо-

нансный треугольник (сумма его сопротивлений равна нулю), поэтому расчет должен проводиться на ЭВМ для достижения требуемой точности.

Достоинства П-образных схем замещения:

- расчет схем в именованных единицах;
- при учете регулирования напряжений обмоток трансформатора необходимо пересчитать только сопротивления П-образной схемы замещения;
- расчет схем с параллельно работающими трансформаторами с разными коэффициентами трансформации.

Недостатки П-образных схем замещения:

- не учитывается ветвь намагничивания трансформатора (принимается $X_{\mu 1} = \infty$);
- схемы замещения справедливы для трансформаторов со схемами соединения обмоток $Y(Y0)/Y(Y0)$, D/D и $Y(Y0)/Y(Y0)/Y(Y0)$, $D/D/D$.

На рис. 1 показаны П-образные схемы замещения трансформаторов, используемые в программе при формировании схемы замещения сети прямой и обратной последовательности. В отличие от предложенных в работе [2] изображенные схемы оптимизированы для применения в матричных расчетах на ЭВМ. Так, схема замещения двухобмоточного трансформатора не содержит собственных узлов, а трехобмоточного трансформатора имеет только один собственный узел. При этом сокращение количества узлов позволяет сохранить быстродействие в программах, использующих прямые методы матричного расчета.

Ниже приведен алгоритм составления схемы замещения сети с использованием П-образных схем.

1. В ходе формирования схемы замещения прямой или обратной последовательности трансформаторы следует представить схемами рис. 1. Для автотрансформатора и автотрансформаторной группы в данном случае может быть использована схема замещения трехобмоточного трансформатора.

При выборе направлений ветвей графа топологии схемы замещения следует указывать направления токов ветвей (рис. 1).

2. Расчет сопротивлений должен проводиться в именованных единицах. На рис. 1:

Z_T - сопротивление двухобмоточного трансформатора, приведенное к напряжению высшей стороны;

Z_B, Z_C, Z_H - сопротивления обмоток ВН, СН и НН, приведенные каждое к своему напряжению.

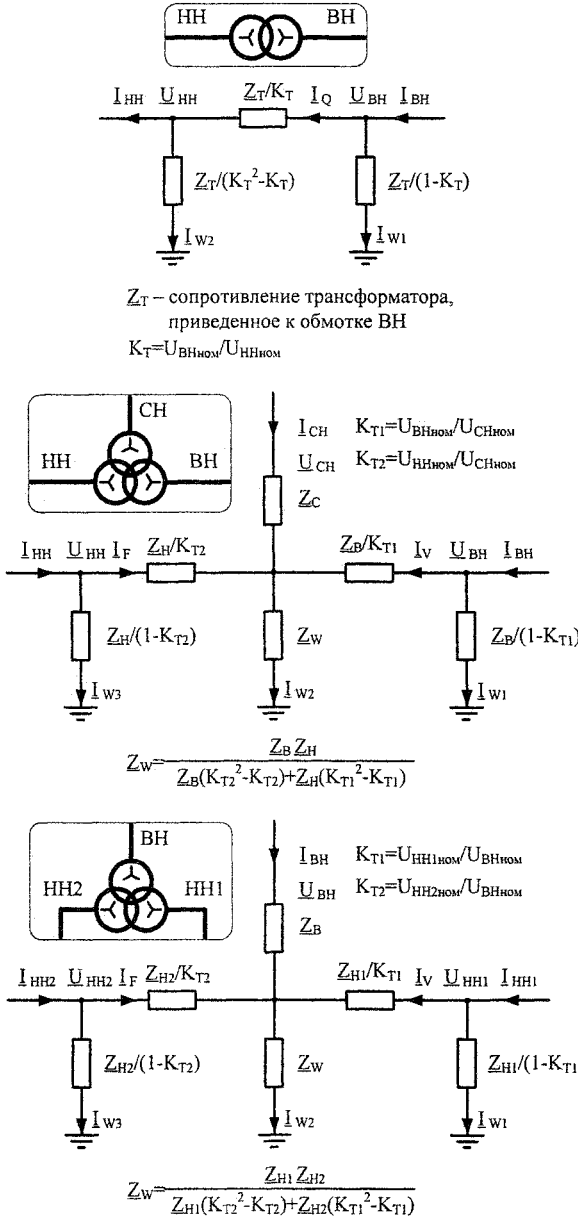


Рис. 1. П-образные схемы замещения трансформаторов прямой и обратной последовательности

Если учитывается регулирование напряжения, то следует предварительно пересчитать коэффициенты трансформации и сопротивления обмоток трансформатора с учетом отпайки РПН.

3. Расчет натуральных токов в обмотках трансформаторов проводится после расчета токов ветвей схемы замещения.

Двухобмоточный трансформатор:

$I_{ВН} = I_Q + I_{W1}, I_{НН} = I_Q - I_{W2}.$ (1)

Трехобмоточный трансформатор:

$I_{ВН} = I_V + I_{W1}, I_{НН} = I_F + I_{W3}.$ (2)

Трансформатор с расщепленной обмоткой низшего напряжения:

$I_{НН1} = I_V + I_{W1}, I_{НН2} = I_F + I_{W3}.$ (3)

П-образная схема замещения трансформатора не позволяет получить реальные значения фаз токов и напряжений, если одна обмотка трансформатора соединена в звезду, а другая в треугольник (невозможность получения схемы замещения в виде электрического контура для трансформатора со схемой соединения обмоток Y(Y0)/D показана в [3]). В этом случае можно применить следующий алгоритм упрощенного учета фазоповорота трансформаторов.

1. Для всех трансформаторов принимаются схемы замещения по рис. 1 независимо от схемы соединения обмоток.

2. На этапе формирования матрицы узловых токов проводится корректировка начальных фаз источников:

- если источник отделен от точки КЗ трансформатором Y/D и расположен со стороны Y, то к его начальной фазе следует добавить +30 эл. град;
- если источник отделен от точки КЗ трансформатором Y/D и расположен со стороны D, то к его начальной фазе следует добавить -30 эл. град;
- в остальных случаях добавка 0 эл. град.

Для источника, расположенного за N каскадами трансформаторов следует вычислять добавку к начальной фазе суммированием значений, двигаясь от точки КЗ к источнику.

3. Значения фаз токов и напряжений прямой и обратной последовательности, полученные в ходе расчета для участка сети той ступени трансформации, где произошло КЗ, будут соответствовать натуральным, для остальных участков – отличаться соответственно на ±30 эл. град.

Следует отметить, что при использовании данного алгоритма напряжения одной ступени на выводах трансформаторов генерирующих источников должны быть синфазные.

П-образные схемы замещения трансформаторов нулевой последовательности. Конфигурация схемы замещения сети нулевой последовательности зависит от схем соединения обмоток трансформаторов. Схему замещения сети нулевой последовательности можно получить из схемы замещения прямой последовательности, внося коррективы в П-образные схемы замещения трансформаторов. Данный подход также позволит сократить длительность расчета и сэкономить ресурсы ЭВМ за счет упрощения алгоритмов.

В табл. 1 приведены унифицированные схемы замещения двухобмоточного трансформатора нулевой последовательности, полученные из П-образной схемы замещения прямой последовательности (рис. 1).

Формирование схемы замещения сети осуществляется в два этапа.

1. Копируется матрица соединений графа схемы замещения прямой последовательности. Затем для трансформаторов со схемами соединения обмоток Y0/Y(D) и Y(D)/Y0 вносится изменение для ветви Z_Q согласно стрелкам на схемах табл. 1:

- для трансформаторов Y0/Y(D) продольная ветвь Z_Q преобразуется в поперечную смещением из узла $\underline{U}_{НН}$ в нулевой узел схемы;
- для трансформаторов Y(D)/Y0 продольная ветвь Z_Q преобразуется в поперечную смещением из узла $\underline{U}_{ВН}$ в нулевой узел схемы.

2. Формируется матрица сопротивлений ветвей схемы замещения нулевой последовательности. При этом применяется алгоритм для схемы замещения прямой последовательности, но с использованием формул из табл. 1.

Расчет натуральных токов нулевой последовательности обмоток трансформаторов осуществляется по выражениям (1), (2) и (3).

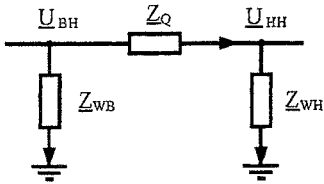
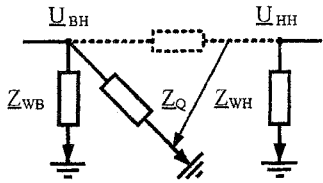
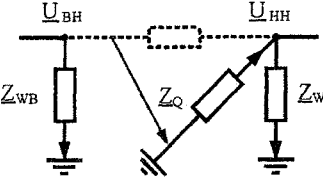
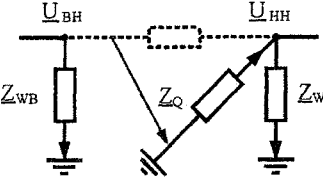
Особенности представленных схем:

- схемы справедливы для КЗ как на стороне ВН, так и НН, что позволяет не рассматривать положение точки КЗ при анализе обмоток;
- расчет натуральных токов аналогичен схемам прямой последовательности, что позволяет использовать один алгоритм расчета натуральных токов для всех последовательностей;
- схемы унифицированы со схемами замещения прямой последовательности, что упрощает формирование схемы замещения сети и позволяет использовать одни и те же алгоритмы.

Для трехобмоточного трансформатора схемы

Таблица 1

Схемы замещения двухобмоточного трансформатора нулевой последовательности

Схема замещения нулевой последовательности	Схема соединения обмоток	Расчет сопротивлений
	Y/Y	$Z_Q = \infty, Z_{WB} = \infty, Z_{WH} = \infty$
	Y/D	
	D/Y	
	D/D	
	Y0/Y0	$Z_Q = \frac{Z_T + (Z_{NB} + Z_{NH} K_T^2)}{K_T},$ $Z_{WB} = \frac{Z_T + (Z_{NB} + Z_{NH} K_T^2)}{1 - K_T},$ $Z_{WH} = \frac{Z_T + (Z_{NB} + Z_{NH} K_T^2)}{K_T^2 - K_T}$
	Y0/Y	$Z_Q = \infty, Z_{WB} = \infty, Z_{WH} = \infty$
	Y0/D	$Z_Q = \frac{Z_{NB} + Z_T}{K_T},$ $Z_{WB} = \frac{Z_{NB} + Z_T}{1 - K_T},$ $Z_{WH} = \infty$
	Y/Y0	$Z_Q = \infty, Z_{WB} = \infty, Z_{WH} = \infty$
	D/Y0	$Z_Q = \frac{Z_{NH} K_T^2 + Z_T}{K_T},$ $Z_{WB} = \infty,$ $Z_{WH} = \frac{Z_{NH} K_T^2 + Z_T}{K_T^2 - K_T}$

- Примечания:
1. Z_T – сопротивление трансформатора, приведенное к обмотке ВН.
 2. $K_T = U_{ВНном} / U_{ННном}$.
 3. Z_{NB} – сопротивление в нейтрали обмотки ВН.
 4. Z_{NH} – сопротивление в нейтрали обмотки НН.
 5. Принимается $X_{\mu 0} = \infty$.

замещения нулевой последовательности представлены в табл. 2. Если трансформатор имеет схему соединения обмоток, не указанную в таблице, то схему замещения можно получить самостоятельно преобразованием продольных ветвей в поперечные.

Если в нейтрали автотрансформатора установлено сопротивление, то в этом случае следует использовать схему, учитывающую электрическую связь между обмотками ВН и СН [4]. На рис. 2 показана схема замещения нулевой последовательности для автотрансформатора со схемой соединения обмоток Y0/Y0/D и сопротивлением в нейтрали Z_{NBC} .

Таблица 2

Схемы замещения трехобмоточного трансформатора нулевой последовательности

Схема замещения нулевой последовательности	Схема соединения обмоток	Расчет сопротивлений
	Y/Y/Y	$Z_V=Z_E=Z_F=\infty, Z_{W1}=Z_{W2}=Z_{W3}=\infty$
	Y0/Y0/Y0	$Z_V=\frac{Z_{NB}+Z_B}{K_{T1}}, Z_E=Z_{NC}+Z_C, Z_F=\frac{Z_{NH}+Z_H}{K_{T2}},$ $Z_{W1}=\frac{Z_{NB}+Z_B}{1-K_{T1}}, Z_{W3}=\frac{Z_{NH}+Z_H}{1-K_{T2}},$ $Z_{W2}=\frac{(Z_{NB}+Z_B)(Z_{NH}+Z_H)}{(Z_{NB}+Z_B)(K_{T2}^2-K_{T2})+(Z_{NH}+Z_H)(K_{T1}^2-K_{T1})}$
	Y/Y0/Y0	$Z_{W2}=\frac{Z_{NH}+Z_H}{K_{T2}^2-K_{T2}}$
	Y0/Y0/Y	$Z_{W2}=\frac{Z_{NB}+Z_B}{K_{T1}^2-K_{T1}}$
	D/D/D	$Z_V=\frac{Z_B}{K_{T1}}, Z_E=Z_C, Z_F=\frac{Z_H}{K_{T2}},$ $Z_{W1}=Z_{W3}=\infty,$ $Z_{W2}=\frac{Z_B Z_H}{Z_B(K_{T2}^2-K_{T2})+Z_H(K_{T1}^2-K_{T1})}$

Примечания: 1. $K_{T1}=U_{BHном}/U_{CHном}, K_{T2}=U_{HHном}/U_{CHном}$.
2. Z_{NB} – сопротивление в нейтрали обмотки ВН.
3. Z_{NC} – сопротивление в нейтрали обмотки СН.
4. Z_{NH} – сопротивление в нейтрали обмотки НН.
5. Принимается $X_{\mu 0}=\infty$.

Например, схема замещения трехобмоточного трансформатора Y0/Y0/D получается из первой схемы табл. 2 путем смещения ветви Z_F из узла U_{HH} в нулевой узел схемы, а сопротивления ветвей Z_F, Z_{W2}, Z_{W3} подлежат пересчету:

$$Z_F = Z_H / K_{T2}, Z_{W3} = \infty,$$
$$Z_{W2} = \frac{(Z_{NB} + Z_B)Z_H}{(Z_{NB} + Z_B)(K_{T2}^2 - K_{T2}) + Z_H(K_{T1}^2 - K_{T1})}.$$

Для трансформатора с расщепленной обмоткой низшего напряжения схемы получаются по аналогии с трехобмоточным трансформатором.

Для автотрансформатора и автотрансформаторной группы с глухим заземлением нейтрали со стороны обмоток ВН и СН используются схемы замещения нулевой последовательности трехобмоточного трансформатора (табл. 2).

довательности для автотрансформатора со схемой соединения обмоток Y0/Y0/D и сопротивлением в нейтрали Z_{NBC} .

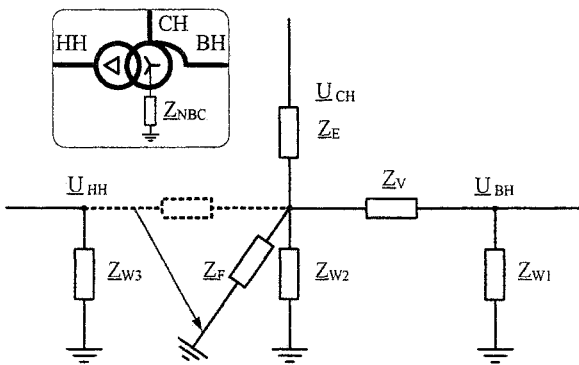


Рис. 2. Схема замещения автотрансформатора Y0/Y0/D нулевой последовательности

В схеме сопротивления определяются следующим образом:

$$Z_V = Z_B + K_{TB-H} \cdot (K_{TB-H} - K_{TC-H}) \cdot Z_H,$$

$$Z_E = Z_C + K_{TC-H} \cdot (K_{TC-H} - K_{TB-H}) \cdot Z_H,$$

$$Z_F = Z_{NBC} + K_{TB-H} \cdot K_{TC-H} \cdot Z_H,$$

$$Z_{W1} = Z_{W2} = Z_{W3} = \infty,$$

$$K_{TB-H} = U_{ВНном} / U_{ННном},$$

$$K_{TC-H} = U_{СНном} / U_{ННном}.$$

Подводя итоги вышесказанному можно сделать следующие **выводы**.

1. Разработан алгоритм применения П-образных схем замещения трансформаторов прямой обратной и нулевой последовательности, позволяющий применять прямые матричные методы расчета схем с реальными коэффициентами трансформации.

2. Получены П-образные схемы замещения прямой и обратной последовательности, оптимизированные для матричного расчета на ЭВМ, а также П-образные схемы нулевой последователь-

ности, позволяющие упростить алгоритмы программы.

3. Предложен алгоритм упрощенного учета фазоповорота трансформаторов при использовании П-образных схем замещения.

Литература

1. Руководящие указания по расчету токов короткого замыкания и выбору электрооборудования/ под ред. Б.Н. Неклепаева. – М.: Изд-во НЦ ЭНАС. 2002. – 152 с.
2. Руководящие указания по релейной защите. Вып. 11. Расчеты токов короткого замыкания для релейной защиты и системной автоматики в сетях 110–750 кВ. – М.: Энергия, 1979. – 152 с.
3. Бернас, С. Математические модели элементов электроэнергетических систем / С. Бернас, З. Цёк // Пер. с польск. – М.: Энергоиздат, 1982. – 312 с.
4. Ульянов, С.А. Электромагнитные переходные процессы в электрических системах / С.А Ульянов. – М.–Л.: Изд-во «Энергия», 1964. – 704 с.

Горшков Константин Евгеньевич, выпускник кафедры электрических станций, сетей и систем ЮУрГУ, специальность «Релейная защита и автоматизация электроэнергетических систем».

Коровин Юрий Витальевич, доцент кафедры электрических станций, сетей и систем ЮУрГУ, канд. техн. наук, доцент. Окончил в 1982 г. ЧПИ по специальности «Электрические станции». Область научных исследований связана с переходными процессами в электроустановках и преобразовательной техникой.

Пахомов Евгений Игоревич, старший преподаватель кафедры электрических станций, сетей и систем ЮУрГУ. В 2002 году окончил ЮУрГУ по специальности «Электрические системы и сети». Направление научной деятельности – переходные процессы в электроэнергетических системах, силовая электроника, математическое моделирование.