

ГИМОЯН Г.Г., ЕГИАЗАРЯН Л.В., СААКЯН В.И.

УДК 621.3
ББК 31.29-5
Г - 486

Гимоян Г. и др.
Г - 486 Электромагнитные переходные процессы в системах электроснабжения промышленных предприятий/ Г. Гимоян, Л. Егиазарян, В. Саакян; под редакцией Л. Егиазаряна; Ер.: ГИУА. 2000. 393 стр.

Книга издана по инициативе закрытого акционерного общества "Научно-исследовательский институт энергетики". Это первая книга из планируемой к изданию серии книг для энергетики РА.

Рукопись книги подготовлена к изданию "Энергоатомиздатом" (Москва).

ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ ПЕРЕХОДНЫЕ ПРОЦЕССЫ В СИСТЕМАХ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ ПРОМЫШЛЕННЫХ ПРЕДПРИЯТИЙ

Изложены основные вопросы анализа и расчета электромагнитных переходных процессов в электрических сетях переменного тока 0,4-35 кВ и электроустановках промпредприятий. Рассмотрены методика и практика расчетов токов и напряжений симметричных и несимметричных КЗ, неполнофазных режимов, замыканий на землю в сетях с изолированной и с компенсированной нейтралью. Приведены алгоритмы и программы расчета токов КЗ.

Рассмотрены внутренние КЗ в электрических машинах и трансформаторах.

Для ИТР, занятых проектированием и эксплуатацией систем электроснабжения а также студентов и аспирантов вузов.

Под редакцией Л. В. Егиазаряна

Ереван 2000

Г $\frac{2202090000}{0139(01)2000}$ 2000 г.

ББК 31.29-5

ISBN 99930-850-0-6

@ Гимоян Г., Егиазарян Л., Саакян В., 2000 г.

Производственно - практическое издание

Гимоян Григорий Грантович
Егиазарян Левон Васильевич
Саакян Виктор Иосифович

Электромагнитные переходные процессы
в системах электроснабжения промышленных
предприятий

Редактор	А.В. Волковицкая
Художественные редакторы	В.А. Гозак-Хозак, Г.И. Панфилова
Технический редактор	Н. М. Брудная
Компьютерный набор	Н. М. Саакян
Корректор	Н.И. Колесникова

Оглавление

Предисловие	8
Глава первая. Переходные процессы в системах электро- снабжения в нормальных и аварийных режимах . . .	11
1.1. Сведения о переходных процессах в системах элект- роснабжения промышленных предприятий	11
1.2. Трехфазное КЗ в простейшей системе электроснаб- жения	16
1.3. Трехфазное КЗ асинхронных и синхронных элект- родвигателей	22
1.4. Последствия режимов КЗ в системе электроснабже- ния	29
1.5. Меры, снижающие последствия КЗ в системе элект- роснабжения	41
1.6. Сверхтоки переходных процессов при пусках и ре- версах электродвигателей	48
1.7. Сверхтоки переходных процессов при включениях силовых трансформаторов	53
1.8. Влияние конденсаторных батарей на токи КЗ	56
1.9. Сверхтоки переходных процессов при включении конденсаторных батарей	61
1.10. Требования к расчету токов переходных процессов систем электроснабжения	63
Глава вторая. Переходные процессы в электрических ма- шинах переменного тока	69
2.1. Дифференциальные уравнения фазных напряжений и токов синхронной машины	69
2.2. Линейные преобразования уравнений синхронной машины. Уравнения Парка-Горева	71
2.3. Установившийся симметричный режим работы синх- ронной машины	75
2.4. Особенности переходного режима синхронной ма- шины	77
2.5. Схемы замещения синхронной машины	78
2.6. Баланс магнитных потоков и векторная диаграмма начального момента КЗ	82

2.7.	Определение начального значения периодической составляющей тока трехфазного КЗ синхронного генератора	84
2.8.	Внезапное трехфазное КЗ синхронного генератора	87
2.9.	Влияние автоматического регулятора возбуждения на процесс КЗ	93
2.10.	Гашение магнитного поля синхронной машины	97
Глава третья.	Практические методы расчета трехфазного КЗ в сетях напряжением выше 1 кВ	101
3.1.	Общие указания о практических методах расчета токов КЗ	101
3.2.	Расчетные условия определения токов КЗ	102
3.3.	Системы расчетных единиц параметров переходных процессов	105
3.4.	Составление схемы замещения и определение параметров ее элементов	109
3.5.	Учет нагрузки	121
3.6.	Преобразования схем замещения	123
3.7.	Практические методы расчета периодических токов переходного процесса трехфазного КЗ	128
3.8.	Определение апериодической составляющей тока КЗ	141
3.9.	Определение ударного и полного токов КЗ	143
Глава четвертая.	Практические методы расчета трехфазного КЗ в сетях напряжением до 1кВ	154
4.1.	Особенности расчета токов КЗ	154
4.2.	Составление схемы замещения электрической сети и определение ее параметров	156
4.3.	Учет нагрузки в сети напряжением до 1 кВ	160
4.4.	Определение начального значения периодического тока КЗ	163
4.5.	Определение периодического тока КЗ в произвольный момент времени переходного процесса	165
4.6.	Определение апериодического тока КЗ	167
4.7.	Определение ударного тока КЗ	167
4.8.	Определение спада тока КЗ вследствие его теплового действия на проводник	168

Глава пятая.	Несимметричные КЗ в системах электроснабжения	175
5.1.	Виды несимметричных КЗ. Основы метода симметричных составляющих применительно к расчетам несимметричных КЗ	175
5.2.	Сопротивления прямой, обратной и нулевой последовательностей элементов СЭ	179
5.3.	Применение метода симметричных составляющих в расчетах несимметричных КЗ	194
5.4.	Двухфазное КЗ	197
5.5.	Однофазное КЗ	201
5.6.	Двухфазное КЗ на землю	206
5.7.	Двойное замыкание на землю	209
5.8.	Принцип эквивалентности прямой последовательности	211
5.9.	Влияние силовых трансформаторов на распределение токов несимметричных КЗ	214
5.10.	Влияние нагрузки на токи установившегося режима несимметричных КЗ	219
5.11.	Влияние нагрузки на токи двухфазных КЗ	223
5.12.	Влияние нагрузки на токи однофазных КЗ	229
5.13.	Влияние нагрузки на токи двухфазных КЗ на землю.	237
5.14.	Несимметричные КЗ в сложных системах электроснабжения промышленных предприятий	243
Глава шестая.	Продольная несимметрия в системах электроснабжения	250
6.1.	Виды продольной несимметрии. Применение метода симметричных составляющих для расчета продольной несимметрии	250
6.2.	Общий случай продольной несимметрии в СЭ	255
6.3.	Продольная несимметрия при силовой нагрузке	261
6.4.	Продольная несимметрия при статической нагрузке	269
6.5.	Продольная несимметрия при комплексной нагрузке	270
6.6.	Обрыв фазы силовых трансформаторов	273
Глава седьмая.	Замыкания на землю в сети с изолированной нейтралью	276
7.1.	Физические процессы при замыкании одной фазы	

на землю	276
7.2. Инженерный метод расчета токов замыкания на землю	287
7.3. Ограничение и компенсация тока замыкания на землю	293
7.4. Перенапряжения при однофазных замыканиях на землю и защита сетей	297
7.5. Двойное замыкание на землю в сети с изолированной нейтралью	303
Глава восьмая. Внутренние КЗ в электрических машинах и аппаратах	309
8.1. Некоторые статистические данные повреждаемости электрических машин и аппаратов	309
8.2. Витковые КЗ в однофазных обмотках	312
8.3. Трехфазные внутренние КЗ электродвигателей	314
8.4. Методика расчета несимметричных внутренних КЗ	320
8.5. Двухфазные внутренние КЗ в электродвигателях	323
8.6. Однофазные внутренние КЗ в электродвигателях	328
8.7. Однофазные витковые КЗ в силовых трансформаторах	332
8.8. Некоторые выводы по внутренним КЗ электрических машин и аппаратов	338
Глава девятая. Применение вычислительной техники в расчетах токов КЗ	341
9.1. Расчет токов КЗ в разомкнутых сетях промышленных предприятий	341
9.2. Расчет токов КЗ в замкнутых электрических сетях	346
9.3. Программы расчета токов КЗ на программируемых микрокалькуляторах	353
Приложение 1. Сопротивления линий электропередачи, трансформаторов, аппаратов и электродвигателей	366
Приложение 2. Расчетные кривые для определения токов КЗ в цеховых сетях	381
Приложение 3. Зарядные и емкостные токи замыкания на землю некоторых кабелей	384
Приложение 4. Расчет двух одновременных КЗ на подстанции с короткозамыкателем	385

Предисловие

Электромагнитные переходные процессы в системах электроснабжения (СЭ) промышленных предприятий имеют ряд специфических особенностей, на которые при проектировании и эксплуатации СЭ следует обратить внимание. Одна из них - специфичность токораспределения при несимметричных коротких замыканиях (КЗ). Так, если в сетях энергосистем отношение токов двух- и трехфазного КЗ принимается $\frac{\sqrt{3}}{2} = 0,866$, в сетях же промышленных предприятий под влиянием токов продольной нагрузки¹ это отношение нередко искажается до $\pm 20 \div 25\%$ при отсутствии емкостной компенсации сети и до $\pm 40 \div 45\%$ при наличии такой компенсации [6, 45]. В результате этого максимальный ток одной из поврежденных фаз превышает ток трехфазного КЗ, а в другой - снижается до 0,5-0,6 этого тока. Неучет подобных искажений может привести к отказам и неселективным действиям устройств релейной защиты. Поэтому не случайно, что для рудничных сетей, например, напряжением до 1 кВ отношение токов двух- и трехфазного КЗ принято 0,6-0,7 [6].

Специфичны в сетях до 1 кВ также однофазные КЗ. При наличии силовых трансформаторов с соединением обмоток Δ / Y_0 , Y / Y_0 , Y / Z_0 помимо сопротивлений самих трансформаторов в зависимости от способа заземления нейтралей, сечения и заземления нулевого провода, конструкции кабелей и шинопроводов, в широких пределах колеблются сопротивления нулевой последовательности, т.е. всего контура КЗ. В большой степени здесь на токи КЗ оказывают влияние токи нагрузки.

Нуждаются в детальном рассмотрении режимы продольной несимметрии сетей до 1 кВ. Это допустимые нагрузки электроприемников, токораспределение полных токов и напряжений и их симметричных составляющих, способы индикации повреждения и т.д. В отличие от сетей энергосистем, где коэффициенты несимметрии напряжения и тока практически одинаковы, в сетях напряжением

¹ Здесь и далее продольной названа нагрузка, включенная последовательно к точке КЗ, а поперечной - включенная параллельно (см. например, рис. 5.24,а).

до 1 кВ связь этих коэффициентов неоднозначна. Она зависит от параметров сети и нагрузки, характера несимметрии их фазных сопротивлений. В результате коэффициент несимметрии тока в этих сетях может быть и меньше, и больше коэффициента несимметрии напряжения. В то же время потери активной мощности в кабельных и воздушных сетях и трансформаторах в несимметричных режимах пропорциональны квадрату коэффициента несимметрии по току, тогда как потери в электродвигателях, обуславливающие нагрев и сокращение срока службы их, пропорциональны квадрату коэффициента несимметрии напряжения. При номинальной нагрузке электродвигателя и коэффициенте несимметрии напряжений, равном 4%, например, срок службы изоляции сокращается примерно в 2 раза [4, 22, 46]. Поэтому установление функциональной связи между коэффициентами несимметрии напряжения и тока с целью снижения ущерба, обусловленного появлением дополнительных потерь в элементах СЭ, сокращением срока службы электрооборудования и снижением экономических показателей его работы является важной практической задачей.

Специфичны также вопросы учета спада токов КЗ под влиянием нагрева токопроводников в электроустановках напряжением до 1 кВ СЭ промышленных предприятий, учета дуги в цепи КЗ [11, 16].

Материал книги изложен с учетом приведенных особенностей СЭ промышленных предприятий. Принято во внимание, что знание токов переходных процессов нужно не только для выбора и проверки коммутационных аппаратов, токоведущих элементов и других звеньев СЭ, но и, в не меньшей степени, для нужд релейной защиты.

Известно, что надежность работы устройства релейной защиты заключается в том, чтобы оно безотказно действовало при внезапно возникающих опасностях на защищаемой электроустановке (короткие замыкания, различные ненормальные режимы и т.д.) и, наоборот, не действовало ложно во всех остальных режимах, при которых работа защиты не предусмотрена (пуск электродвигателей, включение конденсаторных батарей, включение силовых трансформаторов и т.д.) [5, 6, 14]. Таким образом, устройства релейной защиты характеризуются двумя категориями надежности: на безотказность и на селективность. Первая категория надежности определяется минимальными токами несимметричных КЗ в конце зоны за-

щиты, а вторая — максимальными токами переходных процессов в нормальном режиме работы защищаемой электроустановки. В связи с этим наряду с методикой расчета максимальных токов КЗ дана методика расчета минимальных токов КЗ, а также методика расчета максимальных токов переходных процессов нормального режима таких электроустановок, как электродвигатели, силовые трансформаторы, конденсаторные батареи.

Теоретические вопросы в книге иллюстрируются решением конкретных примеров. Для удобства пользования дан некоторый справочный материал, что облегчит решение конкретных инженерных задач, приведены алгоритмы и программы расчета токов КЗ на персональных ЭВМ и микрокалькуляторах.

Главы 1, 5, 6, 8 написаны Г. Г. Гимояном, главы 3, 4 - Л. В. Егиазаряном, главы 2, 7 - В. И. Саакяном, глава 9 и приложения совместно Л. В. Егиазаряном и В. И. Саакяном.

Замечания и предложения по книге просьба направить по адресу: 375047, Армения, Ереван, ул. А. Арменакян, 127, ЗАО "Институт энергетики".

Авторы выражают благодарность рецензенту книги канд. тех. наук, доценту Московского энергетического института С.И. Гамазину за тщательный просмотр рукописи книги и замечания и пожелания к ней, учтенные авторами.

Авторы