

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

заземляющих устройств было сделано в середине 20-х годов Ф. Оллендорфом в монографии «Токи в земле» [1]. Модель до сих пор имеет весьма важное не только методическое, но и практическое значение в инженерных методах расчета заземлителей.

При применении двухслойных [1, 2] и особенно многослойных моделей [3–5] электрической структуры земли в задачах математического моделирования электрического поля заземлителя математический аппарат значительно усложняется, а объем необходимой вычислительной работы возрастает на несколько порядков. Зато уменьшение ошибок при определении электрических характеристик и конструктивных параметров заземлителей окупает затраты труда, связанные с разработкой методов расчета и непосредственно с расчетом заземлителей.

Строгие математические методы решения задачи об электрическом поле и основных характеристиках простых заземлителей разработаны лишь для немногих частных случаев их геометрии, например для некоторых тел вращения с осью, перпендикулярной поверхности земли: полусфера, вытянутый и сплюснутый эллипсоид, тор. При этом принимают следующие основные допущения [1]:

- ток промышленной частоты, выходящий из заземлителя в землю при любых электрических процессах в системе электроснабжения, за исключением импульсных, вызванных грозовыми разрядами, считают установившимся;

- с учетом относительно высокого удельного сопротивления земли пренебрегают индуцированными в земле ЭДС по сравнению с активным падением напряжения и рассматривают электрическое поле тока в земле как стационарное (квазистационарное), т. е. как поле постоянного тока;

- заземлитель – идеальный сосредоточенный, следовательно, потенциал ϕ одинаков по всей его поверхности;

- земля – изотропное полупространство с неоднородной удельной проводимостью γ (с неоднородным удельным сопротивлением ρ).

Установившееся электрическое поле тока промышленной частоты, выходящего из сосредоточенного заземлителя в землю, описывают дифференциальным уравнением, выражающим принцип непрерывности электрического тока, граничным условием и условием сопряжения

$$\operatorname{div} \vec{J} = -\operatorname{div}(\gamma \operatorname{grad} \phi) = 0,$$

где \vec{J} – вектор плотности электрического тока.

Первым был применен метод, основанный на использовании естественной системы координат [6]. Введение естественных координат – математический метод, имеющий, однако, сравнительно узкую область применения. Использование естественных координат возможно лишь тогда, когда заранее известны геометрические параметры эквипотенциальных поверхностей во всей области существования электрического поля заземлителя, начиная от его поверхности. Это обстоятельство и ограничивает возможное применение метода естественных координат лишь простыми заземлителями, имеющими форму гладких тел вращения.

Второй метод основан на замене заземлителя множеством (совокупностью) точечных источников тока и таким подбором их тока, при котором одна из эквипотенциальных поверхностей результирующего электрического поля, рассчитываемого методом наложения, будет иметь точно такую же форму, как и поверхность заземлителя [1]. Тогда в соответствии с теоремой единственности электрические поля заземлителя и множества точечных источников оказываются совершенно одинаковыми. Область применения второго метода, так же как и первого, ограничена простыми заземлителями в виде гладких тел вращения, однако с меньшими ограничениями по расположению заземлителей относительно поверхности земли. В частности, с помощью второго метода

могут быть найдены электрические поля токов, стекающих со стержневых горизонтального и вертикального заземлителей, не выходящих на поверхность земли.

Строгие математические методы решения задачи об электрическом поле сложных заземлителей отсутствуют. Это связано прежде всего с формой заземлителей, обуславливающей трехмерность задачи: потенциал является функцией всех трех координат при весьма громоздком математическом описании поверхности сложных заземлителей.

Применительно к сложным заземлителям был разработан и получил полное теоретическое обоснование метод наведенного потенциала [1], включавший в качестве частных случаев известные методы среднего потенциала и потенциала в характерной точке. Суть этого метода в задании или приближенном расчете распределения плотности тока на поверхности заземлителя и последующем расчете потенциала в заданных точках земли. Метод применяют при расчете электрического поля и характеристик сложных и простых заземлителей, работающих в однородной, двухслойной и многослойной земле.

Используют также конечно-разностные методы (методов сеток) для расчета электрического поля заземлителей, расположенных в земле с многослойной электрической структурой [7]. Применение этих методов для расчета электрических характеристик заземлителей, работающих в земле с неоднородной электрической структурой, разрабатывала под руководством Меньшова Б.Г. группа специалистов применительно к зоне многолетнемерзлых грунтов [1].

Разрабатываются также методы расчета электрических характеристик неэквипотенциальных заземлителей. Эта задача впервые была решена в работах Яковса А.И. [1] на основе последовательного применения метода наведенного потенциала для определения удельной «поперечной» проводимости горизонтальных элементов и методов расчета разветвленных электрических цепей с распределенными электрическими параметрами. Аналогичные методы расчета предложены в работах Карякина Р.К. [8], Слышалова В.К., Слышалова А.В., Киселевой Ю.А. [9, 10] и Нестерова С.В. [11].

Параллельно с общей теорией заземляющих устройств развивались и приближенные инженерные методы их расчета – метод коэффициентов использования, метод обобщенных параметров и др. [1].

Аналитическое исследование переходных процессов при протекании по заземляющим устройствам импульсных токов, вызванных при ударах молнии и коммутациях, связано с большими математическими трудностями, обусловленными также необходимостью учитывать распределенные электрические параметры заземлителей, явление поверхностного эффекта, резкую нелинейность удельного сопротивления земли при искрообразовании и др. Имитационное моделирование также отличается значительной сложностью как самих экспериментальных установок, так и техникой выполнения эксперимента и обработкой его результатов.

В общем случае заземлитель при прохождении импульсных токов представляет собой совокупность элементов, содержащих активную и емкостную проводимость грунта, активное и индуктивное продольное сопротивление. Задача расчета оказывается при этом очень сложной, особенно если учитывать нелинейную зависимость активной проводимости от напряжения. Решение получают с помощью уравнений длинных линий с распределенными постоянными или путем приведения их к П-образным схемам замещения. При этом учитывается различие активной проводимости в начале (место входа тока) и в конце заземлителя. Подобные задачи возникают для заземлителей очень больших размеров. В большинстве практических случаев они могут рассматриваться как сосредоточенные, когда нет необходимости учитывать продольное активное и индуктивное сопротивление, и задача сводится к учету ионизации и пробоя грунта около электродов.

Много работ в теории заземляющих устройств при протекании импульсных токов разработано в научной школе в области техники высоких напряжений, сложившейся в 50–70-х годах в Московском энергетическом институте [12].

Численные методы исследования были разработаны применительно к сосредоточенным и горизонтальным протяженным заземлителям в работах Рябковой Е.Я., Анненкова В.З. [12, 13], Кузнецова М.Б., Матвеева М.В. [14].

Разработаны методы расчета импульсных сопротивлений, основу которых положена динамическая модель развития ионизации в грунте под действием импульсного тока [15].

Важные результаты в имитационном моделировании были получены Рябковой Е.Я. [12] и послужили основой для современных таблиц так называемых импульсных коэффициентов сопротивления заземлителей, позволяющих переходить от значения их сопротивления в установившемся режиме к значению в импульсном режиме. Так же результаты получены Раковым В.А., Уманом М.А. и др. [16], Борисовым Р.К., Смирновым М.Н., Коломиец Е.В., Янковским Б.Д. [17].

Литература

1. Бургсдорф, В.В., Якобс, А.И. Заземляющие устройства электроустановок. – М.: Энергоатомиздат, 1987. – 400 с.
2. Tagg, G.F. Earth resistance. – London U.K.: George Newnes Ltd., 1964.
3. Takahashi, T. Analysis of apparent resistivity in a multi-layer earth structure / T. Takahashi, T. Kawase // IEEE Trans. Power Del. – 1990. – Vol. 5, № 1. – P. 604–612.
4. Takahashi, T. Calculation of earth resistance for deep-driven rod in multi-layer earth structure / T. Takahashi, T. Kawase // IEEE Trans. Power Del. – 1990. – Vol. 6, № 1. – P. 608–614.
5. Gonos, I.F. Estimation of multilayer soil parameters using genetic algorithms / I.F. Gonos, I.A. Stathopoulos // IEEE Trans. Power Del. – 2005. – Vol. 20, № 1. – P. 100–106.
6. Смайт, В.С. Электростатика и электродинамика. – М.: Изд-во иностр. лит., 1954. – 604 с.
7. Güemes, J.A. Method for calculating the ground resistance of grounding grids using FEM / J.A. Güemes, F.E. Hernando // IEEE Trans. on Power Del. – 2004. – Vol. 19, № 2. – P. 595–600.
8. Карякин, Р.Н. Электромагнитные процессы в протяженных заземлителях в неоднородных структурах / Р.Н. Карякин // Электричество. – 1996. – № 7. – С. 43–51.
9. Слышалов, В.К. Полевая и цепная модели волновых процессов в протяженном заземлителе / В.К. Слышалов, П.В. Голов, Ю.А. Киселева, И.В. Тимофеева // Вестник ИГЭУ. – 2006. – Вып. 2. – С. 50–58.
10. Слышалов, В.К. Электромагнитное поле протяженного заземлителя, проложенного параллельно границе раздела воздух-грунт / В.К. Слышалов, Ю.А. Киселева // Вестник ИГЭУ. – 2005. – Вып. 1. – С. 62–69.
11. Нестеров, С.В. Применение интегральных уравнений для расчета заземлителя произвольной конфигурации в неоднородном грунте / С.В. Нестеров // Вторая Российская конференции по заземляющим устройствам: сборник докладов. – Новосибирск, 2005. – С. 51–58.
12. Рябкова, Е.Я. Заземления в установках высокого напряжения. – М.: Энергия, 1978. – 224 с.
13. Анненков, В.З. Метод расчета импульсного сопротивления стержневого заземлителя в песчаном грунте / В.З. Анненков // Электричество. – 1995. – № 6. – С. 14–21.
14. Кузнецов, М.Б. Численное моделирование процесса растекания тока молнии по заземляющему устройству здания: сравнение результатов эксперимента и расчетов / М.Б. Кузнецов, М.В. Матвеев // Вторая Российская конференции по заземляющим устройствам: сборник докладов. – Новосибирск, 2005. – С. 99–106.
15. Wang, J. Extension of dynamic model of impulse behavior of concentrated grounds at high currents / J. Wang, A.C. Liew, M. Darveniza // IEEE Trans. Power Del. – 2005. – Vol. 20, № 3. – P. 2160–2165.
16. Rakow, V.A. New insights into lightning processes gained from triggered-lightning experiments in Florida and Alabama / V.A. Rakow, M.A. Uman, K.J. Rambo, M.I. Fernandez, R.J. Fisher, G.H. Schnetzer, R. Thottappillil, A. Eybert-Berard, J.P. Berlandis, P. Lalande, A. Bonamy, P. Laroche and A. Bondiou-Clergerie // J. Geophys. Res. – 1998. – Vol. 103, № D12. – P. 14.117–14.130.
17. Борисов, Р.К. Экспериментальные исследования импульсных характеристик заземляющих устройств / Р.К. Борисов, М.Н. Смирнов, Е.В. Коломиец, Б.Д. Янковский // Вторая Российская конференции по заземляющим устройствам: сборник докладов. – Новосибирск, 2005. – С. 107–113.