

Документ подписан простой электронной подписью

Информация о владельце:

ФИО: Шебзухов Татьяна Александровна

Должность: Директор Пятигорского института (филиал) Северо-Кавказского
федерального университета

Дата подписания: 12.09.2023 17:27:58

Уникальный программный ключ:
d74ce93cd40e39275c3ba2f58486412a1c8ef96f

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ АВТОНОМНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ
УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«СЕВЕРО-КАВКАЗСКИЙ ФЕДЕРАЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»

Пятигорский институт (филиал) СКФУ

Методические указания

по выполнению практических работ

по дисциплине «Переходные процессы в электроэнергетических системах»

для студентов направления подготовки 13.03.02 Электроэнергетика и электротехника

Передача и распределение электрической энергии в системах электроснабжения

(ЭЛЕКТРОННЫЙ ДОКУМЕНТ)

Содержание

1. Общие сведения по выполнению практических работ

Практическое занятие №1. Структура электроэнергетики. Основные термины и понятия.

Практическое занятие №2. Баланс электрической энергии

Практическое занятие №3. Математическое описание электромеханических переходных процессов в электроэнергетических системах для исследования устойчивости

Практическое занятие №4. Устойчивость режимов систем при малых возмущениях

Практическое занятие №5. Расчетные сопротивления реакторов

Практическое занятие №6. Нагрев проводов током КЗ

Практическое занятие №7. Расчет тока КЗ

Практическое занятие №8. Расчет тока ударного КЗ

Практическое занятие №9. Расчет трехфазного тока КЗ

Общие сведения по выполнению практических работ по переходные процессы в электроэнергетических системах

Целью работы является углубление и закрепление приобретенных теоретических знаний путем экспериментальной проверки теоретических положений.

В результате выполнения практических работ студенты должны приобрести умения и навыки по сборке и исследованию электрических и магнитных цепей, измерениям электрических величин, испытаниям трансформаторов и электрических машин. Тематика практических работ полностью соответствует содержанию основных разделов курса, изучаемого в высших технических учебных заведениях.

Основные правила выполнения практических работ

Учебная группа (или подгруппа) разбивается на бригады, число которых указывается преподавателем, а состав бригад комплектуется студентами на добровольных началах. Список группы (подгруппы), разбитой на бригады, староста предоставляет преподавателю, ведущему практические занятия.

Перед каждым занятием студент обязан подготовиться к выполнению практической работы по данному методическому пособию и рекомендуемой литературе. Перед началом работы преподаватель проверяет знания студентов по содержанию выполняемой работы.

Практическая работа №1

Математическое описание электромеханических переходных процессов в электроэнергетических системах для исследования устойчивости.

Знать: физику переходных процессов в электроэнергетических системах и их основных элементах;

Уметь: анализировать результаты расчета переходных процессов для применения в реальных электроэнергетических системах и системах электроснабжения.

Владеть: навыками расчета типовые переходные процессы

Актуальность темы:

Заключается в необходимости приобретения навыков по расчету переходных процессов

Привести к генераторному напряжению сопротивление Z в схеме на рис. 4а.

Коэффициенты трансформации трансформаторов:

$$U_1/U_2 = 10,5/38,5; U_3/U_4 = 35/6,6; U_5/U_4 = 6/0,4.$$

Решение

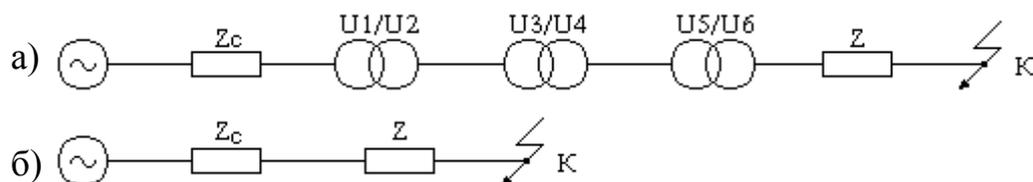
1. Приближенное приведение по уравнению (12):

$$Z_1 = Z (U_1/U_6)^2 = Z (10,5/0,4)^2 = 689 Z.$$

2. Точное приведение по уравнению (11):

$$Z_1 = Z ((U_5 U_3 U_1)/(U_6 U_4 U_2))^2 = ((6 \cdot 35 \cdot 10,5)/(0,4 \cdot 6,6 \cdot 38,5))^2 = 470,6 Z.$$

Ошибка при расчете тока КЗ за сопротивлением Z , определенным по уравнению (12), будет очень велика.



Схемы приведения к расчетному напряжению при нескольких трансформаторах: а – исходная; б – расчетная

В схеме на рис. 4 ток КЗ за сопротивлением Z определен при расчетном напряжении $U_1 = 11$ кВ. Определить действительные токи при напряжении $U_2 = U_3$; $U_4 = U_5$, U_6 . Коэффициенты трансформации указаны в примере 1; сопротивления генератора и линий не учитывать ($Z_c = 0$). Величина $Z = 470,6$ Ом.

Решение

Ток КЗ $I_k^{(3)} = U/(\sqrt{3} \cdot Z) = 11000/(\sqrt{3} \cdot 470,6) = 13,51$ А при генераторном напряжении 11 кВ. Приведенный ток КЗ равен:

– на стороне $U_2 = U_3$ $I_2 = 13,51 \cdot 10,5/38,5 = 3,685$ А;

– на стороне $U_4 = U_5$ $I_4 = 3,685 \cdot 35/6,6 = 19,54$ А;

– на стороне U_6 $I_6 = 19,54 \cdot 6/0,4 = 293,1$ А.

Если пользоваться средними номинальными напряжениями, то ток КЗ будет равен:

– на генераторном напряжении $10500/\sqrt{3} \cdot 689 = 8,81$ А;

– на стороне 0,4 кВ $8,81 \cdot 10,5/0,4 = 231,23$ А.

Контрольные вопросы:

1. Каким образом связаны расчетные активная и реактивная мощности?

2. В каком случае необходимо провести корректировку расчетной активной мощности?

Перечень основной литературы:

1. Пилипенко, В.Т. Электромагнитные переходные процессы в электроэнергетических системах: учебно-методическое пособие/ В.Т. Пилипенко; Оренбургский гос. ун-т. – Оренбург: ОГУ, 2014. – 124 с. Режим доступа: http://biblioclub.ru/index.php?page=book_view_red&book_id=330565

Перечень дополнительной литературы:

1. Кувшинов А.А. Теория электропривода. Часть 3: Переходные процессы в электроприводе: учебное пособие/ А.А. Кувшинов, Э.Л. Греков;

Практическая работа №2

Устойчивость режимов систем при малых возмущениях.

Знать: физику переходных процессов в электроэнергетических системах и их основных элементах;

Уметь: анализировать результаты расчета переходных процессов для применения в реальных электроэнергетических системах и системах электроснабжения.

Владеть: навыками расчета типовые переходные процессы

Актуальность темы:

Заключается в необходимости приобретения навыков по расчету переходных процессов

От шин подстанции с вторичным напряжением 11 кВ питаются три линии. Первая линия выполнена алюминиевым кабелем $3 \times 50 \text{ мм}^2$, вторая – алюминиевым проводом А50, третья – стальным проводом ПС-50. Длина каждой линии 5 км. Ток КЗ на шинах 11кВ 3000 А. Определить ток КЗ в конце каждой линии.

Решение

Сопротивление ЭЭС, приведенное к шинам 11 кВ, равно:

$$X_c = 11000 / \sqrt{3} \cdot 3000 = 2,12 \text{ Ом.}$$

Сопротивление кабеля 10 кВ по Приложению 7 равно: $R = 0,62 \cdot 5 = 3,1 \text{ Ом}$; $X_k = 0,09 \cdot 5 = 0,45 \text{ Ом}$. Ток КЗ в конце кабельной линии равен:

$$I_k^{(3)} = \frac{110000}{\sqrt{3} \sqrt{(2,12 + 0,45)^2 + 3,1^2}} = 1579 \text{ А.}$$

На рис. а дан чертеж опоры линии 11 кВ, а на рис. б – вспомогательное построение для определения $D_{ср}$. Из рисунка видно, что

$$DB = 250 + 170 + 250 = 670 \text{ мм}; AD = DC = AC/2 = 750 \text{ мм.}$$

Из треугольника ADB

$$AB = \sqrt{AD^2 + DB^2} = \sqrt{750^2 + 670^2} = 1000 \text{ мм,}$$

$$D_{ср} = \sqrt[3]{AB \cdot BC \cdot CA} = \sqrt[3]{1000 \cdot 1000 \cdot 1500} = 1150 \text{ мм}$$

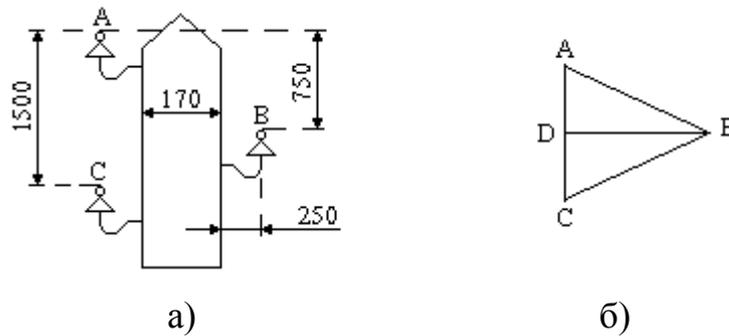
По Приложению 2 $D_p = 9 \text{ мм}$ для провода А-50:

$$X = 0,144 \cdot \lg 2 \cdot 1150/9 + 0,016 = 0,364 \text{ Ом/км,}$$

а сопротивление фазы всей линии

$$X_L = 0,364 \cdot 5 = 1,82 \text{ Ом.}$$

Такой же результат можно получить по Приложению 27.



К расчету индуктивного сопротивления линии

Активное сопротивление провода А50 по Приложению 2 равно $r = 0,576$ Ом/км, сопротивление одной фазы линии $г_l = 0,576 \cdot 5 = 2,88$ Ом. Ток трехфазного КЗ в конце линии

$$I_k^{(3)} = \frac{110000}{\sqrt{3} \sqrt{(2,12 + 1,82)^2 + 2,88^2}} = 1302,9 \text{ А.}$$

Если КЗ сопровождается дугой длиной 1200 мм (примерно среднее расстояние между проводами, что справедливо для первого момента КЗ), то

$$r_d = \frac{1000 \cdot 1,2}{1310} = 0,92 \text{ Ом,}$$

$$\text{и ток } I_k^{(3)} = \frac{110000}{\sqrt{3} \sqrt{(2,12 + 1,82)^2 + (2,88 + 0,92)^2}} = 1160 \text{ А}$$

или 0,891 тока, определенного без учета дуги.

Такое незначительное уменьшение тока объясняется тем, что сопротивление дуги мало по сравнению с активным сопротивлением линии. Для стального провода $D_p = 9,2$ мм и внешнее индуктивное сопротивление по уравнению (15):

$$X_{внеш} = 0,144 \cdot \lg 2 \cdot 1150 / 9,2 = 0,347 \text{ Ом/км.}$$

Значение внутреннего индуктивного сопротивления не рассчитывается, так как зависит от тока и определяется по Приложению 25.

Задаемся предполагаемым током трехфазного КЗ 400 А; $X_{внут} = 0,3$ Ом/км. Активное сопротивление по Приложению 24 равно 2,75 Ом/км. Ток КЗ в конце линии будет:

$$I_k^{(3)} = \frac{110000}{\sqrt{3} \sqrt{[2,12 + (0,347 + 0,3) \cdot 5]^2 + (2,75 \cdot 5 + 2 \cdot 8)^2}} = 364 \text{ А.}$$

Полученный ток 364 А незначительно отличается от принятого предварительно тока 400 А. Пересчет в данном случае не требуется, так как ход кривых в Приложении 24 показывает, что при токе 364 А сопротивления $X_{внут}$ и R практически такие же, как и при токе 400 А.

Сопrotивление дуги при токе 364 А:

$$R_d = 1000 \cdot 1,2/364 = 3,296 \text{ Ом.}$$

Ток КЗ с учетом сопротивления дуги:

$$I_k^{(3)} = \frac{11000}{\sqrt{3} \sqrt{[2,12 + (0,347 + 0,3) \cdot 5]^2 + (2,75 \cdot 5 + 3,296)^2}} = 355,87 \text{ А,}$$

или 0,97 тока, определенного без учета дуги в месте повреждения.

Если дуга возникает на первой опоре от подстанции, то ее сопротивление будет:

$$r_d = 1000 \cdot 1,2/3000 = 0,4 \text{ Ом,}$$

и ток КЗ с учетом дуги равен $I_k^{(3)} = \frac{11000}{\sqrt{3} \sqrt{(2,12^2 + 0,4^2)}} = 2947 \text{ А,}$

или 0,982 тока, определенного без учета дуги.

Если дуга возникает на шинах КРУ, то при ее длине около 0,3 м сопротивление дуги будет:

$$r_d = 1000 \cdot 0,3/3000 = 0,1 \text{ Ом,}$$

и ток КЗ практически не изменится:

$$I_k^{(3)} = \frac{11000}{\sqrt{3} \sqrt{(2,12^2 + 0,1^2)}} = 2966,4 \text{ А.}$$

Для сравнения результатов выполним вычисления по уравнению (2) вместо (7).

Кабельная линия:

$$Z_{p.c} = \sqrt{3,1^2 + 0,45^2} = 3,132 \text{ Ом;}$$
$$I_k^{(3)} = 11000/\sqrt{3} (2,12 + 3,132) = 1210 \text{ А.}$$

Линия с стальными проводами:

$$Z_{p.c} = \sqrt{[(0,347 + 0,3) \cdot 5]^2 + (2,75 \cdot 5)^2} = 14,125 \text{ Ом;}$$
$$I_k^{(3)} = \frac{11000}{\sqrt{3} \cdot (2,12^2 + 14,125^2)} = 391,4 \text{ А.}$$

Контрольные вопросы:

1. Каким образом связаны расчетные активная и реактивная мощности?
2. В каком случае необходимо провести корректировку расчетной активной мощности?

Перечень основной литературы:

1. Пилипенко, В.Т. Электромагнитные переходные процессы в электроэнергетических системах: учебно-методическое пособие/ В.Т.

Пилипенко; Оренбургский гос. ун-т. – Оренбург: ОГУ, 2014. – 124 с. Режим доступа: http://biblioclub.ru/index.php?page=book_view_red&book_id=330565

Перечень дополнительной литературы:

1. Кувшинов А.А. Теория электропривода. Часть 3: Переходные процессы в электроприводе: учебное пособие/ А.А. Кувшинов, Э.Л. Греков; Оренбургский гос. ун-т. – Оренбург: ОГУ, 2017. – 114 с. Режим доступа: http://biblioclub.ru/index.php?page=book_view_red&book_id=481766

Практическая работа №3 Расчетные сопротивления реакторов

Определить ток КЗ за реактором и напряжение на шинах в системах Линейный реактор 6 кВ, 8 %, 600 А; сдвоенный реактор 6 кВ, 12 %, 2000 А, $m = 0,5$. Вторичное напряжение питающего трансформатора 6,6 кВ; ток КЗ до реактора 16 кА.

Решение

1. Сопротивление линейного реактора:

$$X_p = 10 \cdot X \cdot U / \sqrt{3} \cdot I = 10 \cdot 8 \cdot 6 / \sqrt{3} \cdot 600 = 0,462 \text{ Ом.}$$

Сопротивление системы до выводов 6,6 кВ питающего трансформатора:

$$X_c = 6600 / \sqrt{3} \cdot 16000 = 0,238 \text{ Ом.}$$

Ток КЗ за линейным реактором:

$$I_k^{(3)} = 6600 / \sqrt{3} \cdot (0,238 + 0,462) = 5450 \text{ А.}$$

2. Сопротивление одной ветви сдвоенного реактора:

$$X_p = 10 \cdot 12 \cdot 6 / 2000 = 0,36 \text{ Ом.}$$

Ток КЗ за реактором:

$$I_k^{(3)} = 6600 / \sqrt{3} \cdot (0,36 + 0,238) = 6379,65 \text{ А.}$$

Необходимо обратить внимание на то, что хотя реакторы имеют номинальное напряжение 6,0 кВ, включены они на вторичное напряжение питающего трансформатора 6,6 кВ и приведения к одному расчетному напряжению в этом случае не требуется.

3. Напряжение на шинах при КЗ за линейным реактором $U_{ш} = \sqrt{3} \cdot I_k^{(3)} X_p = \sqrt{3} \cdot 5450 \cdot 0,442 = 4356 \text{ В}$, или $4356 / 6600 = 0,66$ номинального.

Напряжение на неповрежденной секции шин по рис. 6б равно:

$$\sqrt{3} \cdot 0,36 \cdot 6379,65 = 3971,4 \text{ В, или } 0,602 \text{ номинального.}$$

Следует отметить, что такое напряжение не обеспечивает надежной работы магнитных пускателей: обычно их напряжение отпадания колеблется

в пределах 0,65...0,75 номинального и в данном случае могут иметь место неправильные отключения электродвигателей.

Те же напряжения можно определить и по выражениям (23) и (24):

$$U_{III} = 0,462 \cdot U / (0,462 + 0,238) = 0,66 U_{н};$$

$$U_{III} = 0,36 \cdot U / (0,36 + 0,238) = 0,602 U_{н}.$$

На подстанции выведен из работы трансформатор 2Т и секция шин IV питается от трансформатора через реактор трансформатора 2Т. Требуется определить ток КЗ на секции шин IV.

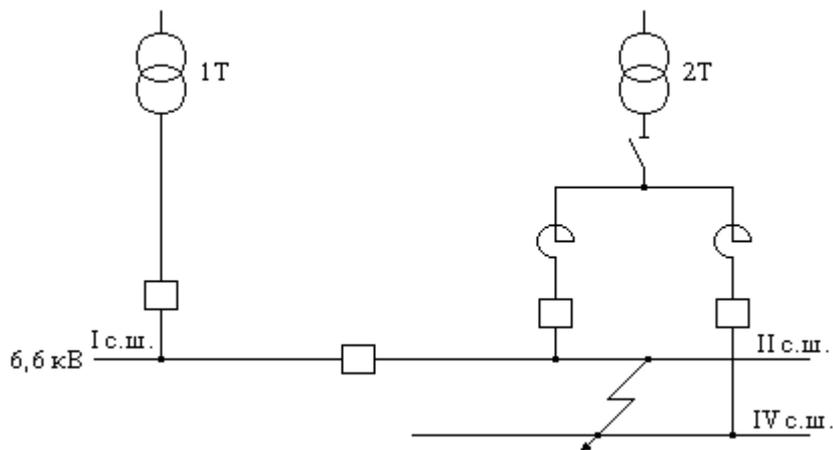


Схема подстанции

Решение

Сопротивление двух последовательно включенных ветвей реактора по выражению (22) равно:

$$X_{bc} = 2 \cdot 0,36 \cdot (1 + 0,5) = 1,08 \text{ Ом (рис. 6),}$$

ток КЗ

$$I_k^{(3)} = 6600 / \sqrt{3} \cdot (1,08 + 0,238) = 2894,56 \text{ А,}$$

$$I_k^{(3)} = \sqrt{3} \cdot 2894,56 / 2 = 2503,8 \text{ А;}$$

напряжение на секции шин I равно:

$$1,08 \cdot U / (1,08 + 0,238) = 0,819U.$$

Контрольные вопросы:

1. Каким образом связаны расчетные активная и реактивная мощности?
2. В каком случае необходимо провести корректировку расчетной активной мощности?

Перечень основной литературы:

1. Пилипенко, В.Т. Электромагнитные переходные процессы в электроэнергетических системах: учебно-методическое пособие/ В.Т. Пилипенко; Оренбургский гос. ун-т. – Оренбург: ОГУ, 2014. – 124 с. Режим доступа: http://biblioclub.ru/index.php?page=book_view_red&book_id=330565

Перечень дополнительной литературы:

1. Кувшинов А.А. Теория электропривода. Часть 3: Переходные процессы в электроприводе: учебное пособие/ А.А. Кувшинов, Э.Л. Греков; Оренбургский гос. ун-т. – Оренбург: ОГУ, 2017. – 114 с. Режим доступа: http://biblioclub.ru/index.php?page=book_view_red&book_id=481766

Практическая работа №4 Нагрев проводов током КЗ

Ток КЗ на шинах питающей подстанции равен 10 кА при напряжении 6,6 кВ. Выполнить расчет спада тока через 1, 2, 3 с для медного кабеля сечением 50 мм², длиной 5 км.

Решение

Определим активное сопротивление кабеля при температуре 65 °С. По Приложению 7 активное сопротивление медного кабеля 50 мм² при температуре +20 °С равно 0,37 Ом/км. При температуре 65 °С сопротивление будет $0,37 \cdot [1 + 0,004 \cdot (65 - 20)] = 0,4366$ Ом/км.

Полное активное сопротивление $r_x = 0,4366 \cdot 5 = 2,185$ Ом.

Сопротивление системы $x_c = 6600 / \sqrt{3} \cdot 10000 = 0,3815$ Ом.

Сопротивление кабеля $x_k = 0,083 \cdot 5 = 0,415$ Ом.

Ток трехфазного КЗ в конце кабеля в первый момент

$$I_o^{(3)} = 6600 / \sqrt{3} \cdot \sqrt{(0,3815 + 0,415)^2 + 2,18} = 6600 / \sqrt{3} \cdot 2,32 = 1644,41 \text{ А}$$

Расчет для времени $t = 1$ с:

$$\Delta = (I^{(3)}/q)^2 \cdot t = (1644,41/50)^2 \cdot 1 = 1081,6 \text{ А}^2 \text{ с/мм}^4,$$

$$a = (2,13/2,32)^2 = 0,884.$$

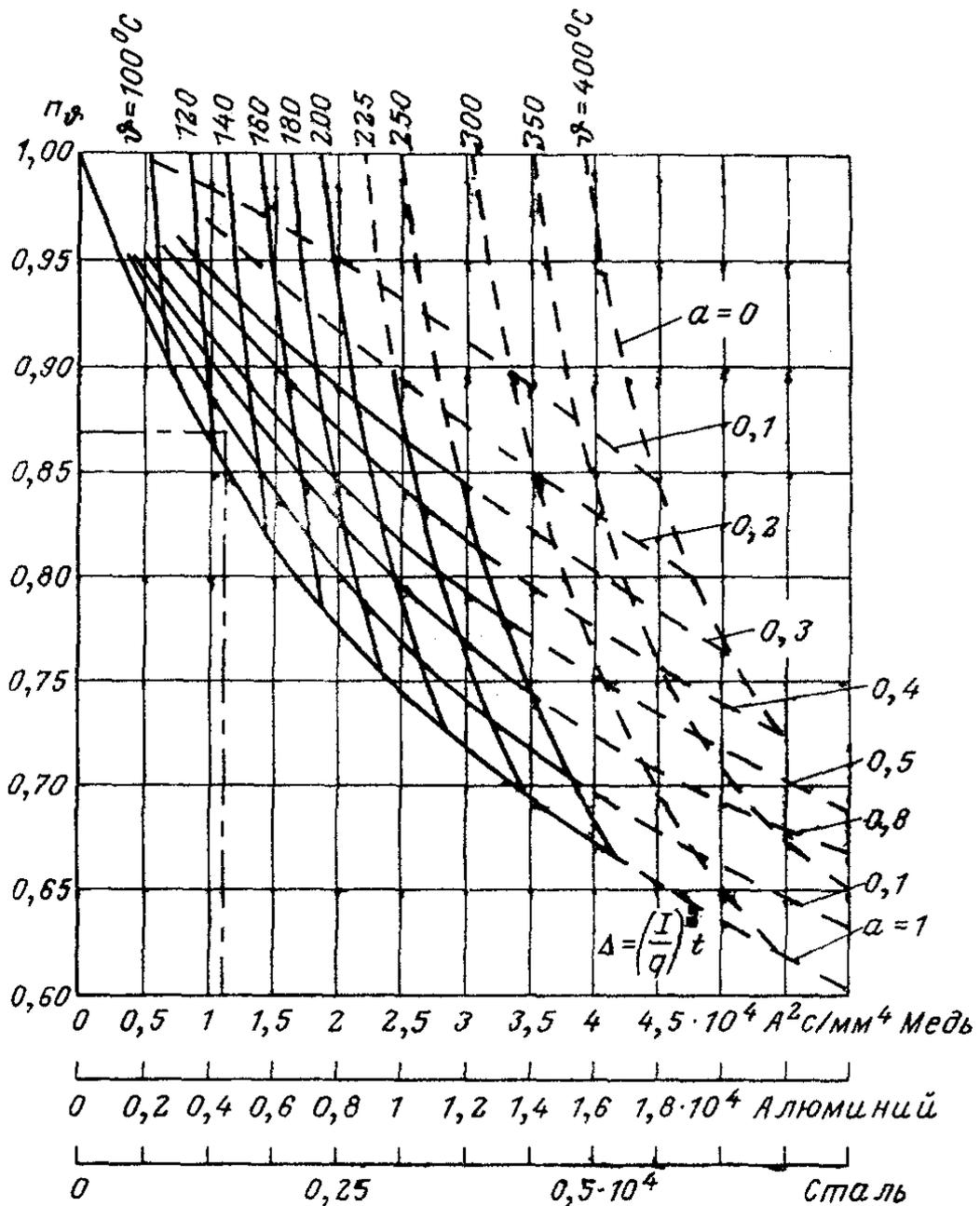


Диаграмма для определения снижения тока КЗ от нагрева проводов

Определить уменьшение тока КЗ из-за нагрева обмоток трансформатора.

Решение

Данные трансформаторов по примеру 5:

$S_{T1} = 25 \text{ кВ} \cdot \text{А}$, $Z = 96 \text{ Ом}$; $X = 152,3 \text{ Ом}$; $Z = 180 \text{ Ом}$;

$S_{T2} = 400 \text{ кВ} \cdot \text{А}$, $Z = 3,44 \text{ Ом}$; $X = 10,71 \text{ Ом}$; $Z = 11,25 \text{ Ом}$.

Активное сопротивление при 250 °С через 1,82 с после начала КЗ будет в 1,7 раза больше, чем при 75 °С. Полные сопротивления будут: для трансформатора 25 кВ·А $Z = \sqrt{152,3^2 + (1,7 \cdot 96)^2} = 223,2 \text{ Ом}$ вместо 180 Ом; для

трансформатора 400 кВ·А $Z = \sqrt{10,71^2 + (1,7 \cdot 3,44)^2} = 12,2$ Ом вместо 11,25 Ом. Максимальное уменьшение тока КЗ при $Z_c = 0$ через 1,82 с составит $180/223,2 = 0,816$ для трансформатора 25 кВ·А и $11,25/12,2 = 0,93$ для трансформатора 400 кВ·А.

Контрольные вопросы:

1. Каким образом связаны расчетные активная и реактивная мощности?
2. В каком случае необходимо провести корректировку расчетной активной мощности?

Перечень основной литературы:

1. Пилипенко, В.Т. Электромагнитные переходные процессы в электроэнергетических системах: учебно-методическое пособие/ В.Т. Пилипенко; Оренбургский гос. ун-т. – Оренбург: ОГУ, 2014. – 124 с. Режим доступа: http://biblioclub.ru/index.php?page=book_view_red&book_id=330565

Перечень дополнительной литературы:

1. Кувшинов А.А. Теория электропривода. Часть 3: Переходные процессы в электроприводе: учебное пособие/ А.А. Кувшинов, Э.Л. Греков; Оренбургский гос. ун-т. – Оренбург: ОГУ, 2017. – 114 с. Режим доступа: http://biblioclub.ru/index.php?page=book_view_red&book_id=481766

Практическое занятие №5.

Определение параметров элементов эквивалентных схем замещения
Параметры эквивалентных схем замещения могут быть определены:

1. В именованных и относительных единицах приведением значений параметров расчетных схем к выбранной основной (базисной) ступени напряжения сети с учетом фактических коэффициентов трансформации силовых трансформаторов и автотрансформаторов.

2. В относительных и именованных единицах значений параметров расчетных схем к выбранным базисным условиям с учетом средних коэффициентов трансформации, равных отношению средних номинальных напряжений сетей соответствующих ступеней напряжений. Рекомендуется использовать шкалу средних номинальных между фазных напряжений сетей в [кВ]: 3,15; 6,3; 10,5; 13,8; 15,75; 18; 20; 24; 37; 115; 154; 230; 340; 515; 750.

В первом случае рассчитывают токи КЗ при наличии данных с фактических коэффициентов трансформация. Наиболее предпочтителен для

практических расчетов (рекомендуется в КР) второй способ приведения. Расчетные выражения для этого способа приведены в табл. 1. При выборе данных условий следует руководствоваться тем, чтобы порядок числовых значений был удобен для оперирования с ними. За базисную мощность (S_6) целесообразно принимать число, кратное десяти. Например, 10, 100, 1000 и т. п. [МВА]. За базисные напряжения (U_6) рекомендуется принимать среднее значение той степени трансформации, где находится точка КЗ.

Базисный ток и сопротивление определяются по выражениям:

$$I_6 = \frac{S_6}{\sqrt{3} \cdot U_6} \quad Z_6 = \frac{U_6}{\sqrt{3} \cdot I_6} = \frac{U_6}{S_6} \quad (1)$$

Контрольные вопросы:

1. Каким образом связаны расчетные активная и реактивная мощности?
2. В каком случае необходимо провести корректировку расчетной активной мощности?

Перечень основной литературы:

1. Пилипенко, В.Т. Электромагнитные переходные процессы в электроэнергетических системах: учебно-методическое пособие/ В.Т. Пилипенко; Оренбургский гос. ун-т. – Оренбург: ОГУ, 2014. – 124 с. Режим доступа: http://biblioclub.ru/index.php?page=book_view_red&book_id=330565

Перечень дополнительной литературы:

1. Кувшинов А.А. Теория электропривода. Часть 3: Переходные процессы в электроприводе: учебное пособие/ А.А. Кувшинов, Э.Л. Греков; Оренбургский гос. ун-т. – Оренбург: ОГУ, 2017. – 114 с. Режим доступа: http://biblioclub.ru/index.php?page=book_view_red&book_id=481766

Практическое занятие №6.

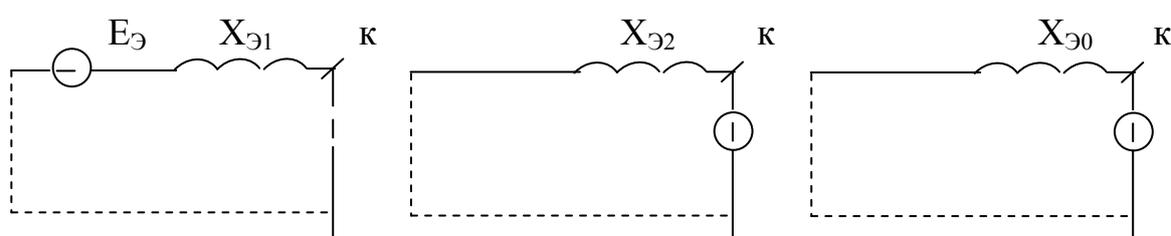
Нагрев проводов током КЗ

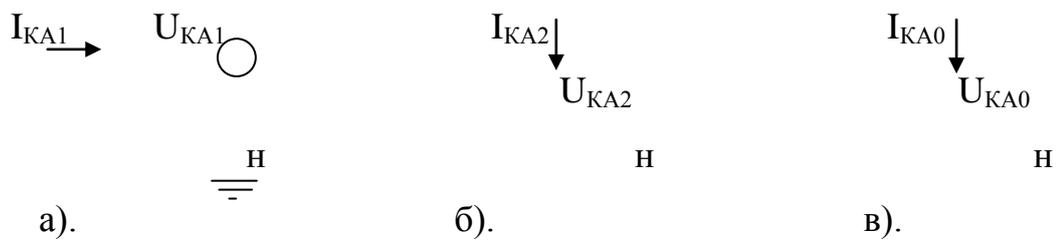
Составление схем замещения для токов прямой, обратной и нулевой последовательностей

Определение параметров их элементов. (В дальнейшем приняты широко распространенные обозначения индексов для параметров прямой, обратной и нулевой последовательностей: 1, 2, 0).

1. Схема замещения прямой последовательности аналогична схеме, которая составляется для расчетов симметричного КЗ. В зависимости от момента времени и метода расчета все элементы, в состав которых входят вращающиеся машины (генераторы, нагрузки двигатели, системы и т.п.), вводятся в схему замещения прямой последовательности соответствующими реактивными ЭДС. Все остальные элементы вводятся в схему неизменными сопротивлениями.

Началом схемы (н) прямой последовательности считается точка, в которой объединены свободные концы всех генерирующих и нагрузочных ветвей. В месте несимметрии (конец схемы - к) действует ЭДС, равная напряжению прямой последовательности. Любую схему прямой последовательности можно привести к простейшей схеме, из которой определяется результирующая ЭДС E_{Σ} и результирующее сопротивление прямой последовательности $X_{\Sigma 1}$.
 Схема замещения обратной последовательности по конфигурации не отличается от схемы прямой последовательности. Началом схемы обратной последовательности является точка, объединяющая начало всех генерирующих и нагрузочных ветвей (ЭДС обратной последовательности равны нулю). В конце схемы (в точке КЗ) приложено напряжение $U_{КА2}$. Параметры элементов схем замещения обратной последовательности для трансформаторов, воздушных линий, кабелей и реакторов те же, что и в схеме прямой последовательности. По сравнению со схемой замещения прямой последовательности изменяются сопротивления обратной последовательности элементов, в состав которых входят вращающиеся машины.





Если для нагрузки сопротивление обратной последовательности не задано, то его можно принимать равным $X_{H(2)}=0,35$ о. е.

Сопротивление обратной последовательности генераторов дается в каталогах в относительных единицах с приведением к номинальным параметрам генератора.

Схема замещения обратной последовательности приводится к виду, изображенному на рис. 1, б. Здесь $X_{\Sigma 2}$ является результирующим сопротивлением обратной последовательности.

3. Вид схемы замещения нулевой последовательности зависит от заземления нейтралей сети высшего напряжения (110 кВ и выше), количества трансформаторов и автотрансформаторов, схем соединения их обмоток. Если нейтраль трансформатора будет незаземлена, то не будет контура для протекания тока нулевой последовательности. При соединении обмотки трансформатора в треугольник ток нулевой последовательности в этой обмотке протекает, но далее пути для него нет.

В схеме замещения нулевой последовательности по сравнению с прямой изменяются сопротивления линий электропередачи. Это обусловлено особенностями циркуляции токов нулевой последовательности.

Составление схемы замещения нулевой последовательности следует начинать от точки КЗ, где приложено напряжение U_{KA0} и являющейся концом схемы замещения. Далее в схему вводятся те элементы, по которым протекают токи нулевой последовательности. Концы этих элементов, имеющих потенциалы земли, т. е. заземленные нейтралей трансформаторов (автотрансформаторов) и обмотки, соединенные треугольником, объединяются в общую точку, получая начало схемы замещения нулевой последовательности. Затем схему свертывают относительно точки КЗ для

определения результирующей величины сопротивления нулевой последовательности $X_{\Sigma 0}$ (рис. 1, в).

Контрольные вопросы:

1. Каким образом связаны расчетные активная и реактивная мощности?
2. В каком случае необходимо провести корректировку расчетной активной мощности?

Перечень основной литературы:

1. Пилипенко, В.Т. Электромагнитные переходные процессы в электроэнергетических системах: учебно-методическое пособие/ В.Т. Пилипенко; Оренбургский гос. ун-т. – Оренбург: ОГУ, 2014. – 124 с. Режим доступа: http://biblioclub.ru/index.php?page=book_view_red&book_id=330565

Перечень дополнительной литературы:

1. Кувшинов А.А. Теория электропривода. Часть 3: Переходные процессы в электроприводе: учебное пособие/ А.А. Кувшинов, Э.Л. Греков; Оренбургский гос. ун-т. – Оренбург: ОГУ, 2017. – 114 с. Режим доступа: http://biblioclub.ru/index.php?page=book_view_red&book_id=481766

Практическое занятие №7.

Расчет тока КЗ

Общий порядок аналитического расчета электрических сетей при КЗ.

После составления схем замещения электрической схемы и определения параметров их элементов возникает необходимость определения токов и напряжений как в месте повреждения, так и в любом заданном месте.

Для этого используются обычные методы, которые изучались в курсах "Теоретические основы электротехники" и "Электрические сети и системы".

1. Приведение схемы замещения к простейшему виду.

Для этого используются методы параллельного и последовательного сложения сопротивлений, преобразования треугольника в звезду и обратно, метод эквивалентных ЭДС.

Иногда в более сложных случаях при преобразовании схемы замещения возникает необходимость применения способа разреза схемы. Преобразование схемы выгодно вести так, чтобы аварийная ветвь по

возможности была сохранена до конца преобразований или участвовала в них только на последних этапах.

2. При ручном расчете иногда бывает удобней использовать принцип наложения. Для этого необходимо определять собственные и взаимные сопротивления схемы замещения.

В КР производятся расчеты начальной стадии переходного процесса при трехфазном и несимметричных (при однократной поперечной несимметрии) КЗ. В задачи этих расчетов входит определение действующего значения периодической слагающей тока КЗ в начальный момент времени ($I_{п0}$) - начального сверхпереходного тока (I''), а также ударного тока (i_y, I_y).

При выполнении расчетов используются все те допущения, которых были изложены ранее. Кроме них, в практических расчетах по определению начального сверхпереходного тока допускается равенство продольных и поперечных сверхпереходных реактивностей синхронных машин ($x''_d = x''_q$), вне зависимости от их типов, что значительно упрощает расчеты.

При расчетах несимметричных КЗ предполагается, что периодическая слагающая тока состоит только из основной гармоники, т.е. пренебрегают высшими гармониками.

При расчете $I_{п0}$ должны быть учтены все синхронные генераторы и компенсаторы, а также синхронные асинхронные двигатели мощностью 100 кВт и более если они не отделены от точки КЗ токоограничивающими реакторами или силовыми трансформаторами. В автономных системах следует учитывать и электродвигатели мощностью менее 100 кВт, если их доля в суммарном КЗ составляет не менее 5 %.

Контрольные вопросы:

1. Каким образом связаны расчетные активная и реактивная мощности?
2. В каком случае необходимо провести корректировку расчетной активной мощности?

Перечень основной литературы:

1. Пилипенко, В.Т. Электромагнитные переходные процессы в электроэнергетических системах: учебно-методическое пособие/ В.Т.

Пилипенко; Оренбургский гос. ун-т. – Оренбург: ОГУ, 2014. – 124 с. Режим доступа: http://biblioclub.ru/index.php?page=book_view_red&book_id=330565

Перечень дополнительной литературы:

1. Кувшинов А.А. Теория электропривода. Часть 3: Переходные процессы в электроприводе: учебное пособие/ А.А. Кувшинов, Э.Л. Греков; Оренбургский гос. ун-т. – Оренбург: ОГУ, 2017. – 114 с. Режим доступа: http://biblioclub.ru/index.php?page=book_view_red&book_id=481766

Практическое занятие №8. Расчет тока ударного КЗ

Расчетные параметры схемы замещения прямой последовательности

Синхронные и асинхронные машины в схему замещения прямой последовательности должны быть введены сверхпереходными сопротивлениями (x''_d) и сверхпереходными ЭДС численно равными, значениям этих ЭДС в момент, предшествующий КЗ (E''). При отсутствии данных по E'' значения ЭДС для различных элементов сети могут быть определены соответствии с табл. 1.

Нагрузка в схеме замещения учитывается приближенно, как источник со сверхпереходным сопротивлением $x''_H=0,35$ и ЭДС $E''_H=0.85$ (если не заданы другие величины).

Все остальные элементы сети входят с заданными параметрами, приведенными к одной базисной мощности, S_B (в о. е.), либо к одной ступени напряжения (в именованных единицах).

Для расчетов и анализа несимметричных КЗ важным выводом является правило эквивалентности прямой последовательности. Суть этого правила состоит в том, что ток прямой последовательности любого несимметричного КЗ можно определить как ток некоторого эквивалентного трехфазного КЗ, удаленного от действительной точки повреждения на дополнительное сопротивление $\Delta x^{(n)}$ (шунт КЗ), величина которого определяется результирующими сопротивлениями схем обратной и нулевой последовательности, ($x_{\Sigma 2}$ и $x_{\Sigma 0}$) относительно, места КЗ и зависит от вида КЗ.

В соответствие с этим правилом эквивалентная схема прямой последовательности имеет вид, изображенный на рис. 2.

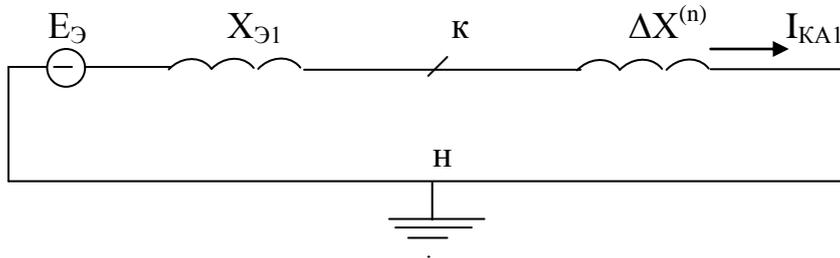


Рис.2

Ток прямой последовательности особой фазы (А) в месте КЗ при любом несимметричном КЗ (n) следует определять до формуле

$$I_{КА1}^{(n)} = \frac{E_{э}}{j(x_{э1} + \Delta x^{(n)})} \quad (2)$$

где $\Delta x^{(n)}$ - дополнительное сопротивление (определяется в соответствии с табл. 2).

Схемы замещения всех трех последовательностей методом преобразований приводятся к простейшему виду. При этом определяются суммарные сопротивления схемы каждой последовательности относительно места КЗ $x_{э1}$, $x_{э2}$, $x_{э0}$, а в схеме прямой последовательности $E_{э}$. При выполнении преобразований схем следует выбирать такую последовательность, чтобы число преобразований, особенно сложных, было наименьшим. Это обеспечивает меньшее количество ошибок в вычислениях и экономит расчетное время. В тоже время последовательность преобразований должна быть такова, чтобы в последнюю очередь преобразовались те части схемы, в ветвях которых необходимо определить токи и остаточные напряжения. Таким образом, сокращается объем вычислений при обратном развертывании схемы. Полный ток поврежденной фазы в месте КЗ равен

$$I_k^{(n)} = m^{(n)} \cdot I_{КА1}^{(n)} \quad (3)$$

где $m^{(n)}$ - коэффициент, показывающий, во сколько раз ток поврежденной фазы в месте КЗ больше тока прямой последовательности

Контрольные вопросы:

1. Каким образом связаны расчетные активная и реактивная мощности?
2. В каком случае необходимо провести корректировку расчетной активной мощности?

Перечень основной литературы:

1. Пилипенко, В.Т. Электромагнитные переходные процессы в электроэнергетических системах: учебно-методическое пособие/ В.Т. Пилипенко; Оренбургский гос. ун-т. – Оренбург: ОГУ, 2014. – 124 с. Режим доступа: http://biblioclub.ru/index.php?page=book_view_red&book_id=330565

Перечень дополнительной литературы:

1. Кувшинов А.А. Теория электропривода. Часть 3: Переходные процессы в электроприводе: учебное пособие/ А.А. Кувшинов, Э.Л. Греков; Оренбургский гос. ун-т. – Оренбург: ОГУ, 2017. – 114 с. Режим доступа: http://biblioclub.ru/index.php?page=book_view_red&book_id=481766

Практическое занятие №9.

Расчет трехфазного тока КЗ

Определение симметричных, фазных токов и напряжений в месте КЗ и заданных сечениях.

Токи и напряжения обратной и нулевой последовательности в месте повреждения связаны определенными соотношениями с токами и напряжениями прямой последовательности для расчетной фазы, которые определяются видом повреждения. Если принять для всех несимметричных повреждений за расчетную фазу А, соотношения будут:

- для двухфазного КЗ

$$I_{KA2} = -I_{KA1}; U_{KA1} = U_{KA2} \quad (4)$$

- для однофазного КЗ

$$I_{KA1} = I_{KA2} - I_{KA0}; U_{KA1} + U_{KA2} + U_{KA0} = 0 \quad (5)$$

- для двухфазного на землю

$$\begin{aligned} I_{KA1} + I_{KA2} + I_{KA0} &= 0; U_{KA1} = U_{KA2} - U_{KA0} \\ I_{KA2} &= -I_{KA1} \frac{\Delta x^{(1,1)}}{x_{\Sigma 2}}; I_{KA0} = -I_{KA1} \frac{\Delta x^{(1,1)}}{x_{\Sigma 0}} \end{aligned} \quad (6)$$

Полные токи в фазах соответственно:

$$\begin{aligned} I_{KA} &= I_{KA1} + I_{KA2} + I_{KA0} \\ I_{KB} &= a^2 I_{KA1} + a I_{KA2} + I_{KA0} \quad (7) \\ I_{KC} &= a I_{KA1} + a^2 I_{KA2} + I_{KA0} \end{aligned}$$

$$\text{где } a = e^{j120} = -0.5 + j \frac{\sqrt{3}}{2}; a^2 = e^{j240} = -0.5 - j \frac{\sqrt{3}}{2}$$

Напряжения различных последовательностей в месте повреждения находятся как (рис 1)

$$\begin{aligned} U_{KA1} &= j I_{KA1} \cdot \Delta x^{(n)} \\ U_{KA2} &= -j I_{KA2} \cdot x_{\Sigma 2} \quad (8) \end{aligned}$$

$$U_{KA0} = -j I_{KA0} \cdot x_{\Sigma 0}$$

Полные напряжения отдельных фаз в месте повреждения определяются через соответствующие (U_{KA1} , U_{KA2} , U_{KA0}) по соотношениям, аналогичным для токов

$$\begin{aligned} U_{KA} &= U_{KA1} + U_{KA2} + U_{KA0} \\ U_{KB} &= a^2 U_{KA1} + a U_{KA2} + U_{KA0} \quad (9) \\ U_{KC} &= a U_{KA1} + a^2 U_{KA2} + U_{KA0} \end{aligned}$$

Для нахождения фазных токов и напряжений в заданном сечении необходимо произвести расчет токораспределений в схемах всех последовательностей, последовательно развертывая каждую из них. Исходным для этих расчетов является получение значения токов и напряжений различных последовательностей в месте повреждений (рис 1).

При развертывании схем пользуются известными правилами и законами распределения токов в линейных электрических цепях, для схем прямой последовательности напряжение в какой - либо удаленной от места повреждения точке (m) будет определяться как

$$U_{ma1} = U_{ka1} + \sum_{i=1, n} I_{mi1} j x_{mi1} \quad (10)$$

где $\sum_{i=1,n} I_{mi1} jx_{mi1}$ - сумма падений напряжения в ветвях по пути от точки

повреждения до заданной m ;

I_{mi1} - ток ветвей с сопротивлением x_{mi1} ;

n -число ветвей на пути преобразования от точки n до m .

Напряжения обратной и нулевой последовательности в сечении " m " определяются

$$\begin{aligned} U_{ma2} &= U_{ka2} + \sum_{i=1,n} I_{mi2} jx_{mi2} \\ U_{ma0} &= U_{ka0} + \sum_{i=1,n} I_{mi0} jx_{mi0} \end{aligned} \quad (11)$$

Для этих схем по мере удаления расчетного сечения от места повреждения абсолютная величина напряжения уменьшается. Все преобразования выполняются по схеме замещений. При наличии на пути преобразования трансформаторов необходимо учесть, что взаимная ориентация векторов токов и напряжения различных последовательностей может изменяться, группой соединения обмоток этих трансформаторов.

Векторы напряжений и токов различных последовательностей при переходе через трансформаторы получают определенное угловое смещение. Поэтому полученные значения токов и напряжений в сечении (m) должны быть умножены на оператор поворота e^{pj30} , в котором $p=(-1)^N$, в котором N - номер группы соединений обмоток трансформатора. При переходе через трансформаторы со схемой соединения обмоток Y/Y или Δ/Δ (группа 12) углового смещения нет. При переходе через трансформаторы с наиболее часто встречающейся группой $Y/\Delta-11$ составляющие прямой последовательности поворачиваются на угол 30 градусов по направлению вращения векторов (e^{j30}), обратной последовательности на 30 градусов против направления вращения векторов (e^{j30}). Поэтому выражения для напряжений U_{ma1} и U_{ma2} при одной трансформации будут иметь вид:

$$U_{ma1} = (U_{ka1} + \sum_{i=1,n} I_{mi1} jx_{mi1}) e^{j30}$$

$$U_{ma2} = (U_{ka2} + \sum_{i=1,n} I_{mi2} jx_{mi2}) e^{-j30} \quad (12)$$

При переходе с треугольника на звезду - наоборот, прямая на (e^{-j130}), обратная на (e^{j30}). В общем случае, когда на пути разворачивания схемы встречается не одна трансформация, поворот должен быть учтен соответствующее число раз. Токи нулевой последовательности трансформируются лишь при переходе через трансформаторы со схемой соединения обмоток Y/Y.

Контрольные вопросы:

1. Каким образом связаны расчетные активная и реактивная мощности?
2. В каком случае необходимо провести корректировку расчетной активной мощности?

Перечень основной литературы:

1. Пилипенко, В.Т. Электромагнитные переходные процессы в электроэнергетических системах: учебно-методическое пособие/ В.Т. Пилипенко; Оренбургский гос. ун-т. – Оренбург: ОГУ, 2014. – 124 с. Режим доступа: http://biblioclub.ru/index.php?page=book_view_red&book_id=330565

Перечень дополнительной литературы:

1. Кувшинов А.А. Теория электропривода. Часть 3: Переходные процессы в электроприводе: учебное пособие/ А.А. Кувшинов, Э.Л. Греков; Оренбургский гос. ун-т. – Оренбург: ОГУ, 2017. – 114 с. Режим доступа: http://biblioclub.ru/index.php?page=book_view_red&book_id=481766