Цель работы: Научить будущих техников-электриков производить расчёт токов короткого замыкания, для последующего выбора и проверки коммутационных аппаратов.

Краткие теоретические сведения:

При проектировании систем электроснабжения должны учитываться не только нормальные режимы работы электрооборудования, но и аварийные режимы, которые могут привести к повреждению электрооборудования. Аварийным режимом является короткое замыкание в системах электроснабжения.

Коротким замыканием (КЗ) называется всякое случайное или преднамеренное соединение токоведущих частей между собой или землёй, при котором в электрических цепях возникают токи, превышающие наибольший ток продолжительного режима в 100- 1000 и более раз.

Существуют следующие *виды коротких замыканий :*

- Трехфазное симметричное КЗ, при котором три фазы замыкаются

между собой;

- Двухфазное несимметричное КЗ, при котором две фазы замыкаются между собой;
- Однофазное несимметричное КЗ, при котором одна фаза замыкается на на нулевой провод или землю;

Трёхфазное КЗ является симметричным, потому что все фазы находятся в одинаковых условиях, другие виды КЗ являются несимметричные, потому что условия фаз неодинаковы и трёхфазная система искажается. Из всех возможных видов коротких замыканий наиболее часто возникают однофазные короткие замыкания (60-90 % от общего числа всех КЗ), потому что повреждение изоляции одной фазы возникает значительно чаще, чем повреждение изоляции всех фаз одновременно.

Причины возникновения КЗ могут быть устойчивыми и неустойчивыми.

К устойчивым причинам КЗ относятся:

- Неправильные действия оперативного персонала;
- Разрушение изоляции кабелей при выполнении земляных работ:
- Поломка фарфоровых изоляторов при механических повреждениях электрооборудования;

- Падение опор воздушных линий электропередач;
- Обрыв и падение проводов воздушных линий электропередач;
- Старение и износ изоляции при неправильной эксплуатации электрооборудования;

К неустойчивым причинам КЗ относятся:

- Схлестывание проводов воздушных линий электропередач при сильном ветре;
- Перекрытие фаз птицами на опорах воздушных линий электропередач;
- Перекрытие фаз при атмосферных перенапряжениях;
- Увлажнение фарфоровой изоляции вовремя дождя;
- Различные наброс на провода воздушных линий электропередач;

Последствиями КЗ являются резкое увеличение тока в короткозамкнутой цепи, снижение напряжение в отдельных точках системы электроснабжения и в месте короткого замыкания возникает электрическая дуга.

1. Резкое возрастание тока в короткозамкнутой цепи, приводит к значительным механическим воздействиям (электродинамическое воздействие) на коммутационные аппараты, токоведущие части и изоляторы, а также при прохождении большого происходит чрезмерный нагрев (термическое воздействие) токоведущих частей и изоляции, что может привести к пожару в распределительных устройствах, в кабельных сооружениях и других элементах системы электроснабжения.

2. Резкое снижение напряжения приводит к затормаживанию асинхронных электродвигателей, потому что электромагнитный момент пропорционален квадрату подводимого напряжения и полезный момент может превысить электромагнитный момент вследствие чего, ток увеличивается и приводит к дальнейшему снижению напряжения. Наибольшее влияние оказывает снижение напряжения на параллельную работу синхронных генераторов вследствие чего, синхронные генераторы выходят из синхронизма, начинается колебание энергосистемы, что приводит к перенапряжениям и дальнейшему развитию аварии.

3. Дуга, возникающая в месте К.З. приводит к частичному или полному разрушению аппаратуры, то есть происходит обгорание контактов и поломка изоляторов токоведущих частей.

Величина тока КЗ зависит от следующих параметров электрической цепи:

- Мощности источника питания, чем больше генерируемая мощность питающей электростанции или энергосистемы, тем больше величина тока КЗ:
- Напряжения короткозамкнутой электрической цепи, чем больше напряжение электрической цепи, тем меньше величина тока КЗ;
- Сопротивления короткозамкнутой электрической цепи, чем больше сопротивление электрической цепи, тем меньше величина тока КЗ;

Для уменьшения последствий КЗ необходимо выполнение следующих мероприятий:

- Быстрое отключение повреждённого участка путём применения быстродействующих выключателей и устройств релейной защиты и автоматики, имеющих минимальные выдержки времени;
- Применение на электростанциях для синхронных генераторов автоматического регулирования возбуждения с форсировкой системы возбуждения синхронных генераторов при коротком замыкании;
- Применение коммутационных аппаратов, которые выдерживают электродинамические и термические воздействия токов КЗ;

Учитывая последствия КЗ, возникает необходимость их расчёта для определения и выбора электрооборудования, коммутационных аппаратов, токоведущих частей, кабелей и изоляторов.

При возникновении трёхфазного КЗ в цепи переменного тока с активным и индуктивным сопротивлениями возникает переходной процесс изменения токов и напряжений, согласно первого закона коммутации, который гласит о том, что ток коммутации в индуктивности не изменяется до и после коммутации, а также то, что ток изменяется по экспоненциальному закону.

Полный ток КЗ состоит из 2 составляющих токов КЗ:

$I_{п.0.}$ – *ток периодической (вынужденной) составляющей тока КЗ*, которая изменяется с частотой, равной частоте напряжения источника питания;

$I_{а.0}$ - *ток апериодической (свободной) составляющей тока КЗ*, которая изменяется по экспоненциальному закону без перемены знака. Затухание апериодической составляющей тока КЗ происходит за счёт активного сопротивления короткозамкнутой цепи со скоростью, определяемой постоянной времени затухания апериодической составляющей тока КЗ, которая в свою очередь зависит от соотношения активного и индуктивного сопротивлений короткозамкнутой цепи.

Методика проведения расчёта токов КЗ в относительных единицах

Для расчёта токов КЗ необходимо произвести выбор всех элементов системы электроснабжения и должны быть выбраны принципиальные схемы подстанций, а также должны быть определены параметры энергосистемы.

По результатам расчёта питающих и распределительных электрических сетей и выбору трансформаторов составляется и вычерчивается расчётная схема для расчёта токов КЗ согласно выше приведённой методике.

Определяется базисная мощность ($S_б$) и средние напряжения ступеней напряжений расчётной схемы ($U_{ср\ ВН}$ и $U_{ср\ НН}$).

По расчётной схеме составляется и вычерчивается схема замещения, при этом расчёт сопротивлений должен производиться только в относительных единицах согласно выше приведённой методике.

Определяется результирующее сопротивление от источника питания до точки КЗ в относительных единицах по формулам:

результирующее активное сопротивление:

$$R_{к\text{-}1} = R_1 + R_2 + \ldots + R_i$$

результирующее индуктивное сопротивление:

$$X_{к\text{-}1} = X_1 + X_2 + \ldots + X_i$$

результирующее полное сопротивление:

$$Z_{к\text{-}1} = \sqrt{(R_{к-1})^2 + (X_{к-1})^2}$$

Определяется базисный ток КЗ для ступени напряжения $U_{ср\ ВН}$ в *кА* по формуле:

$$I_{б\text{-}ВН} = S_б / (\sqrt{3} * U_{ср\ ВН})$$

Определяется периодическая составляющая тока КЗ для ступени напряжения $U_{ср\ ВН}$ в *кА* по формуле:

$$I_{п0.к\text{-}1} = I_{б\text{-}ВН} / Z_{к\text{-}1}$$

Определяется постоянная времени затухания апериодической составляющей токов КЗ в *секундах* по формуле:

$$T_а = X_к / (2*\pi*f*R_к)$$

Определяется ударный коэффициент для точки КЗ по формуле:

$$К_{уд} = 1 + e^{-0{,}01/Ta}$$

или определяется по справочной литературе в зависимости от места короткого замыкания и из двух значений ударного коэффициента выбирается наибольшее значение, которое впоследствии принимается за окончательное значение ударного коэффициента КЗ.

Определяется ударный ток КЗ в *кА* для данной точки КЗ по формуле:

$$i_{уд} = \sqrt{2} * K_{уд} * I_{п0.к-1}$$

Аналогично производится расчёт для других точек КЗ, но при этом необходимо учитывать, что на каждой ступени напряжения определяется базисный ток КЗ и периодическая составляющая тока КЗ, а также определяется место КЗ и ударный коэффициент затем все результаты расчёта сводятся в итоговую таблицу:

Точка КЗ	Uб, кВ	Uср, кВ	Rк, мОм	Xк, мОм	Zк, мОм	Iп0. кА	Та, сек	Куд	iуд, кА
К-1									
К-2									

Справочные данные

УДЕЛЬНЫЕ АКТИВНЫЕ И ИНДУКТИВНЫЕ СОПРОТИВЛЕНИЯ КАБЕЛЕЙ				
2,5	7,4	12,5	0,104	0,116
4	4,63	7,81	0,095	0,107
6	3,09	5,21	0,09	0,1
10	1,84	3,12	0,073	0,099
16	1,16	1,95	0,0675	0,095
25	0,74	1,25	0,0662	0,091
35	0,53	0,894	0,0637	0,088
50	0,37	0,625	0,0625	0,085
70	0,265	0,447	0,0612	0,082
95	0,195	0,329	0,0602	0,081
120	0,154	0,261	0,0602	0,08
150	0,124	0,208	0,0596	0,079
185	0,1	0,169	0,0596	0,078
240	0,077	0,13	0,0587	0,077

УДЕЛЬНЫЕ ИНДУКТИВНЫЕ СОПРОТИВЛЕНИЯ ВОЗДУШНЫХ ЛИНИЙ				
	Напряжение ВЛ			
	до 1000 В	6-10 кВ	35 кВ	110кВ
от 10 до 25	0,36	0,41	не применя-ются	не применяются
от 35 до 70	0,33	0,38	0,42	0,4
от 95 до 120	0,3	0,35	0,4	0,32
от 150 до 240	не применя-ются	не применя-ются	0,32	0,28

Значения постоянной затухания Та и ударный коэффициент Ку			
№	**Место короткого замыкания**	**Та, сек**	**Ку**
1	Высоковольтная сеть без учёта активного сопротивления	-	1,8
2	Выводы явнополюсного гидрогенератора без успокоительной обмотки	0,2	1,95
3	Выводы явнополюсного гидрогенератора с успокоительной обмоткой	0,13	1,93
4	Выводы турбогенератора мощностью от 12 до 60 МВт	0,16-0,25	1,94-1,955
5	Выводы турбогенератора мощностью от 100 до 1000 МВт	0,4-0,54	1,975-1,98
6	За блоком генератор-трансформатор при мощности генератора до 60 МВт	0,15	1,935
7	За блоком генератор-трансформатор при мощности генератора до 100-200 МВт	0,26	1,965
8	За блоком генератор-трансформатор при мощности генератора 300 МВт и более	0,32	1,977
9	За воздушными линиями электропередач напряжением 35-110кВ	0,02	1,608
10	За воздушными линиями электропередач напряжением 220кВ	0,03	1,717
11	За понижающим трансформатором мощностью 80000кВА и более	0,06	1,85
12	За понижающим трансформатором мощностью 32000-63000кВА	0,05	1,82
13	За понижающим трансформатором мощностью 4000 - 32000кВА	0,045	1,8
14	Распределительные сети напряжением 6-10кВ	0,01	1,369
15	За понижающим трансформатором мощностью 1600 - 2500кВА	0,011	1,4
16	За понижающим трансформатором мощностью 630 - 1000кВА	0,0083	1,3
17	За понижающим трансформатором мощностью 100 - 400кВА	0,0062	1,2
18	Удалённая точка с учётом активного сопротивления в сетях до 1000 В	0,001	1,0