Math-Net.Ru

Общероссийский математический портал

В. Г. Гольдштейн, В. Г. Сливкин, Анализ электромагнитной совместимости электроприемников низкого напряжения при несимметричных режимах работы высоковольтных электрических сетей, *Вестн. Сам. гос. техн. ун-та. Сер. Физ.-мат. науки*, 2002, выпуск 16, 205–208

DOI: <https://doi.org/10.14498/vsgtu126>

Использование Общероссийского математического портала Math-Net.Ru подразумевает, что вы прочитали и согласны с пользовательским соглашением

<http://www.mathnet.ru/rus/agreement>

Параметры загрузки:

IP: 54.197.217.227

26 апреля 2023 г., 16:01:14

точников (токов обмотки, токов загрузки, токов намагниченности магнитопроводов). Приближенная оценка силовых параметров цилиндрического нагревателя обычно выполняется по аналитическим формулам для плоскопараллельного поля.

При неизменных ЭДУ внутри КЭ вектор $[Q]^e_\tau$ можно получить в явном виде

$$[Q]^e_t = pRl \left[-F_Z(t), Q_R(t), \frac{Q_R(t)l}{6}, -F_Z(t), Q_R(t), -\frac{Q_R(t)l}{6} \right]. \quad (11)$$

Данная методика может применяться в инженерных расчетах при проектировании вибростойких конструкций индукционных нагревательных установок, в САПР.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Вайнберг А.М. Индукционные плавильные печи. М.: Энергия, 1967. 416 с.
2. Зимин Л.С. Вибростойкость прямоугольных систем индукционного нагрева // Теория и практика индукционного нагрева: Сб. тр. ВНИИЭТО. М.: Энергоатомиздат, 1985. С. 64-70.
3. Зимин Л.С., Сутягин А.Ф. Расчет вибрационных и акустических характеристик индукторов прямоугольной формы // Изв. вузов. Электромеханика. 1986. №10. С. 103-109.

УДК 621.311.1+621.311.1.001.365

В.Г. Гольдштейн, В.Г. Сливкин

АНАЛИЗ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЙ СОВМЕСТИМОСТИ ЭЛЕКТРОПРИЕМНИКОВ НИЗКОГО НАПРЯЖЕНИЯ ПРИ НЕСИММЕТРИЧНЫХ РЕЖИМАХ РАБОТЫ ВЫСОКОВОЛЬТНЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СЕТЕЙ

Определяются опасные для электроприемников низкого напряжения режимы работы систем электроснабжения высокого напряжения. Рассматриваются положения математического моделирования импульсных помех в низковольтных сетях систем электроснабжения. Анализируется электромагнитная совместимость электроприемников низкого напряжения при несимметричных режимах работы высоковольтных сетей.

Для обеспечения электромагнитной совместимости электрооборудования необходимо ограничить уровень воздействующих помех (уровень помехоэмиссии) до уровня помехоустойчивости защищаемого оборудования [1, 2]. Наиболее опасными из электромагнитных помех, уровень помехоэмиссии которых зачастую превышает уровень помехоустойчивости электрооборудования, являются импульсные помехи [3].

Значительные импульсные помехи в низковольтных цепях могут возникать в результате различных процессов в высоковольтной сети вследствие взаимных индуктивных, емкостных и гальванических связей. При нормальном симметричном режиме работы высоковольтной сети уровень таких импульсных помех не представляет опасности. Реальную опасность для электроустановок НН представляют несимметричные режимы работы высоковольтной сети, а именно [4]:

- 1) неполнофазные режимы при коммутациях вследствие появления асимметрии в сети;
- 2) однофазные замыкания на землю в сети с изолированной нейтралью (сети 6, 10 кВ) вследствие несимметричного повышения напряжения на здоровых фазах и возможного гальванического влияния на электроустановки НН;
- 3) однофазные замыкания на землю в сети с заземленной нейтралью (110 кВ) вследствие появления значительных токов нулевой последовательности, индуктивной связи между проводами ЛЭП и линиями НН, а также гальванической связью через землю.

Принципиальная схема кабельной линии (КЛ), подверженной индуктивному и гальваническому влиянию однофазного КЗ, приведена на рисунке.

Расчетная схема для определения импульсных помех в КЛ, при однофазном КЗ в высоковольтной сети: 1 – оболочка кабеля; 2 – жилы; 3 – сопротивления заземлений Z_{31} , Z_{32}

В сети с заземленной нейтралью индуктивное влияние в схеме (см. рисунок) обусловлено током КЗ

$I_{\text{вл}} = 3 \cdot I_0$, где I_0 – ток нулевой последовательности, и сопротивлением взаимной индукции $Z_{\text{вл}}$ между ЛЭП и КЛ. Гальваническое влияние создается падением напряжения от тока КЗ на сопротивлении заземления Z_{31} подстанции и распределенным напряжением в земле по трассе КЛ.

При наличии таких внешних воздействий для установившегося

синусоидального режима на частоте $\omega = 2 \cdot \pi \cdot f$ в электромагнитно-связанных контурах «оболочка-земля», все «жилы-земля» неоднородные телеграфные уравнения запишутся в комплексной форме:

$$\left. \begin{aligned} \frac{dU_1}{dx} + Z_{11}I_1 + Z_{12}I_2 + Z_{13}I_3 &= -Z_{\text{вл}}(x)I_{\text{вл}}; \\ \frac{dU_2}{dx} + Z_{21}I_1 + Z_{22}I_2 + Z_{23}I_3 &= -Z_{\text{вл}}(x)I_{\text{вл}}; \\ \frac{dU_3}{dx} + Z_{31}I_1 + Z_{32}I_2 + Z_{33}I_3 &= -Z_{\text{вл}}(x)I_{\text{вл}}; \\ \frac{dI_1}{dx} + (Y_{11} + Y_{12} + Y_{13})U_1 - Y_{12}U_2 - Y_{13}U_3 &= Y_{11}U_3(x); \\ \frac{dI_2}{dx} + (Y_{21} + Y_{22} + Y_{23})U_2 - Y_{21}U_1 - Y_{23}U_3 &= Y_{22}U_3(x); \\ \frac{dI_3}{dx} + (Y_{31} + Y_{32} + Y_{33})U_3 - Y_{31}U_1 - Y_{32}U_2 &= Y_{33}U_3(x). \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

Здесь ось X направлена вдоль кабеля. В системе (1) введены следующие обозначения: U_i , I_i – комплексные значения напряжений и токов вдоль кабеля в соответствующих контурах; Z_{ii} , Y_{ii} – собственные сопротивления и проводимости контуров на единицу длины по отношению к нулевой земле; Z_{ik} , Y_{ik} , $i \neq k$ – взаимные сопротивления и проводимости контуров на единицу длины.

Равенство $Z_{\text{вл}}(x)$ между ЛЭП и различными контурами КЛ соблюдается с достаточной для практики точностью, так как взаимные расстояния между ЛЭП и КЛ значительно больше расстояний между соответствующими контурами кабеля. В квазистационарном приближении, когда длина волны влияющего тока много больше расстояний между проводами, расчет $Z_{\text{вл}}(x)$ с учетом поверхностного эффекта в земле может быть выполнен для достаточно длинных проводов на основе аппроксимации решения Карсона для низких частот [5]. Для коротких влияющих проводов (например ошиновки подстанции) напряженность поля $E(x) = -I \cdot Z_{\text{вл}}(x)$ от провода с током в подверженном влиянию кабеле может быть найдена методом эквивалентных зеркальных отображений дипольных источников:

$$E(x) = -\frac{j \cdot \omega \cdot \mu_0}{4\pi} \int_0^l I_1 \left(\frac{1}{\rho_1} - \frac{1}{\rho_2} \right) dx, \quad (2)$$

где $\rho_1 = \sqrt{(x_1 - x)^2 + h_1^2}$, $\rho_2 = \sqrt{(x_1 - x)^2 + \left(h_1 + \frac{2}{k}\right)^2}$, $k = \sqrt{j \cdot \omega \cdot \mu_0 \cdot G}$, $\mu_0 = 4 \cdot \pi \cdot 10^{-7}$;

G – удельная проводимость грунта, l – длина влияющего провода, h_1 – высота его подвеса.

Специальные эксперименты и теоретические оценки показывают, что распределение напряжения в земле $U_3(x)$ от контура подстанции на расстояниях, превышающих в 2 – 3 раза его

характерный размер, соответствует точечному заземлителю в виде $U_3(x) = \frac{I \rho_3}{2\pi x}$, где I - ток

через заземлитель, ρ_3 - эквивалентное удельное сопротивление грунта, x - координата, отсчитываемая от центра заземлителя.

Электрическое влияние на кабели, закопанные в землю, в сети с изолированной нейтралью и расчет возникающих при этом перенапряжений может быть выполнен на основании решения системы (1), где правые части в уравнениях для напряжений полагаются равными нулю, вместо $U_3(x)$ в уравнениях для токов подставляются напряжения несимметричной влияющей ЛЭП, а вместо соответствующих проводимостей подставляются емкости между соответствующими контурами. Расчет этих емкостей может быть сделан по формулам, приведенным в [6].

Совокупность возможных граничных условий для системы (1) определяется режимами работы КЛ, наличием тех или иных защитных устройств и характером внешних воздействий. В частности, для схемы на рисунке при отсутствии защитных разрядников на концах кабеля граничные условия запишутся в виде

$$\begin{aligned} x=0, \quad U_1(0) &= U_3(0) = U_2(0) - [I_1(0) + I_3(0)] \cdot Z_{31}; \quad I_2(0) = 0; \\ x=l, \quad U_1(l) &= U_3(l) = U_2(l) + [I_1(l) + I_3(l)] \cdot Z_{32}; \quad I_2(l) = 0. \end{aligned}$$

Здесь $U_3(0)$ и $U_3(l)$ представляют собой напряжения земли по отношению к нулевому потенциалу в начале и в конце кабеля. Обычно оболочка кабеля подсоединена к контуру подстанции, и тогда

$$U_3(0) = I_3 \cdot Z_{31} = \frac{I_3 \cdot \rho_3}{2\pi r_0},$$

где Z_{31} - сопротивление заземления, r_0 - эквивалентный радиус контура заземления.

В результате решения системы (1), выполненного матричными методами, при заданных внешних воздействиях, параметрах кабеля и граничных условиях определяются следующие величины: комплексные значения напряжений и их модули по длине кабеля по отношению к “нулевой” земле, а также модуль разности напряжений $|U_1 - U_2|$, воздействующий на изоляцию кабеля, комплексные значения токов и их модули по длине кабеля в соответствующих контурах.

Соответствие системы уравнений (1) реальным процессам развития перенапряжений в КЛ в значительной степени зависит от точности определения входящих в систему собственных и взаимных погонных параметров кабелей. При строгом подходе к их определению необходимо решить уравнения электромагнитного поля Максвелла для различных сред (земля, оболочка, изоляция, жилы) при удовлетворении граничных условий на поверхностях раздела. Погонные параметры контуров при этом должны быть определены так, чтобы постоянные распространения телеграфных уравнений совпали с корнями характеристических уравнений Максвелла [5].

Решение задачи при такой постановке чрезвычайно сложно. При упрощенном подходе для варианта двухпроводной линии («оболочка – земля» и «все жилы – земля») за основу было взято решение Зунде для электромагнитного поля сплошного металлического проводника в проводящей земле. Затем при известных внутренних параметрах контуров и определенных допущениях для контура «жилы – земля» рассчитывались параметры двухпроводной линии. Погонные параметры трехпроводной линии (кабель с броней) определялись в результате решения уравнений электромагнитного поля для системы внешних металлопокрывов кабеля и троса в земле.

Отыскивались корни соответствующего характеристического уравнения, вычислялись погонные параметры такой системы в фазных координатах и по известным значениям внутренних параметров кабеля и брони определялись погонные параметры эквивалентной трехпроводной линии. Методика такого расчета реализована в [4]. Исходными данными для расчетов являются частота питающего тока, удельное сопротивление грунта, геометрические размеры кабеля, а также его погонные внутренние параметры, которые определяются по справочным данным или экспериментально на коротких отрезках в лабораторных условиях.

Результаты расчета [4] указывают на опасность несимметричных режимов работы высоковольтных сетей для электроприемников низкого напряжения, так как в КЛ последних возможно появление значительных импульсных помех (до 2,8 кВ).

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. ГОСТ Р 51317.4.4-99 (МЭК 61000-4-4-95) Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная. Устойчивость к наносекундным импульсным помехам. Требования и методы испытаний. М.: Изд-во стандартов, 1999.
2. ГОСТ Р 51317.4.5-99 (МЭК 61000-4-5-95) Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная. Устойчивость к микросекундным импульсным помехам большой энергии. Требования и методы испытаний. М.: Изд-во стандартов, 1999.
3. Костенко М.В., Михайлов Ю.А., Халилов Ф.Х. Электроэнергетика. Электромагнитная совместимость. Ч. 1: Учеб. пособ./ СПб.: Изд-во СПбГТУ, 1997. 103 с.
4. Альбокринов В.С., Гольдштейн В.Г., Халилов Ф.Х. Перенапряжения и защита от них в электроустановках нефтяной промышленности. Самара: Самар. гос. техн. ун-т, 1997. 324 с.
5. Костенко М. В. Взаимные сопротивления между воздушными линиями с учетом поверхностного эффекта в земле // Электричество. 1955. N 10.
6. Иоссель Ю. Я., Каганов Э. С., Струнский М. Г. Расчет электрической емкости. Л.: Энергия. Ленингр. отделение, 1969. 220 с.

УДК. 537.811

О.Я. Новиков

ПОВЕРХНОСТНЫЙ ЭФФЕКТ С УЧЕТОМ ПОСТУЛАТА ДИРАКА

Проведен анализ поверхностного эффекта с учетом магнитной проводимости среды. Показано возникновение поверхностного эффекта на постоянном токе с глубиной проникновения, зависящей от магнитной и электрической проводимостей среды.

Учет постулата Дирака о существовании свободных магнитных зарядов приводит к модифицированной системе уравнений электромагнитного поля[1].

Эта система может быть записана в следующей форме:

$$\begin{aligned} \frac{\partial \mathbf{H}}{\partial t} = \mathbf{d}_e; \quad \frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} = -\mathbf{d}_m; \quad \text{div} \mathbf{D} = \mathbf{r}_e; \quad \text{div} \mathbf{B} = \mathbf{r}_m; \quad \mathbf{d}_e = \mathbf{g}_e \mathbf{E} + \frac{\partial \mathbf{D}}{\partial t} + \mathbf{r}_e \mathbf{v}_e; \\ \mathbf{d}_m = \mathbf{g}_m \mathbf{H} + \frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} + \mathbf{r}_m \mathbf{v}_m; \quad \mathbf{D} = \mathbf{eE}; \quad \mathbf{B} = \mathbf{mH}. \end{aligned}$$

Первое уравнение в этой системе – закон полного электрического тока; второе – закон полного магнитного тока; третье – постулат Максвелла; четвертое – постулат Дирака; пятое – обобщенный закон Ома для электрического тока; шестое – обобщенный закон Ома для магнитного тока; седьмое и восьмое – соотношения между обобщенными силами и потоками в электромагнитном поле.

В этой системе величины $\mathbf{d}_e, \mathbf{d}_m, \mathbf{r}_e, \mathbf{r}_m, \mathbf{v}_e, \mathbf{v}_m, \mathbf{g}_e, \mathbf{g}_m$ означают плотность электрического тока, плотность магнитного тока, плотность электрических зарядов, плотность магнитных зарядов, скорость переноса электрических зарядов, скорость переноса магнитных зарядов, удельную электрическую проводимость и удельную магнитную проводимость соответственно. Остальные обозначения – общепринятые.

При исследовании поверхностного эффекта можно положить

$$\mathbf{r}_e = 0; \quad \left| \frac{\partial \mathbf{D}}{\partial t} \right| \approx 0; \quad \mathbf{r}_m = 0.$$

При этих условиях система уравнений электромагнитного поля будет иметь вид:

$$\text{rot} \mathbf{H} = \mathbf{g}_e \mathbf{E}; \quad \text{rot} \mathbf{E} = -\mathbf{g}_m \mathbf{H} - \mathbf{m} \frac{\partial \mathbf{H}}{\partial t}; \quad \text{div} \mathbf{E} = 0; \quad \text{div} \mathbf{H} = 0.$$

После известных преобразований эти уравнения могут быть записаны следующим образом:

$$\Delta \mathbf{H} = \mathbf{g}_e \mathbf{g}_m \mathbf{H} + \mathbf{g}_e \mathbf{m} \frac{\partial \mathbf{H}}{\partial t}; \quad \Delta \mathbf{E} = \mathbf{g}_e \mathbf{g}_m \mathbf{E} + \mathbf{g}_e \mathbf{m} \frac{\partial \mathbf{E}}{\partial t}.$$

Рассмотрим поверхностный эффект при падении плоской электромагнитной волны на однородное изотропное линейное полупространство с постоянными параметрами. Выберем декартову систему координат с расположением плоскости x-o-y на границе полупространства и направим ось z внутрь.