

зависимо от схемы соединения обмоток силового трансформатора, а компенсацию фазового сдвига производить программным путём.

В режиме внешнего КЗ наличие дифференциального тока обусловлено неточным выравниванием токов намагничивания, изменением коэффициента трансформации силового трансформатора под нагрузкой, насыщением трансформаторов тока и т. д.

Таким образом, при насыщении трансформаторов тока в режиме внешнего КЗ отношение $\frac{I_5}{I_1}$ может быть велико (рисунок 5а) и это приводит к блокировке защиты, а, следовательно, к повышению надёжности отстройки защиты от внешних КЗ.

Таким образом, при контроле ПВ по пятой гармонике необходимо учитывать:

– схемы соединений трансформаторов тока (ТА) в трехфазные группы. При соединении ТА по схеме «звезда-звезда» вторичные токи в плечах дифференциальной защиты будут пропорциональны намагничивающим токам фаз трансформатора. При соединении вторичных обмоток ТА по схеме «треугольник» токи в плечах защиты будут пропорциональны разностям намагничивающих токов соответствующих фаз трансформатора, что приводит к изменению гармонического состава токов;

– режим заземления нейтрали трансформатора;

– возможность контроля одного или всех линейных напряжений со стороны низшего напряжения трансформатора.

Литература

1. Засыпкин, А.С. Релейная защита трансформаторов. – М.: Энергоатомиздат, 1989. – 240 с.
2. Дьяков, А.Ф., Овчаренко, Н.И. Микропроцессорная релейная защита и автоматика электроэнергетических систем. – М.: Издательство МЭИ, 2000. – 199 с.
3. Гловацкий, В.Г., Пономарев, И.В. Современные средства релейной защиты и автоматике электросетей. – 3 электронная версия. – Киев: Энергомашвин, 2003. – 535 с.
4. Дифференциальная защита 7UT613, версия 4.0. Руководство по эксплуатации. – Siemens, 2003. – 498 с.
5. Микропроцессорное устройство основной защиты двухобмоточного трансформатора «Сириус-Т». Руководство по эксплуатации. – М.: ЗАО «РАДИУС Автоматика», 2005. – 68 с.
6. Арсентьев, А.П., Дмитренко, А.М., Проказов, С.Н. Системы дифференциальных защит в решениях «АББ Автоматизация». – ООО «АББ Автоматизация», 2003.
7. Терминал защиты трансформатора RET 521*RU. Руководство по эксплуатации. – ABB, 2004.

УДК 621.315

УПРОЩЕННЫЙ РАСЧЕТ МАКСИМАЛЬНЫХ ТЯЖЕНИЙ ПРОВОДОВ ПРИ КОРОТКОМ ЗАМЫКАНИИ

Сазонов И.Е., Ефремов П.В., Андрукевич А.П.

Научный руководитель – д-р техн. наук, профессор СЕРГЕЙ И.И.

Гибкие шины распределительных устройств (РУ) обладают существенной гибкостью и могут принимать форму, обусловленную действием распределенных электродинамических усилий (ЭДУ), возникающих при КЗ. Поэтому динамика гибких шин в общем случае описывается с использованием расчетной модели гибкой нити с распределенной по длине массой. Движение гибкой нити под воздействием распределенных нагрузок описывается дифференциальными уравнениями второго порядка в частных производных. Получить решение таких уравнений можно лишь численными методами. Алгоритмы решения таких уравнений реализованы в ряде коммерческих программ.

При компьютерных расчетах большое количество времени тратится на сбор исходных данных, а также на анализ результатов расчета. В результате получается только одно частное решение уравнений. В проектной практике целесообразно применение упрощенных методов расчета параметров электродинамической стойкости гибких шин, реализованных в виде простых формул и таблиц. Практика применения упрощенных методик одобрена в международном и межгосударственном стандартах [1, 2].

К параметрам электродинамической стойкости относятся максимальные отклонения и тяжения проводов. Методика для определения этих параметров была предложена российскими учеными Б.Н. Неклепаевым, В.П. Кудрявцевым и А.П. Долиным. Их методика была использована при разработке нового российского ГОСТа. Но формула для расчета максимальных тяжений, предложенная ими, пригодна лишь для ориентировочных расчетов, так как дает значительное расхождение при сравнении с опытными данными.

В статье излагается упрощенный метод расчета максимальных тяжений в гибких шинах РУ, основанный на представлении провода физическим маятником и составленных для него формулах энергетического баланса во время и после КЗ. В осциллограмме тяжения провода при и после КЗ выделяются два характерных максимума. Один из них наступает в момент времени, когда провода при их отталкивании подвергаются максимальному растяжению под действием ЭДУ $T_{2\max}$. После отключения КЗ в момент сближения проводов появляется еще один максимум тяжения, так называемый третий максимум $T_{3\max}$, который имеет большую величину. В зарубежной практике он называется максимальным тяжением при падении проводов и имеет наибольшее значение $T_{3\max\text{ НБ}}$, когда вся накопленная токоведущими конструкциями потенциальная энергия при и после КЗ $E_{п\max}$ преобразуется в энергию упругих деформаций проводов и опор E_y (рисунок 1).

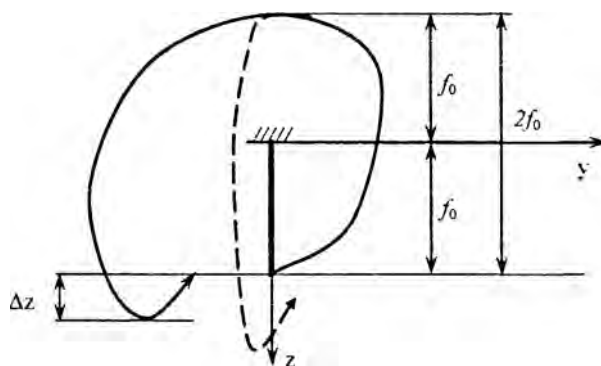


Рисунок 1. К определению тяжения

Существует еще один максимум тяжения $T_{1\max}$, когда под действием внутрифазных усилий происходит максимальное удлинение составляющих проводов расщепленной фазы. В данной статье динамика тяжений в расщепленной фазе не рассматривается.

Для учета той части кинетической энергии провода, которая расходуется на его упругие деформации, вводится поправочный коэффициент $k_{п}$, который определяется с помощью вычислительного эксперимента и опытных данных. В первом приближении $k_{в} = \frac{2}{3}$. Выражение для расчета максимального тяжения на стадии отталкивания проводов при КЗ

$$T_{2\max} = \sqrt{T_0^2 + 0,3K_{\text{оп}} \frac{EA}{IK_{\text{оп}} + EA} \left(\frac{k_n S^{(2)}}{\rho l} \right)^2}.$$

При рассмотрении упрощенной модели пролета с абсолютно жесткими опорами ($K_{\text{оп}} \rightarrow \infty$) получаем формулу

$$T_{2\max} = \sqrt{T_0^2 + 0,3 \frac{EA}{\rho} \left(\frac{k_n S^{(2)}}{l} \right)^2}.$$

Величина наибольшей потенциальной энергии провода имеет место при максимальном угле отклонения его плоскости, равном 180° , когда $h + h_k = 2f_0$ [3], где h и h_k – соответственно высоты подъема средней точки провода после отключения и в момент отключения КЗ, м. Тогда

$$T_{3\max} = \sqrt{T_0^2 + \frac{3}{4} EA \rho g (h + h_k)} \cong \sqrt{T_0^2 + 13,1 EA \rho (h + h_k)}.$$

Важным параметром при определении максимальных тяжений является модуль упругости провода. Модуль упругости витого провода следует принимать меньшим модуля упругости материала проводника, так как он состоит из отдельных волокон материала и обладает повышенной растяжимостью при воздействии нагрузки. Комитетом СИГРЭ были проведены опытные исследования проводов марки ACSR различных сечений с целью определения реальных значений модуля упругости [1]. Анализируя графики СИГРЭ, можно принять

$$\frac{E_S}{E} = 0,6,$$

где E – модуль упругости материала провода;

E_S – то же витых гибких проводов ОРУ.

Поэтому в расчетах для получения более точных результатов следует принимать значения модуля E_S .

Для подтверждения справедливости полученных выражений для тяжения производятся расчеты характерных максимумов тяжений для опытного пролета длиной 36 м [4]. Результаты расчетов сравниваются с опытными данными. Также приводятся сопоставления результатов расчетов с теми же исходными данными по методике СИГРЭ и по компьютерной программе BusEF, разработанной на кафедре «Электрические станции», которая позволяет получить точные численные решения уравнений динамики проводов при КЗ.

Погрешность при расчетах второго максимума тяжений $T_{2\max}$ не превышает 30 %, что является допустимой погрешностью для упрощенных методов расчета динамики проводов при КЗ. Результаты расчета $T_{3\max}$ как по методике БНТУ, так и по методике СИГРЭ значительно отличаются от результатов точных численных решений. Чтобы повысить точность расчетов на данном этапе, вводится поправочный коэффициент

$$k_{T_3} = \frac{T_{3\max(\text{КП})}}{T_{3\max}},$$

где $T_{3\max(\text{КП})}$ и $T_{3\max}$ – соответственно третий относительный максимум тяжения, определяемый по компьютерной программе BusEF и по приближенному методу БНТУ.

Проведенные упрощенные расчеты максимальных тяжений с учетом поправочных коэффициентов показали, что точность их оценки значительно увеличилась.

Литература

1. The Mechanical Effects of Short-circuit Currents Open-air Substations (Rigid or Flexible Bus-bars). Brochure from CIGRE. SC 23. – Paris, 1996.
2. ГОСТ 30323-95. Короткие замыкания в электроустановках: методы расчета электродинамического и термического действия токов короткого замыкания. – Введ. 01.03.1999. – Минск, 1999. – 57 с.
3. Сергей, И.И., Пономаренко, Е.Г., Саммур, В.М. Упрощенный метод расчета сближения проводов с учетом конструктивных элементов распределительных устройств при двухфазном коротком замыкании // Энергетика... (Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ). – 2004. – № 2. – С. 5–11.
4. Landin, I., Lindquist, C.J., Bergstrom, L.R., Cullen, G.R. Mechanical Effects of High Short-circuit Currents in Substations // IEEE Transactions of Power Apparatus and Systems. – 1975. – P. 1657–1665.

УДК 621.316

МЕТОДЫ РАСЧЕТА ПАРАМЕТРОВ ЗАЗЕМЛЯЮЩИХ УСТРОЙСТВ

Дерюгина Е.А.

Научный руководитель – канд. техн. наук **ГЕРАСИМОВИЧ Д.А.**

Исследования электрического поля и характеристик заземлителей с самого начала развития теории заземляющих устройств относились к категории достаточно сложных задач электротехники. В основе всех разделов теории лежит модель системы «заземлитель – земля». Трудности усугубляются тем, что электрическая структура верхних слоев земли, в которой располагаются заземлители, имеет существенно неоднородное и изменяющееся во времени (по сезонам) удельное электрическое сопротивление. Степень его неоднородности зависит от многих факторов: вида почв, почвообразующих и геологических пород, колебаний уровней грунтовых вод, количества выпадающих осадков, температуры и влажности воздуха, характера растительности, хозяйственной деятельности людей и др.

Однако, как показали многочисленные геофизические изыскания, в пределах ограниченных площадок с линейными размерами в несколько сотен метров [1], т. е. в несколько раз превосходящих обычные линейные размеры большинства заземлителей в плане, электрическая структура земли в большинстве случаев имеет вид четко выраженных слоев с различной удельной проводимостью и практически горизонтальными границами. При этом в горизонтальном направлении электрическая проводимость γ обычно изменяется незначительно. С учетом указанных особенностей электрической структуры верхних слоев земли в теории заземляющих устройств: в основном используют расчетные модели земли в виде полупространства со слоистой электрической структурой. Принимают, что в пределах каждого слоя удельная проводимость однородна (одинакова), а границы между слоями – плоскости, параллельные границе полупространства. Число слоев расчетной модели зависит, с одной стороны, от особенностей электрической структуры конкретной площадки, на которой предполагают разместить заземлитель, а с другой – от имеющегося математического обеспечения.

Наименьшие математические трудности возникают при прочих равных условиях, когда все проводящее полупространство принимают однородным (однослойным). Использование подобной модели и хорошо известных методов теории поля позволило к концу 20-х годов глубоко проанализировать установившиеся (квазистационарные) электрические поля простых одиночных заземлителей и наметить методы исследования и расчета электрических полей сложных заземлителей, состоящих из нескольких электродов, в частности метод определения взаимного потенциального влияния их электродов. Обобщение всех основных работ в области теории и практического использования