

РАСЧЕТ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ПОЛЯ ГЛУБИННОГО ВЕРТИКАЛЬНОГО ЗАЗЕМЛИТЕЛЯ

Е. А. Дерюгина

Белорусский национальный технический университет, г. Минск

Научный руководитель Д. А. Герасимович

Оборудование различного назначения на территории электроустановки с помощью заземляющих проводников присоединяется к искусственному заземлителю, который для этих целей сооружается в зоне расположения электроустановки. По конструктивному исполнению искусственный заземлитель имеет две основные части: заземляющую сетку, сооружаемую в зоне расположения оборудования и состоящую из продольных и поперечных заземлителей, и контурный заземлитель, который сооружается вне заземляющей сетки. К искусственному заземлителю присоединяются все естественные заземлители, которыми чаще всего являются грозозащитные тросы линий электропередач, включая заземленные грозозащитные тросы на подходах к подстанциям 35 кВ (система «трос-опоры»); отходящие от электроустановки кабели с металлическими покровами (оболочки, экраны); металлические трубопроводы, не содержащие горючих материалов, и другие электропроводящие коммуникации, проложенные в земле.

Совокупность искусственного заземлителя, естественных заземлителей и заземляющих проводников называется заземляющим устройством.

Заземляющие устройства электрических станций и подстанций служат для выполнения защитных и рабочих функций, к которым относятся [1]:

- обеспечение электробезопасности;
- заземление нейтрали трансформаторов, автотрансформаторов, шунтирующих и дугогасящих реакторов и других аппаратов высокого и низкого напряжения;
- создание цепи тока для защиты от замыканий на землю;
- ввод в землю импульсных токов с молниеотводов, ограничителей перенапряжения и разрядников;
- обеспечение защиты надземных и подземных коммуникаций от повреждения токами однофазных коротких замыканий и однофазных замыканий на землю.

Выполнение заземляющих устройств электроустановок различных напряжений наиболее экономично, когда искусственный заземлитель выполняется в пределах ограды электроустановки. Расширение искусственного заземлителя за пределы ограды и его прокладка на глубине не менее 1 м вызывает увеличение стоимости заземляющего устройства. Во многих случаях необходимость расширения искусственного заземлителя обуславливается тем, что стандартные вертикальные заземлители (электроды) длиной до 5 м не всегда эффективно работают по отводу в землю тока. Объясняется это двумя причинами: условием промерзания грунта в зимний период и ограниченной длиной самого электрода.

Анализ результатов геоэлектрического разреза верхних слоев земли на электроэнергетических объектах Республики Беларусь для расчетных зимних условий показал, что грунты с повышенной проводимостью часто располагаются на глубине 5 м и более. При таких условиях в случае верхних слоев земли с низкой проводимостью эффективность работы стандартных электродов весьма низкая.

Указанную проблему решают путем применения глубинных вертикальных заземлителей. Целесообразность применения глубинных заземлителей в электросетевом строительстве обосновывается двумя основными факторами:

- такие заземлители могут достигать нижележащих слоев земли с низким удельным сопротивлением, что способствует снижению их сопротивления;
- сезонный коэффициент таких заземлителей при их длине 10 м и выше приблизительно равен 1.

Глубинные заземлители выполняются из цельных труб или в виде составных заземлителей, что позволяет производить погружение на глубину до 30 м.

Наиболее ответственным этапом процесса проектирования и эксплуатации заземляющих устройств является расчет его основных электрических параметров, при которых ЗУ удовлетворяет требованиям принятого нормирования, имеет необходимую долговечность и минимальные затраты на сооружение.

Большинство предлагаемых методов и моделей расчета заземляющих устройств электроустановок основывается на модели потенциала постоянного тока и сводятся к расчету активного сопротивления заземляющего устройства [2], [3]. В реальных условиях в заземляющих устройствах протекают переменные токи промышленной частоты и импульсные токи, вызванные разрядом молнии.

Для учета отмеченных факторов расчет электромагнитного поля глубинного вертикального стержневого заземлителя при протекании переменного тока промышленной частоты основан на системе уравнений Максвелла [4]. Расчет рассматривается на модели, которая состоит из самого глубинного вертикального стержневого заземлителя, переходного слоя растекания тока между землей и заземлителем и собственно земли. Каждому слою присущи свои электрические проводимости и магнитные проницаемости.

Распределение плотности тока в глубинном вертикальном заземлителе определяется суммой частного решения дифференциального уравнения распределения электромагнитного поля заземлителя и решения уравнения невязки [5]. В соответствии с отмеченным выражения распределения радиальной и вертикальной составляющих вектора плотности тока:

$$\sigma_{imr}(r, z) = \dot{\sigma}_{*imr}(r, z) + \Delta\sigma_{imr}(r, z);$$

$$\sigma_{imz}(r, z) = \dot{\sigma}_{*imz}(r, z) + \Delta\sigma_{imz}(r, z),$$

где $\dot{\sigma}_{*imr}(r, z)$ и $\dot{\sigma}_{*imz}(r, z)$ – частные решения дифференциального уравнения распределения электромагнитного поля заземлителя для радиальной и вертикальной составляющих плотности тока; $\Delta\dot{\sigma}_{imr}(r, z)$ и $\Delta\dot{\sigma}_{imz}(r, z)$ – величины плотности тока от невязки.

Частное решение уравнения распределения электромагнитного поля заземлителя позволяет представить составляющие вектора плотности тока в каждом слое при использовании разложения в ряды Дини и Фурье следующими выражениями:

$$\dot{\sigma}_{*imr}(r, z) = \sum_{k=1}^{\infty} \dot{\sigma}_{imr}^k(0) \cdot e^{p_{kr}z} \cdot J_0\left(\lambda_k \frac{r}{R_3}\right);$$

$$\dot{\sigma}_{*imz}(r, z) = \gamma_{zi} \frac{h-z}{h} \dot{E}_{imz}^0(0) + \gamma_{zi} \sum_{k=1}^{\infty} \dot{E}_{imz}^k(r) \sin(k\omega_k z),$$

где $\dot{\sigma}_{imr}^k$ и \dot{E}_{imz}^k – распределения k -х гармоник амплитуды плотности тока и напряженности электрического тока; h – длина заземлителя.

Величины плотности тока от невязки на границах раздела сред для радиальной и вертикальной составляющих вектора плотности тока определяются по следующим выражениям:

$$\Delta\dot{\sigma}_{imr}(r, z) = \sum_{k=1}^{\infty} \Delta\dot{\sigma}_{imr}^k(r) \cos(k\omega_z z);$$

$$\Delta\dot{\sigma}_{imz}(r, z) = \sum_{k=1}^{\infty} \Delta\dot{\sigma}_{imz}^k(0) e^{p'_{ik}z} J_0\left(\lambda_k \frac{r}{R_i - R_{i-1}}\right).$$

Определив распределение плотности тока, находим распределение напряженности магнитного поля. Для данной задачи напряженность магнитного поля имеет одну составляющую $\dot{H}_{im\varphi}$ и может быть получена или из горизонтальной или из вертикальной составляющей плотности тока. Здесь получим выражения через обе составляющие:

$$\dot{H}_{im\varphi}(r, z) = \dot{H}_{im\varphi}(r, 0) - \int_0^z \dot{\sigma}_{imr}(r, z) dz;$$

$$\dot{H}_{im\varphi}(r, z) = \dot{H}_{im\varphi}(0, z) + \frac{1}{r} \int_0^r r \dot{\sigma}_{imz}(r, z) dz = \frac{1}{r} \int_0^r r \dot{\sigma}_{imz}(r, z) dz.$$

Потери мощности и мощность магнитного поля в слое определяем по теореме Пойнтинга:

$$P_i + jP_{Mi} = \frac{1}{2} \oint_{S_i} [\vec{E}_{im} \vec{H}_{im}^*] dS = \frac{1}{2} \int_{R_{i-1}}^{R_i} \frac{\dot{\sigma}_{imr}(r, 0)}{\gamma_{ri}} \dot{H}_{im\varphi}^*(r, 0) \cdot 2\pi dr +$$

$$+ \frac{1}{2} \int_0^h \left(\frac{\dot{\sigma}_{imz}(R_i, z)}{z_i} \dot{H}_{im\varphi}^*(R_i, z) \cdot 2\pi R_i - \frac{\dot{\sigma}_{imz}(R_{i-1}, z)}{\gamma_{zi}} \dot{H}_{im\varphi}^*(R_{i-1}, z) \cdot 2\pi R_{i-1} \right) dz.$$

Потери мощности и мощность магнитного поля в целом для системы «заземлитель–земля»:

$$P = \sum_{i=1}^n P_i; P_M = \sum_{i=1}^n P_{Mi}.$$

Активное и внутреннее индуктивное сопротивление отдельных слоев и в целом системы «заземлитель – земля»:

$$R_i = \frac{2P_i}{I_m^2}; R = \frac{2P}{I_m^2}; X_{внутр i} = \frac{2P_{Mi}}{I_m^2}; X_{внутр} = \frac{2P_M}{I_m^2};$$

$$\dot{Z} = R + jX_{внутр}.$$

Полученные выражения позволяют проводить расчет распределения радиальной и вертикальной составляющих вектора плотности тока в каждом слое модели и определять области растекания токов в заземлителе, а также активные и индуктивные параметры заземляющих устройств.

Таким образом, разработанный численный метод может быть использован для решения инженерных задач, связанных с проектированием, расчетом и оценкой заземляющих устройств.

Л и т е р а т у р а

1. Правила устройства электроустановок. – Москва : Энергоатомиздат, 1987.
2. Бургсдорф, В. В. Заземляющие устройства электроустановок / В. В. Бургсдорф, А. И. Якобс. – Москва : Энергоатомиздат, 1987.
3. Рябкова, Е. Я. Заземления в установках высокого напряжения / Е. Я. Рябкова. – Москва : Энергия, 1978.
4. Тамм, И. Е. Основы теории электричества / И. Е. Тамм. – 9-е изд. – Москва : Наука, 1976.
5. Герасимович, Д. А. Электромагнитные процессы в уединенном вертикальном цилиндрическом заземлителе / Д. А. Герасимович, Е. А. Дерюгина // Компьютерные технологии в технике и экономике : сб. докладов междунар. науч. конференции : в. 2 ч. Ч. 2 / отв. ред. А. И. Шиянов. – Воронеж : Междунар. ин-т компьют. технологий, 2007. – С. 52–57.

ОТОБРАЖЕНИЕ СХЕМЫ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ СЕТИ НА ПЭВМ

М. А. Драко

Белорусский национальный технический университет, г. Минск

Научный руководитель О. А. Жерко

Одной из важнейших служб в электрических сетях энергосистем является диспетчерская служба, выполняющая функции управления и распределения потоками энергии. Необходимо отметить, что для районов электрических сетей объем исходной информации невелик и составляет порядка 40–90 распределительных линий (фидеров). В то же время для персонала ОДУ (оперативно диспетчерского управления) схема электрической сети может состоять из тысячи узлов и более, причем узлы являются свернутыми схемами электрических сетей более низкого номинального напряжения. Управление электрическими сетями персоналом диспетчерских служб осуществляется по текущим схемам, которые корректируются, «поддерживаются» и постоянно контролируются на диспетчерском щите.

В настоящее время диспетчерские щиты оснащаются современными средствами визуализированного контроля за режимной информацией (сигнальные диоды, электронные табло и т. д.) и являются удобным средством ориентации о текущем состоянии показателей режима. Тем не менее диспетчерские щиты являются лишь «статичной» картинкой. Решение таких задач, как прогнозирование нагрузок, оптимизация режимных параметров и схем электрических сетей, возможно лишь с использованием средств вычислительной техники, при этом возникает закономерная трудность в отображении на ПЭВМ всех элементов электрических сетей.

В силу специфики технического оснащения приборами учета электрических сетей соответствующие диспетчерские службы обладают разным набором режимной информации, а с точки зрения решения электротехнических задач и разным набором топологической информации.

Параметры линий отличны для разных номинальных напряжений и конструктивных исполнений и на практике по-разному учитываются при расчетах и анализе показателей режимов. Для кабельных линий низких напряжений, выполненных ма-