

ФЕДЕРАЛЬНОЕ АГЕНТСТВО ПО ОБРАЗОВАНИЮ
Государственное образовательное учреждение высшего профессионального образования
**«НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ
ТОМСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»**

УТВЕРЖДАЮ
ДИРЕКТОР ЭЛТИ

_____ А.П.СУРЖИКОВ
« _____ » _____ 2009 Г.

В.И. Готман

Электромагнитные переходные процессы в электроэнергетических системах

Методические указания к выполнению лабораторных работ
по курсу «Электромагнитные переходные процессы в
электроэнергетических системах» для бакалавров и дипломированных
специалистов, обучающихся по направлению 140200
«Электроэнергетика»

Издательство
Томского политехнического университета
2010

УДК 621. 311.018(075.8)

ББК 31. 27я 73

Г73

Готман В.И.

Г73 Электромагнитные переходные процессы в электроэнергетических системах: методические указания к выполнению лабораторных работ по курсу «Электромагнитные переходные процессы в электроэнергетических системах» для бакалавров и дипломированных специалистов, обучающихся по направлению 140200 «Электроэнергетика» / В.И. Готман; Национальный исследовательский Томский политехнический университет. – Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2009. – 24 с.

УДК 621. 11.018(075.8)

ББК 31. 27я 73

Методические указания рассмотрены и рекомендованы
к изданию методическим семинаром кафедры
Электроэнергетических систем и высоковольтной техники ЭЛТИ
«10» октября 2009 г.

Зав. кафедрой ЭСВТ

Проф.-док.

_____ *В.Я. Ушаков*

Председатель учебно-методической

комиссии

_____ *Е.В. Старцева*

Рецензент

Директор Филиала ОАО №СО ЕЭС» оду Сибири г. Кемерово

А.В. Пахомов

© ГОУ ВПО «Национальный исследовательский
Томский политехнический университет», 2010

© В.И. Готман, 2009

© Оформление. Издательство Томского
политехнического университета, 2010

ПРЕДИСЛОВИЕ

Дисциплина «Электромагнитные переходные процессы в электроэнергетических системах» является одной из профилирующих для электроэнергетических специальностей. Положения этой дисциплины широко используются как на стадии проектирования, так и управлении функционированием электроэнергетических систем и систем электроснабжения предприятий.

Лабораторные работы являются логическим дополнением лекционного материала и практических занятий. В них более детально рассматривается ряд узловых положений курса посредством экспериментальных исследований на ЭВМ, обработки результатов и их интерпретации. Это способствует приобретению навыков инженерного мышления.

Лабораторные работы затрагивают наиболее важные вопросы дисциплины: основные параметры тока короткого замыкания, влияние двигательной нагрузки на токи короткого замыкания, особенности несимметричных коротких замыканий, влияние параметров схем на статическую устойчивость и пропускную способность электропередач, средства повышения динамической устойчивости и ряд др.

В каждой работе сформулированы основные цели и приведены краткие теоретические сведения, необходимые для понимания сути поставленных задач. Ввод данных и получение результатов составляют около 25 – 30% времени, отведенного на лабораторную работу. Обработка и анализ результатов занимают основную часть времени и предполагают работу с первоисточниками и конспектом лекций. Последовательность расположения лабораторных работ согласуется с изложением материала на лекционных и практических занятиях.

Лабораторная работа № 1

Исследование режима трехфазного короткого замыкания в простейшей цепи

1. *Цель работы:* исследовать влияние режима, предшествующего короткому замыканию (КЗ), и момента возникновения КЗ на слагаемые тока КЗ.

2. Общие положения и расчетные выражения

Теоретический материал изложен в [1, § 3.1-3.3; 2, § 3.1-3.3].

Исследование переходного режима ведется на базе схемы рис.1, состоящей из активно-индуктивных сопротивлений Z_K , $Z_{\text{наг.}}$ и источника неограниченной мощности. Указанный источник характеризуется неизменным напряжением ($U_m = \text{const}$) в любых режимах внешней сети (нормальном или аварийном) и сопротивлением $x=0$. Отсутствие в схеме емкостей исключает возникновение колебательных контуров и упрощает анализ переходного процесса.

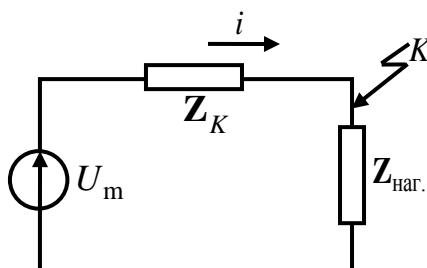


Рис.1. Принципиальная схема

В рассматриваемой схеме закон изменения тока 3-х фазного КЗ в точке K в функции времени (t) описывается выражением [1,2]:

$$i_{iK} = i_{ia(0)} e^{-t/T_a} + I_{\text{Пм}} \sin(\omega t + \alpha - \varphi_K + \psi_i), \quad (1)$$

где $i=A, B, C$ – индекс фазы;

$$i_{ia(0)} = [I_{\text{нм}} \sin(\alpha - \varphi_{\text{н}} + \psi_i) - I_{\text{Пм}} \sin(\alpha - \varphi_K + \psi_i)] = i_{\text{П}i0} - i_{\text{П}i(0)} \quad (2)$$

– начальное значение апериодической слагаемой тока КЗ (вычисляется для $t=0$), представляет собой разность мгновенных значений периодического тока нормального режима i_0 и периодической слагаемой тока КЗ $i_{(0)}$.

$I_{\text{нм}} = U_{\text{м}} / Z_{\Sigma}$ – амплитуда тока нагрузочного режима, предшествующего режиму КЗ;

$U_{\text{м}}$ – амплитуда фазного напряжения источника питания;

$Z_{\Sigma} = Z_K + Z_{\text{наг.}} = Z_{\Sigma} \exp(j\varphi_{\text{н}})$ – комплексное сопротивление цепи нормального режима в соответствии со схемой рис.1;

$I_{\text{пм}} = U_{\text{м}} / Z_K$ – амплитуда периодической слагаемой тока КЗ;

$Z_K = Z_K \exp(j\varphi_K)$ – комплексное сопротивление цепи в режиме КЗ;

ψ_i – угол сдвига напряжений фаз *B* и *C* относительно фазы *A*;

($\psi = -120^\circ$ для фазы *B* и $\psi = 120^\circ$ для фазы *C*);

$T_a = X_K / \omega R_K$ – постоянная времени затухания аperiodической слагаемой, которая определяется параметрами схемы (X_K и R_K) в режиме КЗ;

ω – угловая скорость трехфазной системы напряжений (токов);

α – угол, определяющий положение вектора напряжения фазы *A* относительно оси отсчета углов при $t=0$ «фаза включения».

Для принятых условий амплитуда периодической слагаемой тока КЗ остается неизменной и определяется величиной напряжения и удаленностью КЗ. Аperiodическая слагаемая существенно зависит от двух факторов:

- режима предшествующего КЗ ($I_{\text{нм}}$);
- момента возникновения КЗ (значения угла α).

Аperiodическая составляющая является криволинейной осью симметрии полного тока КЗ. В трехфазной сети аperiodическая слагаемая по фазам индивидуальна, при этом возможны условия, когда в одной из фаз она вообще отсутствует. Таким образом, аperiodический ток существенно влияет на полный ток КЗ. Скорость затухания аperiodического тока определяется его постоянной времени T_a и зависит от t .

Существует несколько способов косвенного определения T_a .

1. Подкасательная к любой точке экспоненты (рис.2) в принятом для оси времени масштабе дает значение постоянной времени T_a . Для большей точности точку, в которой проводят касательную, нужно брать в начальной (более крутой) части кривой.

2. Отрезок на оси времени, при котором отношение токов, соответствующее его началу и концу, составляет $e=2,720$, равен постоянной времени T_a (рис.2).

Для практических расчетов важным является режим и условия, при которых мгновенное значение полного тока КЗ (пик тока) достигает

максимального значения (i_y), которое называют ударным током короткого замыкания. Как известно [1,2], для активно-индуктивной цепи это достигается при следующих условиях:

- до КЗ цепь была ненагруженной (режим ХХ, $I_{\text{нм}} = 0$);
- в момент КЗ угол $\alpha = 0$ или 180 (имея в виду фазу A).

Как видно из (2), при этих условиях начальное значение апериодической слагаемой несколько меньше своего максимально возможного значения, равного $|I_{\text{Пм}}|$, а время возникновения ударного тока зависит от φ_K [$t_{\text{уд.}} = (\pi/2 + \varphi_K)/\omega$], что создает определенные неудобства в расчете i_y по (1).

При отсутствии предшествующего тока начальное значение апериодической слагаемой (2) достигает максимума при $\alpha = \pm 90^\circ + \varphi_K$. Для цепей с преобладающей индуктивностью $\varphi_K \approx 90^\circ$, поэтому условие возникновения наибольшей апериодической слагающей и условие, при котором достигается максимум мгновенного значения полного тока, очень близки друг к другу.

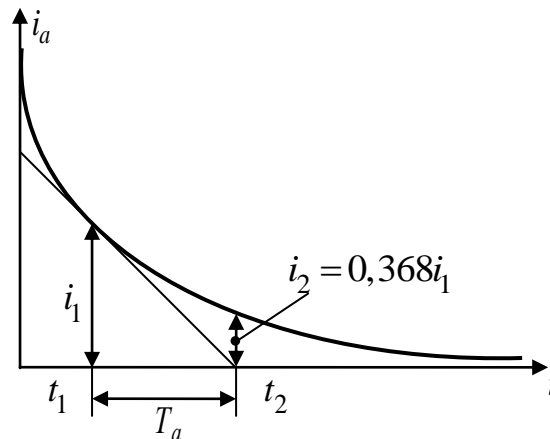


Рис.2. Графическое определение T_a затухающей экспоненты

Поэтому в практических расчетах i_y находят при наибольшем значении апериодической слагаемой, т.е. при $\alpha = \pm 90^\circ + \varphi_K$ и времени $t=0,01$ с после возникновения КЗ:

$$i_y = I_{\text{Пм}} K_y = \sqrt{2} I_{\text{П}} K_y, \quad (3)$$

где $K_y = 1 + e^{-0,01/T_a}$ - ударный коэффициент;

$I_{\text{П}}$ - действующее значение периодической составляющей тока КЗ.

3. Ввод исходных данных

В табл.1 представлены варианты исходных данных

Таблица 1

№ вар.	1	2	3	4	5	6	7	8
U, кВ	3	3	3	6	6	6	10	10
L, км	1	2	3	4	5	6	9	10
№ вар.	9	10	11	12	13	14	15	16
U, кВ	10	35	35	35	110	110	110	220
L, км	11	14	15	16	26	28	30	50
№ вар.	17	18	19	20	21	22	23	24
U, кВ	220	220	110	24	13,8	75	13,8	75
L, км	55	60	50	10	9	20	8	22

После запуска программы на экране появляется табл.1.

По запросу необходимо ввести данные, соответствующие заданному варианту:

- действующее значение междуфазного напряжения источника питания, кВ U ;
- длину линии, км L ;
- фазу включения, эл.град. $-90^{\circ} \leq \alpha \leq 90^{\circ}$ α .

4. Расчет режимов трехфазного замыкания

В соответствии с принятой схемой (рис.1) специализированной программой рассчитываются:

- амплитуда фазного напряжения источника питания, кВ $U_m = \sqrt{2}U / \sqrt{3}$;
- сопротивление цепи в режиме КЗ, Ом $Z_K = (R_0 + jX_0)L = Z_K \exp(j\varphi_K)$;
- сопротивление нагрузки, Ом $Z_{нар} = 3|Z_K|(0,8 + j0,6)$;
- сопротивление цепи в нормальном режиме, Ом $Z_{\Sigma} = Z_K + Z_{нар}$.

В данной лабораторной работе моделируются два режима КЗ.

1. На интервале времени $-0,006 \text{ с} \leq t \leq 0 \text{ с}$ – нормальный режим. При $t=0$ происходит КЗ с заданной фазой включения α . Режим КЗ рассчитывается по (1) на отрезке времени $0 \leq t \leq 0,022 \text{ с}$.

2. До КЗ – холостой ход. В момент КЗ ($t=0$) начальное значение апериодической слагаемой имеет максимально возможное значение, равное $I_{\text{Пм}}$ при фазе включения $\alpha = -90^\circ + \varphi_K$.

5. Результаты расчета

На печать выводятся исходные данные по принятому варианту и результаты экспериментов.

По первому эксперименту (табл.2) выводятся токи для фаз A, B, C в функции времени.

Таблица 2

Нагрузочный режим, токи фаз A, B, C

$t, \text{ с}$	Фаза A			Фаза B	Фаза C
	$I_{\text{пер}}, \text{ кА}$	$I_{\text{апер}}, \text{ кА}$	$I_{\text{КЗ}}, \text{ кА}$	$I_{\text{пер}}, \text{ кА}$	$I_{\text{пер}}, \text{ кА}$

Дополнительно вне табличной формы выводятся:

- амплитуда фазного напряжения, кВ U_m ,
- амплитуда тока нормального режима, кА $I_{\text{нм}}$,
- угол сдвига тока нормального режима к напряжению, град. φ_n ,
- амплитуда периодической составляющей тока КЗ, кА $I_{\text{Пм}}$,
- угол сдвига периодической составляющей тока к напряжению, град φ_K .

По второму эксперименту (табл.3) для фазы A выводятся слагаемые тока КЗ, полный ток КЗ и фаза включения.

Таблица 3

До КЗ – режим холостого хода

$t, \text{ с}$	$I_{\text{пер}}, \text{ кА}$	$I_{\text{апер}}, \text{ кА}$	$I_{\text{КЗ}}, \text{ кА}$

6. Задание по обработке экспериментов и оформлению отчета

К отчету приложить распечатку результатов экспериментов, нарисовать на рис.1 принципиальную схему, принятую для исследования.

По данным эксперимента 1 (результатам табл.2):

1. На рис.2 «Осциллограмма токов фазы A » построить в координатах I, t составляющие токов фазы « A » и определить постоянную времени затухания апериодического тока (T_a).

2. Для фаз B и C , основываясь на первом законе коммутации, определить начальные значения апериодических слагаемых токов КЗ согласно выражения (2).

Рассчитать $i_a = F(t)$ для фаз B и C , используя найденное в п.1 значение T_a . Построить осциллограммы токов $i_{II}, i_a, i_K = F(t)$ для фазы B и фазы C (рис.3). Для всех фаз найти максимальное мгновенное значение тока КЗ $i_{m(кз)}$ и время его возникновения t_m .

3. Построить (рис.5) векторную диаграмму напряжений и токов для фаз A, B, C для начального момента трехфазного КЗ в координатах «ось времени»-«ось отсчета углов». Дополнить диаграмму векторами $(I_{нм} - I_{Пм})$ и выделить на оси времени t отрезки $i_{a(0)}$.

По данным эксперимента 2 (результатам табл.3):

4. Построить (рис.4) осциллограмму токов для режима ХХ до КЗ, обозначив все токи и их начальные значения.

5. На рис.6 построить векторную диаграмму тока и напряжения в координатах «ось времени»-«ось отсчета углов».

6. Графическим путем найти T_a и рассчитать K_y, i_y .

7. Сделать выводы по сопоставительному анализу токов для проведенных экспериментов.

8. Ответить письменно на вопросы

8.1. Как зависит скорость затухания i_a от T_a и t ?

- 8.2. Из каких условий в активно-индуктивной цепи находится $i_{a(0)}$?
- 8.3. Рассчитайте значение I_y (наибольшее действующее значение тока КЗ).
- 8.4. Назовите расчетные условия для практического расчета K_y ?
- 8.5. Во сколько раз уменьшится i_a за время $3T_a$?

Литература

1. Ульянов С.А. Электромагнитные переходные процессы в электрических системах. – М.: Энергия, 1964. – 518 с., 1970. – 518 с.
2. Борисов Р.И., Готман В.И. Основы переходных процессов в электрических системах. – Томск: Изд. ТПИ, 1969. – 388 с.
3. Куликов Ю.А. Переходные процессы в электрических системах. – Новосибирск: Изд. НГТУ, 2003. – 283 с.
4. Готман В. И. Электромагнитные переходные процессы в электроэнергетических системах: учеб. пособие – Томск: Изд-во ТПУ, 2008. – 240 с.

Лабораторная работа № 2

Исследование влияния нагрузки в начальный момент трехфазного замыкания

1. Цель работы: исследовать влияние двигательной нагрузки, ее мощности и удаленности на начальный сверхпереходный и ударный токи при трехфазном коротком замыкании.

2. Общие положения и расчетные выражения

Теоретический материал изложен в [1, § 6.5-6.6; 2, § 8.1-8.2]

При расчете режимов короткого замыкания (КЗ) в электрических сетях под нагрузкой понимают: синхронные двигатели и компенсаторы, асинхронные двигатели и обобщенную нагрузку. Все указанные виды нагрузки оказывают влияние на ток КЗ, особенно в начальный момент нарушения режима. При этом влияние каждого вида нагрузки индивидуально и зависит от ряда факторов, из которых основными являются: мощность нагрузки, ее режим до КЗ, электрическая удаленность до точки КЗ.

Как известно [1,2], любая из перечисленных нагрузок в переходном режиме характеризуется своими сверхпереходными (переходными) параметрами: E'' – сверхпереходная ЭДС, x'' – сверхпереходное сопротивление. Поскольку в большинстве практических расчетов пренебрегают сдвигом фаз ЭДС источников, то в конечном итоге влияние любой нагрузки (равно как и генератора) на ток КЗ определяется соотношением сверхпереходной ЭДС и остаточным напряжением на ее выводах в переходном режиме.

При $E''_{(0)} > U_{(0)}$ (где индекс (0) указывает на режим КЗ при $t=0$) нагрузка является дополнительным источником, посылая реактивный ток во внешнюю сеть, при $E''_{(0)} < U_{(0)}$ – нагрузка потребляет реактивный ток из сети.

Исследование режимов в настоящей работе ведется на основе простейшей схемы (рис.1), в которой генератор и нагрузка через общую реактивность x_K связаны с местом КЗ.

Начальное значение сверхпереходной ЭДС любой двигательной нагрузки (или генератора) определяется из режима, предшествующего КЗ [1,2]:

$$E''_{(0)} = E''_0 = \sqrt{(U_0 \cos \varphi_0)^2 + (U_0 \sin \varphi_0 \pm I_0 x'')^2}, \quad (1)$$

где U_0 , I_0 , φ_0 – напряжение, ток и угол сдвига между ними в режиме, предшествующем КЗ.

Знак плюс перед падением напряжения в x'' соответствует синхронному генератору, синхронному двигателю или компенсатору в режиме перевозбуждения, знак минус – этим же элементам в режиме недовозбуждения и асинхронному двигателю.

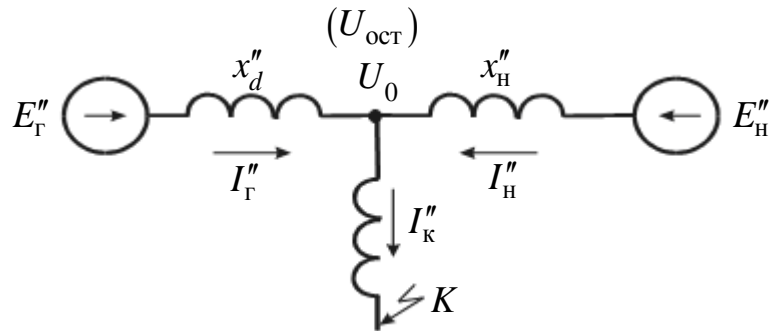


Рис. 1. Принципиальная схема

Для обобщенной нагрузки принимают $E'' = 0,85$, $x'' = 0,35$ в относительных единицах, приведенные к ее рабочей мощности (МВА) и номинальному напряжению (кВ) узла присоединения.

При расчете ударного тока КЗ (i_y) в схемах с нагрузкой есть особенность, обусловленная затуханием тока нагрузки. У синхронных двигателей (компенсаторов) величина ударного коэффициента примерно та же, что и у синхронных генераторов равновеликой мощности. У асинхронных двигателей затухание периодической и аperiodической слагающих происходит примерно с одинаковыми постоянными времени. Поэтому в ударном коэффициенте учитывается затухание обеих слагающих тока. В расчетах можно ориентироваться на следующую связь ударного коэффициента от мощности асинхронного двигателя

K_y	1,6	1,64	1,66	1,7	1,73	1,76	1,78	1,8
P , МВт	0,2	0,3	0,4	0,6	1,0	2,0	3,0	5,0

Для мелких двигателей и обобщенной нагрузки $K_y \approx 1$.

Таким образом, при персональном учете двигательной нагрузки ударный ток в месте КЗ составит

$$i_y = \sqrt{2} \cdot (I''_{\Gamma} \cdot K_{\text{уг}} + I''_{\text{наг.}} \cdot K_{\text{унаг.}}), \quad (2)$$

где I''_{Γ} , $I''_{\text{наг.}}$ – действующие значения начального сверхпереходного тока генератора и нагрузки;

$K_{\text{уг}}$, $K_{\text{унаг.}}$ – значения ударных коэффициентов для генератора и нагрузки.

Наряду с ударным током КЗ важной характеристикой тока КЗ является наибольшее действующее значение (I_y). Наибольшее действующее значение тока КЗ имеет место за первый период переходного процесса и рассчитывается для времени $t=0,01$ с., т.е. момента возникновения ударного тока и в общем случае для I_y справедливо выражение

$$I_y = \sqrt{I_{\text{пт}}''^2 + I_{\text{ат}}^2}, \quad (3)$$

где $I_{\text{пт}}''$ – действующее значение периодической слагающей тока КЗ при $t=0,01$ с и в практических расчетах принимается равной для $t=0$;

$I_{\text{ат}}$ – значение аperiodической слагаемой тока КЗ при $t=0,01$ с.

При отсутствии данных о постоянной времени (T_a) затухания аperiodической слагаемой тока КЗ ($I_{\text{ат}}$) он может быть косвенно учтен посредством ударного коэффициента, что позволяет выражение (3) представить так:

$$I_y = I_{\text{пт}(0)} \sqrt{1 + 2(K_y - 1)^2}. \quad (4)$$

Применительно к нашим условиям, когда имеются два источника питания, характеризующиеся разными значениями K_y величину I_y , можно рассчитать по выражению:

$$I_y = \sqrt{(I''_{\Gamma} + I''_{\text{наг.}})^2 + 2[I''_{\Gamma}(K_y - 1) + I''_{\text{наг.}}(K_{\text{унаг.}} - 1)]^2}. \quad (5)$$

3. Ввод исходных данных

В табл.1 представлены варианты исходных данных

Таблица 1

№ вар.	1	2	3	4	5	6	7
$S_{Г} / \cos \varphi$	37,5/	50/	66/	77/	85/	90/	100/
МВА/о.е.	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9
$x''_{Г}$, о.е.	0,15	0,145	0,14	0,135	0,13	0,125	0,12
$S_{СК} / \cos \varphi$	37,5/	50/	66/	77/	85/	90/	100/
МВА/о.е.	0,85	0,85	0,85	0,85	0,85	0,85	0,85
$x''_{СК}$, о.е.	0,22	0,2	0,22	0,23	0,25	0,2	0,2
$U_{Н}$, кВ	6,3	6,3	10,5	10,5	10,5	10,5	10,5
$S_{СК} / S_{Г}$	0,3	0,4	0,5	0,3	0,4	0,2	0,3
№ вар.	8	9	10	11	12	13	14
$S_{Г} / \cos \varphi$	45/	55/	60/	70/	80/	95/	110/
МВА/о.е.	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9
$x''_{Г}$, о.е.	0,13	0,135	0,14	0,16	0,17	0,17	0,15
$S_{СК} / \cos \varphi$	45/	55/	60/	70/	80/	95/	110/
МВА/о.е.	0,85	0,85	0,8	0,8	0,85	0,8	0,8
$x''_{СК}$, о.е.	0,23	0,25	0,27	0,3	0,28	0,29	0,3
$U_{Н}$, кВ	6,0	6,0	6,0	6,3	10,0	10,0	10,0
$S_{СК} / S_{Г}$	0,35	0,45	0,5	0,6	0,2	0,3	0,4

После запуска программы на экране появляется табл.1. В соответствии с принятым вариантом по запросу необходимо последовательно ввести численные значения параметров схемы.

4. Расчет режимов трехфазного короткого замыкания

В соответствии с принятой схемой (рис.1) рассчитываются четыре режима трехфазных замыканий. Результаты расчета представляются в относительных единицах, в качестве базисных условий приняты номинальные параметры генератора. Мощность генератора во всех опытах неизменна, а его режим – перевозбуждение.

В экспериментах осуществляется расчет начального сверхпереходного тока трехфазного КЗ в функции удаленности точки КЗ (x_K) при следующих условиях:

1. в качестве нагрузки принята обобщенная нагрузка, равная мощности генератора;
2. в качестве нагрузки принят синхронный компенсатор (двигатель) в режиме перевозбуждения равный мощности генератора;
3. то же, что и в п.2; двигатель в режиме недовозбуждения;
4. синхронный двигатель (компенсатор) в режиме недовозбуждения при $S_{ск} / S_{Г} = K$.

5. Результаты расчета

На печать выводятся исходные данные по принятому варианту в соответствии со списком:

- $S_{Г}$ – номинальная мощность генератора; МВА
 $\cos\varphi$ – $\cos\varphi$ генератора; о.е.
 $x_{Г}''$ – сверхпереходное сопротивление генератора; о.е.
 $S_{ск}$ – номинальная мощность с.к.; МВА
 $\cos\varphi$ – $\cos\varphi$ синхронного компенсатора; о.е.
 $x_{ск}''$ – сверхпереходное сопротивление с.к.; о.е.
 $U_{н}$ – номинальное напряжение генератора; кВ
 K – отношение $S_{ск} / S_{Г} = K$; о.е.

По первому эксперименту рассчитываются $I_{Г}''$, $I_{наг.}''$ и остаточное напряжение на их шинах ($U_{ост.}$) в функции удаленности точки КЗ (табл.2).

Таблица 2

Источники: генератор – обобщенная нагрузка $S_{Г} = S_{об.н.}$

$x_{К}$, о.е.	$I_{Г}''$, о.е.	$I_{наг.}''$, о.е.	$U_{ост.}$, о.е.
0,0			
0,1			
...			
1,8			

По второму и третьему экспериментам рассчитываются результирующий ток в месте КЗ и его составляющая, обусловленная двигательной нагрузкой (табл.3).

Таблица 3

Источники: генератор – синхронный компенсатор $S_{\Gamma} = S_{\text{СК}}$

x_K , о.е.	Режим с.к. - перевозбуждение		Режим с.к. - недовозбуждение	
	I''_K ; о.е.	$I''_{\text{СК}}$; о.е.	I''_K ; о.е.	$I''_{\text{СК}}$; о.е.
0,0				
0,1				
...				
1,8				

В четвертом эксперименте источниками являются генератор и синхронный компенсатор, работающий в режиме недовозбуждения при $S_{\text{СК}}/S_{\Gamma} = K$ (где $K < 1$). Результаты выводятся в табл.4.

Таблица 4

x_K , о.е.	Источники: генератор – синхр. компенсатор в режиме недовозбуждения при $S_{\text{СК}}/S_{\Gamma} = K$	
	I''_K ; о.е.	$I''_{\text{СК}}$; о.е.
0,0		
0,1		
...		
1,8		

6. Задание по обработке экспериментов и оформлению отчета

К отчету приложить распечатку результатов экспериментов, нарисовать на рис.1 принципиальную схему, принятую для исследования.

1. По данным эксперимента 1 (табл.2):

На рис. 2 представить зависимости I''_{Γ} , $I''_{\text{наг.}}$, I''_K в функции x_K .

На рис.3 отразить зависимость $(I''_{\text{наг.}}/I''_K) \cdot 100\% = f(x_K)$.

Определить диапазон x_K , при котором обобщенная нагрузка является дополнительным источником подпитки места КЗ.

Рассчитать по выражению (2) ударный ток КЗ и по (5) наибольшее действующее значение тока КЗ при $x_K = 0,2$.

2. По данным эксперимента 2 (первая часть табл.3):

2.1. На рис. 4 представить зависимости $I''_{\Gamma}, I''_{\text{К}}, I''_{\text{СК}}$ в функции $x_{\text{К}}$.

На рис. 5 отразить зависимость $(I''_{\text{СК}}/I''_{\text{К}}) \cdot 100\% = f(x_{\text{К}})$.

Рассчитать по выражению (2) ударный ток КЗ и по (5) наибольшее действующее значение тока КЗ при $x_{\text{К}}=0,2$.

Объяснить разницу в значениях i_y и характере поведения зависимостей $(I''_{\text{наг.}}/I''_{\text{К}}) = f(x_{\text{К}})$ по экспериментам 1 и 2.

3. По данным эксперимента 3 (вторая часть табл.3):

3.1. На рис.6 построить зависимости $I''_{\Gamma}, I''_{\text{СК}}, I''_{\text{К}}$ в функции $x_{\text{К}}$.

3.2. На рис.7 построить зависимость $U_{\text{ост.}} = f(x_{\text{К}})$ и определить графически $E''_{\text{СК}}$ в о.е. и пересчитать в именованные единицы; объяснить подоплеку в нахождении $E''_{\text{СК}}$.

3.3. Не прибегая к расчету зависимости $(I''_{\text{СК}}/I''_{\text{К}}) = f(x_{\text{К}})$, указать, какой из ранее построенных зависимостей она будет аналогична; объяснить почему?

4. По данным эксперимента 4 (табл. 4) для $x_{\text{К}}=0,3$ найти отношение $K_1 = I''_{\text{СК(экспер.4)}}/I''_{\text{СК(экспер.3)}}$ и объяснить тенденцию изменения K_1 от $S_{\text{СК}}/S_{\Gamma} = K$.

5. Ответить письменно на вопросы

5.1. Построить единую векторную диаграмму U, I, E'' для синхронного компенсатора в режиме перевозбуждения и недовозбуждения для $t=0$ до КЗ. Построение осуществить в масштабе, используя относительные или именованные величины.

5.2. Как изменяются U_{Γ} и E'' в момент КЗ?

5.3. Можно ли утверждать, что результаты эксперимента 3 соответствуют схеме генератор – асинхронный двигатель? Ответ обоснуйте.

5.4. Пользуясь результатами экспериментов, обосновать условия неучета нагрузки при расчете токов КЗ.

Литература

1. Ульянов С.А. Электромагнитные переходные процессы в электрических системах. – М.: Энергия, 1964. – 518 с., 1970. – 518 с.
2. Борисов Р.И., Готман В.И. Основы переходных процессов в электрических системах. – Томск: Изд. ТПИ, 1969. – 388 с.
3. Готман В. И. Электромагнитные переходные процессы в электроэнергетических системах: учеб. пособие – Томск: Изд-во ТПУ, 2008. – 240 с.

Лабораторная работа №3

Распределение симметричных составляющих напряжений при несимметричных коротких замыканиях

1. Цель работы: исследовать закономерности распределения симметричных составляющих остаточных напряжений в узлах схемы при несимметричных коротких замыканиях (КЗ).

2. Общие положения и расчетные выражения

Теоретический материал изложен в [1, §13.5; 2, §9.19; 3, §5].

Несимметричные КЗ в электрических системах приводят к нарушению симметрии фазных и линейных величин токов и напряжений. Моделирование несимметричных режимов можно осуществить методом симметричных составляющих, используя системы прямой, обратной и нулевой последовательностей. Тогда интересующие несимметричные величины фазных токов и напряжений будут представлены геометрической суммой соответственно токов и напряжений прямой, обратной и нулевой последовательностей. Согласно принципу независимости действия симметричных составляющих каждая из трех последовательностей может рассматриваться автономно.

Для симметричных составляющих остаточных напряжений двух соседних узлов i и j , связанных между собой в схеме прямой последовательности через x_1 и в схеме обратной и нулевой последовательностей соответственно через x_2 и x_0 , справедливы уравнения Кирхгофа (в относительных единицах):

$$\left. \begin{aligned} U_{1j} &= U_{1i} + I_{1j} jx_1, \\ U_{2j} &= U_{2i} + I_{2j} jx_2, \\ U_{3j} &= U_{3i} + I_{3j} jx_3. \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

Положительное направление тока принято от узла j к узлу i .

Эти уравнения (1) и определяют характер распределения симметричных составляющих напряжений в схеме в зависимости от симметричных составляющих токов и соответствующих значений сопротивлений элементов для различных последовательностей токов.

Фазные значения напряжений определяются геометрической суммой ее симметричных составляющих:

$$U_i = U_{1i} + U_{2i} + U_0, \quad (2)$$

где $i = A, B, C$ – индекс фазы.

Для перевода фазных величин напряжения (равно как и симметричных составляющих) из относительных единиц в именованные используют коэффициент $U_{\Delta} / \sqrt{3}$, где U_{Δ} (кВ) – действующее значение междупазного (линейного) базисного напряжения соответствующей ступени трансформации.

При переходе через трансформатор симметричные составляющие напряжения прямой и обратной последовательностей изменяются не только по величине, но и по фазе в зависимости от группы (N) соединения его обмоток. Уравнения связи симметричных составляющих напряжений на выводах трансформатора с соединением обмоток звезда-треугольник в системе относительных единиц запишутся так

$$U_{1\Delta} = U_{1Y} \cdot e^{-j30^\circ N}, \quad (3)$$

$$U_{2\Delta} = U_{2Y} \cdot e^{+j30^\circ N}.$$

При этом имеется в виду, что U_{1Y} , U_{2Y} включают падение напряжения в трансформаторе, т.е. U_{Δ} и U_Y соответствуют одному и тому же узлу схемы.

Уравнения (3) справедливы и при переходе со стороны треугольника на сторону звезды, при этом угловые смещения симметричных составляющих меняют свой знак на противоположный.

Исследование режимов КЗ в настоящей работе ведется на основе схемы (рис.1), в которой последовательно соединены генератор, трансформатор и высоковольтная ЛЭП.

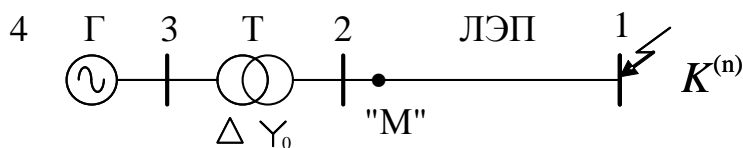


Рис. 1. Принципиальная схема электропередачи

Примечание:

1, 2, 3, 4 - номера узлов схемы

3. Ввод исходных данных

В табл. 1 представлены варианты исходных данных.

Таблица 1

№ вар.	1	2	3	4	5	6
$S_{ГНОМ}$, МВА	21,5	26,3	30	37,5	40	50
x_d'' , о.е.	0,225	0,227	0,2	0,24	0,225	0,232
$U_{ГНОМ}$, кВ	10,5	10,5	10,5	10,5	10,5	10,5
$S_{ТР}$, МВА	25		40			63
U_K , %	10,5		10,5			14
$U_{НВ}$, кВ	115		115			37,5
$U_{НН}$, кВ	10,5		10,5			10,5
L , км	50		80			30
№ вар.	7	8	9	10	11	12
$S_{ГНОМ}$, МВА	56,3	65,5	71,5	77,5	80	100
x_d'' , о.е.	0,2	0,16	0,21	0,28	0,24	0,19
$U_{ГНОМ}$, кВ	10,5	15,75	13,8	13,8	13,8	15,75
$S_{ТР}$, МВА	63	63	100			100
U_K , %	14	14	12			12
$U_{НВ}$, кВ	37,5	38,5	230			230
$U_{НН}$, кВ	10,5	15,75	13,8			15,75
L , км	30	30	100			120

После запуска программы на экране появляется табл. 1. В соответствии с заданным вариантом по запросу необходимо последовательно ввести числовые значения параметров схемы. Разделительным знаком для дробных величин необходимо использовать точку.

4. Расчет симметричных составляющих напряжений

При расчетах режимов КЗ приняты следующие условия по параметрам схемы:

$E_G'' = 1,1$ (о.е.) – значение сверхпереходной ЭДС для всех вариантов;

$x_{Г1} = x_{Г2} = x_d''$ (о.е.);

$R = 0$ – для всех элементов схемы;

$x_{1(L)} = 0,4$ (Ом/км) – погонная реактивность ЛЭП в схеме прямой последовательности;

$x_{0(L)} = 3 \cdot x_{1(L)}$ – погонная реактивность ЛЭП в схеме нулевой последовательности.

В данной работе моделируются три несимметричных режима КЗ: двухфазное; двухфазное на землю; однофазное, которые происходят в точке $K^{(n)}$ схемы (рис. 1). Расчет осуществляется аналитическим методом в системе относительных единиц. При $S_{\sigma} = S_{Г\text{ ном}}$; $U_{\sigma i} = U_{\text{НВ}}$; $U_{\text{НН}}$ трансформатора. В качестве “особой” фазы принята фаза «А».

5. Результаты расчета

На печать выводятся исходные данные по принятому варианту согласно следующему списку:

- мощность генератора $S_{Г\text{ ном}}$ МВА;
- сверхпереходное сопротивление генератора x_d'' о.е.;
- напряжение генератора $U_{Г\text{ ном}}$ кВ;
- мощность трансформатора $S_{\text{ТР}}$ МВА;
- напряжение КЗ трансформатора $U_{\text{К}}$ %;
- напряжение трансформатора на стороне ВН $U_{\text{НВ}}$ кВ;
- напряжение трансформатора на стороне НН $U_{\text{НН}}$ кВ;
- длина линии электропередачи L км.

Симметричные составляющие фазных напряжений в узлах схемы в о.е. (табл.2).

Таблица 2

Результаты расчета симметричных составляющих напряжений

№ узла	1	2	3	4
двухфазное КЗ				
U_1 , о.е.				
U_2 , о.е.				
двухфазное КЗ на землю				
U_1 , о.е.				
U_2 , о.е.				
U_0 , о.е.				

однофазное КЗ				
U_1 , о.е.				
U_2 , о.е.				
U_0 , о.е.				

6. Задание по обработке экспериментов

1. На рис. 1 изобразить принципиальную схему электропередачи и по данным табл. 2 построить эпюры распределения симметричных составляющих напряжений в о.е. для всех видов КЗ (в масштабе).

2. Для узла «М» ЛЭП, расположенного на удалении mL от места КЗ (m – относительная удаленность узла «М»), по данным табл. 2 рассчитать симметричные составляющие напряжений в относительных и именованных единицах для вида КЗ и значения « m », указанных в табл.3.

3. Для узла 3 принципиальной схемы определить фазы симметричных составляющих напряжений с учетом группы (N) соединения обмоток трансформатора для КЗ согласно данным табл. 3.

4. На рис. 2 построить векторные диаграммы симметричных составляющих, и фазных напряжений в именованных единицах для узла 2 и для узла 3 с учетом фазового смещения векторов.

5. Рассчитать симметричные составляющие токов в именованных единицах для КЗ, указанного в табл. 3, пользуясь данными табл.2, уравнениями (1) и данными, приведенными в разделе 4 настоящего описания. По результатам на рис.3 построить векторную диаграмму токов.

Таблица 3

Данные для выполнения п. 2–5 задания

№ вар.	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
m , о.е.	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	0,3	0,4	0,5	0,6
вид КЗ	1	2	1,1	1	2	1,1	1	2	1,1	1	2	1,1
N	3	3	9	9	11	11	9	9	3	3	11	11
номер группы соединения обмоток трансформаторов												

7. Ответить письменно на контрольные вопросы

7.1 Почему соотношения между симметричными составляющими напряжений в месте КЗ отличаются от аналогичных соотношений в прочих узлах схемы?

7.2 Что является источником токов обратной и нулевой последовательностей?

7.3 При каких условиях справедлив принцип независимости действия симметричных составляющих?

7.4 Каким образом определяется фазовый сдвиг векторов U и I при переходе через трансформатор?

Литература

1. Ульянов С.А. Электромагнитные переходные процессы в электрических системах. – М.: Энергия, 1964. – 518 с., 1970. – 518 с.

2. Борисов Р.И., Готман В.И. Основы переходных процессов в электрических системах. – Томск: Изд. ТПИ, 1969. – 388 с.

3. Готман В. И. Электромагнитные переходные процессы в электроэнергетических системах: учеб. пособие – Томск: Изд-во ТПУ, 2008. – 240 с.

Учебное издание

ГОТМАН Владимир Иванович

ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ ПЕРЕХОДНЫЕ ПРОЦЕССЫ В ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ

Методические указания к выполнению лабораторных работ
по курсу «Электромагнитные переходные процессы в
электроэнергетических системах» для бакалавров и дипломированных
специалистов, обучающихся по направлению 140200
«Электроэнергетика»

**Отпечатано в Издательстве ТПУ в полном соответствии
с качеством предоставленного оригинал-макета**

Подписано к печати 05.11.2009. Формат 60x84/16. Бумага «Снегурочка».


Печать XEROX. Усл.печ.л. 1,06. Уч.-изд.л. 0,96.

Заказ . Тираж 40 экз.



Национальный исследовательский Томский политехнический университет
Система менеджмента качества
Томского политехнического университета сертифицирована
NATIONAL QUALITY ASSURANCE по стандарту ISO 9001:2008



ИЗДАТЕЛЬСТВО  **ТПУ**. 634050, г. Томск, пр. Ленина, 30
Тел./факс: 8(3822)56-35-35, www.tpu.ru