

т. е. примерно

$$k_L = 1.$$

Таким образом, емкость линии должна быть полностью компенсирована.

ВЫВОДЫ

1. Для оптимизации режимов электропередачи напряжением 330 кВ и выше необходимо применение параллельной компенсации в виде источников реактивной мощности.

2. Полученные соотношения и графические зависимости позволяют определять параметры устройств параллельной компенсации по различным условиям.

3. Наиболее эффективна параллельная компенсация в сочетании с электропередачами повышенной пропускной способностью или с продольной емкостной компенсацией. При этом степень параллельной компенсации из условий минимума затрат получается равной примерно единице.

ЛИТЕРАТУРА

1. Поспелов Г. Е. О предельной компенсации параметров электропередачи // Электричество. – 1952. – № 2. – С. 12–16.
2. Казарновский Д. М. Увеличение синхронизирующей мощности при однофазной компенсации емкостной проводимости линии передачи // Труды ЛИИ. – 1940. – № 3.
3. Поспелов Г. Е. Элементы технико-экономических расчетов систем электропередачи. – Мн.: Вышэйш. шк., 1967. – 311 с.
4. Александров Г. Н. Передача электрической энергии переменным током. – Л.: Энергоатомиздат, 1990. – 176 с.

Представлена кафедрой
электрических систем

Поступила 18.12.2003

УДК 621.311

АЛГОРИТМ РЕАЛИЗАЦИИ КОМПЬЮТЕРНОЙ МОДЕЛИ ФЕРРОРЕЗОНАНСНЫХ ПЕРЕНАПРЯЖЕНИЙ И ИХ ПОДАВЛЕНИЯ ПРИ НЕСИММЕТРИЧНЫХ РЕЖИМАХ ЛИНИЙ ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧИ

Докт. техн. наук, проф. ДМИТРИЕВ Е. В., докт. техн. наук ГАШИМОВ А. М.,
канд. техн. наук ПИВЧИК И. Р., инж. БАБАЕВА А. Р.

Институт физики НАН Азербайджана

В электрических сетях в неполнофазных режимах при взаимодействии нелинейных индуктивностей намагничивания магнитопроводов трансформаторов с емкостями электрооборудования электрических систем возникают феррорезонансные явления, которые вызывают на шинах распределительных устройств (РУ) длительные перенапряжения, опасные для ограничителей перенапряжений (ОПН) и другого оборудования РУ.

Актуальность проблемы наиболее полного изучения феррорезонансных процессов при несимметричных коммутациях линии электропередачи (ЛЭП) с силовыми трансформаторами и предлагаемые мероприятия подавления этих перенапряжений определяют необходимость достоверного описания процессов, протекающих в сложных электрических сетях при различных способах воздействия. Работа направлена на заполнение пробелов в части компьютерного моделирования переходных волновых процессов, а именно: описание процесса феррорезонансных перенапряжений и токов в изучаемых цепях с учетом устройств ОПН и организации подавления феррорезонансных перенапряжений с помощью компьютерного моделирования. До настоящего времени вопросы изучения феррорезонансных токов, определения технических требований прибора для выявления и подавления феррорезонанса при исследовании феррорезонансных процессов не рассматривались, и прибор не был создан ни для определения напряжения, ни для определения тока. В связи с этим анализ феррорезонансных схем, основанный на математическом моделировании с численным экспериментом, представляется эффективным и целесообразным.

Точный анализ феррорезонансных явлений ввиду несинусоидальности формы кривых напряжения и тока представляет определенные трудности. Анализ феррорезонансных схем методом математического моделирования требует наличия соответствующих модели и алгоритма. При этом необходимо рассчитывать переходные и установившиеся процессы, протекающие в схеме, и определять токи и напряжения в цепи во времени.

Математическая модель феррорезонансных процессов напряжений и токов основана на следующих представлениях о протекающих явлениях в моделируемых цепях [1].

Рассматриваются переходные и квазиустановившиеся процессы в узловых точках (генерирующих и принимающих) и цепях с распределенными параметрами ЛЭП, осуществляющими передачу энергии от узлов генерирования к узлам потребления.

При феррорезонансных явлениях процессы, происходящие в одной фазе, в значительной мере зависят от влияния других. Исходя из этого следует признать, что практически единственный достоверный способ исследования феррорезонансных явлений в многопроводной линии – моделирование переходных процессов с помощью компьютерных программ, которые должны иметь возможность моделирования многопроводной линии и узловых точек при совместном решении уравнений переходных процессов. Программа, разработанная Институтом физики НАН Азербайджана, предназначена для расчета переходных процессов в произвольных схемах электрических цепей. С помощью компьютерной модели, алгоритма и программы исследованы феррорезонансные процессы в сети 110 кВ при неполнофазном включении линии с силовыми трансформаторами мощностью 10, 20 и 40 МВ · А с учетом ОПН и без него.

Исследования осуществлялись на базе выбранной схемы, которая представлена на рис. 1.

Система уравнений, с помощью которых вычисляются изменения напряжений и токов в требуемых точках расчетной схемы, включает: уравнения изменения напряжений и токов в узловых точках (I и III) схемы и промежуточных точках ЛЭП (II).

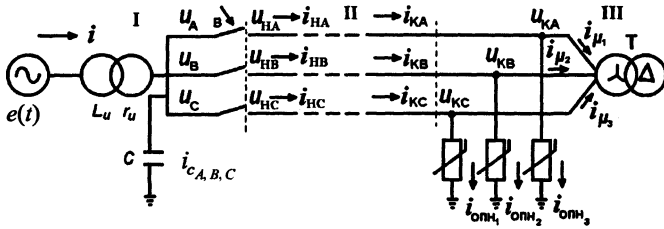


Рис. 1. Расчетная схема для компьютерного моделирования и анализа феррорезонансных процессов с защитным устройством: $e(t)$ – источник напряжения; L_u, r_u – индуктивность и сопротивление источника; u_A, u_B, u_C – мгновенные значения фазных напряжений на шинах источника; u_{HA}, u_{HB}, u_{HC} – мгновенные значения напряжений в начале ЛЭП, соединяющей источник с трансформатором Т; $i_{HA}, i_{HB}, i_{HC}, i_{KA}, i_{KB}, i_{KC}$ – мгновенные значения токов в начале и конце ЛЭП; $i_{\mu_1}, i_{\mu_2}, i_{\mu_3}$ – мгновенные значения токов намагничивания трансформатора Т; $i_{cA, cB, cC}$ – мгновенные значения токов, протекающих через суммарную емкость I узловой точки; $i_{опн_1}, i_{опн_2}, i_{опн_3}$ – мгновенные значения токов, протекающих через ОПН

Уравнения, определяющие изменение напряжений и токов в I узле схемы:

$$\frac{di}{dt} = L_u^{-1} [e(t) - r_u i - u_1] \quad (1)$$

$$\frac{du_1}{dt} = C^{-1} i_c,$$

где

$$e(t) = \begin{bmatrix} e_A \\ e_B \\ e_C \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} E_{\max} \sin(\omega t + \varphi) \\ E_{\max} \sin(\omega t + \frac{2\pi}{3} + \varphi) \\ E_{\max} \sin(\omega t + \frac{4\pi}{3} + \varphi) \end{bmatrix}; \quad i = \begin{bmatrix} i_A \\ i_B \\ i_C \end{bmatrix}; \quad u_1 = \begin{bmatrix} u_A \\ u_B \\ u_C \end{bmatrix}; \quad i_c = \begin{bmatrix} i_{cA} \\ i_{cB} \\ i_{cC} \end{bmatrix}; \quad C = \begin{bmatrix} C_{11} & C_{12} & C_{13} \\ C_{21} & C_{22} & C_{23} \\ C_{31} & C_{32} & C_{33} \end{bmatrix}$$

Здесь φ – угол включения источника напряжения; E_{\max} – максимальная ЭДС источника.

Напряжения u_1 в зависимости от положения контактов выключателя В определяются с помощью уравнений ЛЭП.

Для получения расчетных выражений, аппроксимирующих уравнения ЛЭП (II узел) с учетом поверхностного эффекта и коронирования проводов ЛЭП, воспользуемся уравнениями, представленными в [1, 2]:

$$\begin{aligned} \left(1 + hZ \sum_{k=1}^4 G_k\right) \mu_d + (Z + Z_s) i_d &= v_p; \\ - \left(1 + hZ \sum_{k=1}^4 G_k\right) \mu_d + (Z + Z_s) i_d &= v_q. \end{aligned} \quad (2)$$

Здесь

$$v_p = u_p + Zi_p + hZ \left[\sum_{k=1}^4 G_k(\pm U_3) + u_f \left(1 - \frac{U_3}{|u_f|} \right) + \sum_{k=1}^4 \sigma_k i_{fk} \right] + \sum_{k=1}^4 Z_k \chi_k i_{fk};$$

$$v_q = -u_q + Zi_q + hZ \left[\sum_{k=1}^4 G_k(\pm U_3) + u_f \left(1 - \frac{U_3}{|u_f|} \right) + \sum_{k=1}^4 \sigma_k i_{fk} \right] + \sum_{k=1}^4 Z_k \chi_k i_{fk};$$

$$G_k = \frac{c_k \tau^{-1}}{1 + c_k R_k \tau^{-1}}; \quad \sigma_k = \frac{1 - c_k R_k \tau^{-1}}{1 + c_k R_k \tau^{-1}}; \quad Z_S = \left(\sum_{k=1}^n Z_k^{-1} \right)^{-1};$$

$$Z_k = 0,5 \nu (L_k + \tau r_k)^{-1}; \quad \chi_k = \frac{L_k - \tau r_k}{L_k + \tau r_k};$$

$Z = (L_0 C_0^{-1})^{0,5}$ – волновое сопротивление линии без потерь; L_0, C_0 – матрицы собственных и взаимных геометрических индуктивностей и емкостей ЛЭП; h, τ – пространственная и временная переменные; $\tau = (L_0 C_0)^{0,5} h$; h – расчетный шаг; C_k, R_k – параметры модели короны [2]; L_k, r_k – параметры модели поверхностного эффекта; k – число параллельных ветвей в моделях короны и поверхностного эффекта. В данном случае $k = 4$; U_3 – напряжение зажигания короны, которое в данном случае принято $1,2U_{\phi}$; $u_d, u_p, u_q, i_d, i_p, i_q, u_f, i_{fk}$ – матрицы напряжений и токов в дополнительных точках p и q расчетной сетки с координатами соответственно (x, t) , $(x - h, t - \tau)$, $(x + h, t - \tau)$, $(x, t - 2\tau)$; v_p, v_q – величины потерь, вычисленные по значениям напряжений и токов в средней точке на отрезках $p - d$ и $q - d$.

Для упрощения расчетных формул систему уравнений (2) запишем в виде:

$$Gu_d + Zi_d = v_p; \tag{3}$$

$$-Gu_d + Zi_d = v_q.$$

Здесь

$$G = 1 + hZ \sum_{k=1}^4 G_k = \begin{bmatrix} G_{11} & 0 & 0 \\ 0 & G_{22} & 0 \\ 0 & 0 & G_{33} \end{bmatrix}; \quad Z = Z + Z_S = \begin{bmatrix} Z_{11} & Z_{12} & Z_{13} \\ Z_{21} & Z_{22} & Z_{23} \\ Z_{31} & Z_{32} & Z_{33} \end{bmatrix};$$

$$u_d = \begin{bmatrix} u_{dA} \\ u_{dB} \\ u_{dC} \end{bmatrix}; \quad i_d = \begin{bmatrix} i_{dA} \\ i_{dB} \\ i_{dC} \end{bmatrix}; \quad v_p = \begin{bmatrix} v_{pA} \\ v_{pB} \\ v_{pC} \end{bmatrix}; \quad v_q = \begin{bmatrix} v_{qA} \\ v_{qB} \\ v_{qC} \end{bmatrix}.$$

При вычислении напряжений и токов в начальной (I узел) и конечной (III узел) точках ЛЭП используются соответственно второе и первое уравнения (3). Напряжения и токи в промежуточных точках ЛЭП (узел II) вы-

числяются (3) по разработанному алгоритму [1], разделив линию в данном случае на десять участков длиной, равной $2h$.

Если замкнуты контакты только фазы A , то $u_{нА} = u_A$, $i_{нВ} = 0$, $i_{нС} = 0$, $u_B \neq u_{нВ}$, $u_C \neq u_{нС}$. Используя уравнения ЛЭП, получим выражения для дополнения (1), которое определяет напряжение в одном шаге совместного решения (1) и уравнения ЛЭП.

Второе уравнение из (3) запишем в следующем виде:

$$\begin{aligned} -G_{11}u_{нА} - u_{нВ} - u_{нС} + Z_{11}i_{нА} &= v_{qA}; \\ -u_{нА} - G_{22}u_{нВ} - u_{нС} + Z_{12}i_{нА} &= v_{qB}; \\ -u_{нА} - u_{нВ} - G_{33}u_{нС} + Z_{13}i_{нА} &= v_{qC}, \end{aligned} \quad (4)$$

и неизвестные значения $i_{нА}$ из первого уравнения (4) равны

$$i_{нА} = Z_{11}^{-1}(u_{нВ} + u_{нС}) + Z_{11}^{-1}(v_p + G_{11}u_{нА}). \quad (5)$$

Тогда выражения для определения $u_{нВ}$ и $u_{нС}$ выглядят следующим образом:

$$\begin{bmatrix} u_{нВ} \\ u_{нС} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Z_{12}Z_{11}^{-1} - G_{22} & Z_{12}Z_{11}^{-1} - 1 \\ Z_{13}Z_{11}^{-1} - 1 & Z_{13}Z_{11}^{-1} - G_{33} \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} v_{qB} - Z_{12}Z_{11}^{-1}(v_{qA} + G_{11}u_{нА}) + u_{нА} \\ v_{qC} - Z_{13}Z_{11}^{-1}(v_{qA} + G_{11}u_{нА}) + u_{нА} \end{bmatrix} \quad (6)$$

При включении фаз A и B , учитывая условия $i_{нС} = 0$, $u_{нА} = u_A$, $u_{нВ} = u_B$, $u_{нС} \neq u_C$, из второго уравнения системы (3) получим

$$\begin{aligned} -G_{11}u_{нА} - u_{нВ} - u_{нС} + Z_{11}i_{нА} + Z_{12}i_{нВ} &= v_{qA}; \\ -u_{нА} - G_{22}u_{нВ} - u_{нС} + Z_{12}i_{нА} + Z_{22}i_{нВ} &= v_{qB}; \\ -u_{нА} - u_{нВ} - G_{33}u_{нС} + Z_{13}i_{нА} + Z_{23}i_{нВ} &= v_{qC} \end{aligned} \quad (7)$$

и неизвестные значения $u_{нС}$ из первого уравнения (7)

$$u_{нС} = -G_{11}u_{нА} - u_{нВ} + Z_{11}i_{нА} + Z_{12}i_{нВ} - v_{qA},$$

откуда

$$\begin{aligned} \begin{bmatrix} i_{нА} \\ i_{нВ} \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} -Z_{11} + Z_{12} & Z_{22} - Z_{12} \\ -G_{33}Z_{11} + Z_{13} & -G_{33}Z_{12} + Z_{23} \end{bmatrix}^{-1} \times \\ &\times \begin{bmatrix} v_{qB} - v_{qA} + (1 - G_{11})u_{нА} - (1 - G_{22})u_{нВ} \\ v_{qC} - G_{33}v_{qA} + (1 - G_{33}G_{11})u_{нА} + (1 - G_{33})u_{нВ} \end{bmatrix}. \end{aligned} \quad (8)$$

Используя (1)...(8), можно вычислить напряжения и токи в узловой точке при одно- и двухфазных включениях ЛЭП. Для решения уравнений ЛЭП использован разностный метод второго порядка [1], поэтому при ре-

шении системы (1) с учетом (2)...(8) также требуется применение разностного метода второго порядка [3].

Для предотвращения неполнофазного режима ЛЭП, способствующего возникновению опасного феррорезонансного перенапряжения, путем отключения линии с помощью устройства, основанного на токовой защите, включенной на суммарный ток трех фаз линии [4], требуется получение кривых перенапряжений и протекающих токов в режиме феррорезонанса при коммутации ЛЭП с ненагруженным трансформатором с изолированной нейтралью на РУ без выключателей на стороне высшего напряжения с учетом ОПН и без него.

Принцип работы защитного устройства [4] заключается в том, что при возникновении неполнофазного режима на датчик феррорезонанса поступает сигнал из цепи фильтра токов нулевой последовательности. Вычислительное устройство обрабатывает полученную информацию и через аналоговый цифровой преобразователь и реле времени дает команду на отключение линии электропередачи блоком отключения линии головными выключателями В.

Для получения расчетных кривых напряжения и тока на узле Ш записываются уравнения холостого трансформатора в виде

$$\frac{d\psi}{dt} = u_T - u_0, \quad (9)$$

где ψ – мгновенное значение потокосцепления,

$$u_T = \begin{bmatrix} u_{k_A} \\ u_{k_B} \\ u_{k_C} \end{bmatrix}; \quad \psi = \begin{bmatrix} \psi_A \\ \psi_B \\ \psi_C \end{bmatrix}; \quad u_0 = \frac{1}{3}(u_{k_A} + u_{k_B} + u_{k_C}).$$

При моделировании феррорезонансных процессов для упрощения индуктивность рассеяния трансформатора с изолированной нейтралью можно не учитывать. Для осуществления расчета по (9) используют первое уравнение (3). Тогда можно записать:

$$\begin{aligned} -G_{11}u_{k_A} - u_{k_B} + u_{k_C} + Z_{11}i_{k_A} + Z_{12}i_{k_B} + Z_{13}i_{k_C} &= u_{p_A}; \\ u_{k_A} + G_{22}u_{k_B} + u_{k_C} + Z_{21}i_{k_A} + Z_{22}i_{k_B} + Z_{23}i_{k_C} &= u_{p_B}; \\ -u_{k_A} + u_{k_B} + G_{33}u_{k_C} + Z_{31}i_{k_A} + Z_{32}i_{k_B} + Z_{33}i_{k_C} &= u_{p_C}. \end{aligned} \quad (10)$$

Здесь $i_{k_A} = i_{\text{ОПН1}}$, $i_{k_B} = i_{\text{ОПН2}} + i_{\mu 2}$, $i_{k_C} = i_{\text{ОПН3}} + i_{\mu 3}$.

Ток намагничивания аппроксимируется степенной функцией [5]

$$i_{\mu} = a\psi + b\psi^n + c\psi^m, \quad (11)$$

где $a = 0,15$; $b = 0,18$; $c = 0,67$; $n = 9$, $m = 11$,

$$\Psi_{\text{баз}} = \frac{\sqrt{2}U_{\text{баз}}}{\sqrt{3} \cdot 314}; \quad I_{\mu_{\text{баз}}} = k_f I_0; \quad U_{\text{баз}} = U_{\text{н}}.$$

Здесь $\Psi_{\text{баз}}$, $I_{\mu_{\text{баз}}}$, $U_{\text{баз}}$ – базисные величины соответственно потокосцепления, тока намагничивания и напряжения; k_f – коэффициент формы; I_0 – ток холостого хода трансформатора. При выполненных расчетах $k_f = 1,8$, $U_{\text{н}} = 110$ кВ и при мощности трансформатора $10 \text{ МВ} \cdot \text{А}$ $I_0 = 0,52 \text{ А}$.

Алгоритм расчета построен таким образом, что в зависимости от срабатывания ОПН на отдельно взятой фазе другие фазы принимаются так же, как без ОПН.

Если срабатывает ОПН только на фазе A , то в (10) $u_{k_A} = f(i_{\text{ОПН}_1})i_{\text{ОПН}_1}$, если срабатывает ОПН на фазах A и B , то $u_{k_B} = f(i_{\text{ОПН}_2})i_{\text{ОПН}_2}$, если срабатывает ОПН одновременно на всех трех фазах, то $u_{k_C} = f(i_{\text{ОПН}_3})i_{\text{ОПН}_3}$. Последовательность срабатывания ОПН может измениться, так как в начале возможно срабатывание фаз B , C и несрабатывание фазы A .

Таким образом, для удовлетворения вариантов:

- | | | | |
|--------------|------------------|-----------------|----------|
| срабатывает: | • фаза A | не срабатывают: | • B, C |
| | • фаза B | | • A, C |
| | • фаза C | | • A, B |
| срабатывают: | • фазы A, B | не срабатывает: | • C |
| | • фазы A, C | | • B |
| | • фазы B, C | | • A |
| | • фазы A, B, C | | |

уравнения (10) с учетом $u_{k_{A,B,C}} = f(i_{\text{ОПН}_{1,2,3}})i_{\text{ОПН}_{1,2,3}}$ имеют вид

$$\begin{bmatrix} i_{\text{ОПН}_1} \\ i_{\text{ОПН}_2} \\ i_{\text{ОПН}_3} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} G_{11}f(i_{\text{ОПН}_1}) + Z_{11} & f(i_{\text{ОПН}_2}) & f(i_{\text{ОПН}_3}) \\ f(i_{\text{ОПН}_1}) & G_{11}f(i_{\text{ОПН}_2}) + Z_{22} & f(i_{\text{ОПН}_3}) \\ f(i_{\text{ОПН}_1}) & f(i_{\text{ОПН}_2}) & G_{33}f(i_{\text{ОПН}_3}) + Z_{33} \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} u_{p_A} \\ u_{p_B} \\ u_{p_C} \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} Z_{11} & Z_{12} & Z_{13} \\ Z_{21} & Z_{22} & Z_{23} \\ Z_{31} & Z_{32} & Z_{33} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{\mu_1} - i_{\text{ОПН}_1} \\ i_{\mu_2} - i_{\text{ОПН}_2} \\ i_{\mu_3} - i_{\text{ОПН}_3} \end{bmatrix} \quad (12)$$

Для моделирования вольт-амперной характеристики ОПН использована кубическая сплайн-функция [6]

$$u = \sum_{l=0}^3 a_l^k (i - i_k)^l, \quad k = 1, 2, \dots, n, \quad (13)$$

где u и i – напряжение на диске и протекающий через него ток; i_k – ток в опорной точке на участке взятой вольт-амперной характеристики.

Если моделируемый ОПН содержит r блоков и в каждом блоке q колонок из s дисков, то:

$$u = rs \sum_{l=0}^3 a_l^k \left(\frac{i}{q} - \frac{i_k}{q} \right)^l \quad \text{или}$$

$$u = rs \sum_{l=0}^3 \frac{a_l^{(k)}}{q^l} (i - i_k)^l = rs \left(a_0^{(k)} + \frac{a_1^{(k)}}{q} (i - i_k) + \frac{a_2^{(k)}}{q^2} (i - i_k)^2 + \frac{a_3^{(k)}}{q^3} (i - i_k)^3 \right). \quad (14)$$

Современные ОПН в основном комплектуются из варисторов одноколонкового типа, т. е. $r = 1$; $q = 1$, тогда коэффициент a примет вид:

$$a_0^{(k)} = \frac{u_k}{s};$$

$$a_1^{(k)} = \frac{q}{s} \frac{u_{k+1} - u_k}{i_{k+1} - i_k};$$

$$a_2^{(k)} = \frac{q}{s} \frac{1}{i_{k+1} - i_k} \left(\frac{u_{k+2} - u_{k+1}}{i_{k+2} - i_{k+1}} - \frac{u_{k+1} - u_k}{i_{k+1} - i_k} \right);$$

$$a_3^{(k)} = \frac{(u_{k+1} - u_k)}{s(i_{k+1} - i_k)^3} + \left(\frac{u_{k+2} - u_{k+1}}{i_{k+2} - i_{k+1}} - \frac{u_{k+1} - u_k}{i_{k+1} - i_k} \right);$$

Применение сплайн-функций при моделировании вольт-амперной характеристики защитных аппаратов позволяет более точно отразить работу этих аппаратов при численных расчетах электромагнитных волновых процессов в электропередачах высокого напряжения; его преимущества были впервые показаны именно для анализа указанных процессов в многопроводной системе с учетом ОПН [7].

При определенных начальных значениях система уравнений (9) с уравнениями (11)...(14) решается применением так называемого метода «предиктор-корректор» с использованием метода Вегстейна [3], успешно внедренного для анализа быстропротекающих переходных волновых процессов [8].

После определения $i_{\text{ОПН}}$ и u_k из (10) находится i_k . Для осуществления расчета на следующем цикле вычисленные значения напряжений и токов в данном цикле запоминаются.

Вольт-амперная характеристика ОПН соответствует наибольшему длительному напряжению $U_{\text{фmax}} = 103$ кВ, при коммутационных токах 400 А в сетях 110 кВ при установке на шинах ОПН, остающееся напряжение при указанном токе 100 А $U_{\text{фmax}} = 184$ кВ, $U_{\text{фmax}} = 172$ кВ и $U_{\text{фmax}}/U_{100} = 0,6$ [5, 9].

При итерационном процессе опорные точки на вольт-амперной характеристике ОПН выбирают в ходе решения (9)...(14) таким образом, чтобы указанные данные обязательно входили в число этих точек. Одновременно они используются как начальные значения токов при решении (14) с уточнением метода Вегстейна.

Для иллюстрации возможности предложенного алгоритма при компьютерном моделировании феррорезонансных процессов с целью определения формы и длительности токов, необходимых для предложенного устройства

отключения ЛЭП [4], выполнены расчеты и представлены их результаты в случае однофазного питания силового трансформатора. Расчетная схема и параметры приведены в начале статьи.

Предложенное устройство отключения ЛЭП [4], основанное на токовой защите, включаемой на сумму токов трех фаз, требует определения формы кривой суммарного тока и считается наиболее надежным средством исключения неполнофазного режима работы ЛЭП, в том числе предотвращения феррорезонанса, в том случае, если это устройство учитывает наличие ОПН в многофазной системе.

Кривые напряжений и токов переходных и квазиустановившихся режимов, сопровождающихся феррорезонансными процессами при включении трансформатора одной фазой, полученные путем компьютерного моделирования, показаны на рис. 2.

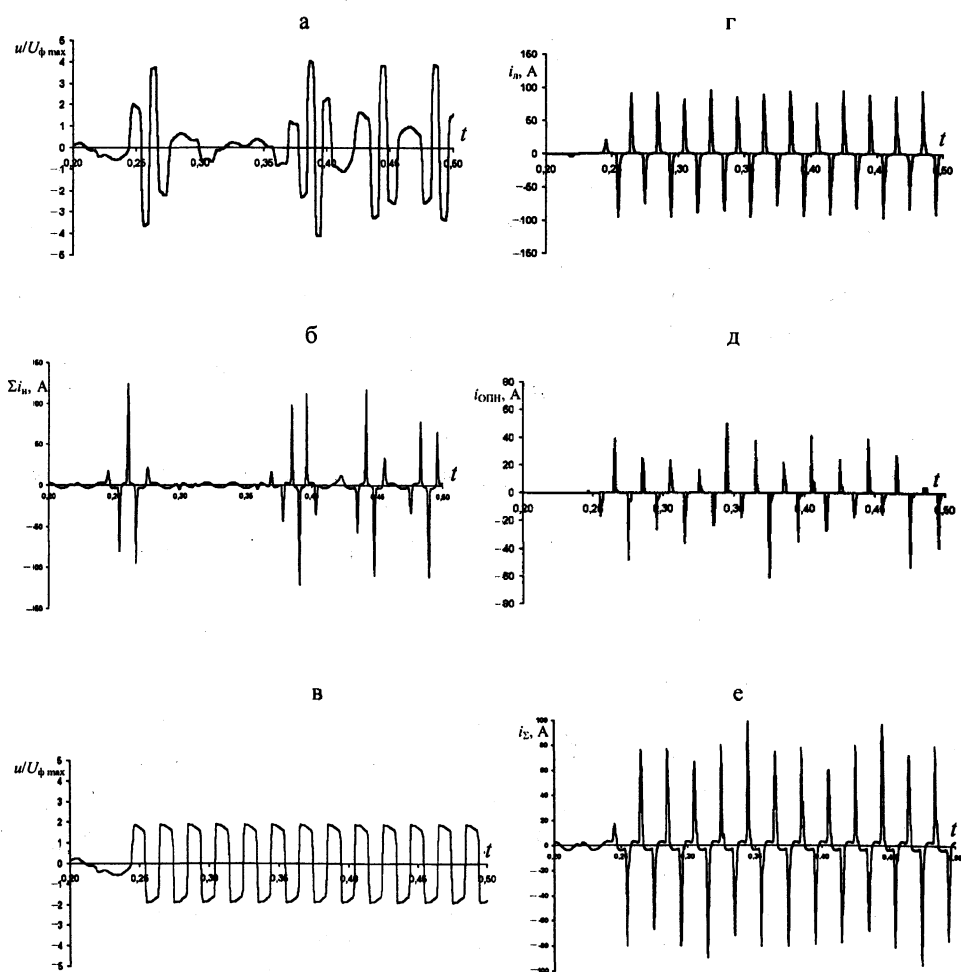


Рис. 2. Феррорезонансный процесс при однофазном включении трансформатора мощностью 10 МВ · А (длина ЛЭП 18 км): а – напряжение на невключенной фазе; б – сумма токов трех фаз в начале линии; в – напряжение на невключенной фазе при наличии ОПН; г – фазный ток в начале линии при наличии ОПН; д – фазный ток через ОПН; е – сумма токов трех фаз в начале линии при наличии ОПН

Здесь феррорезонансные перенапряжения на входе трансформатора на невключенных фазах достигают четырехкратного значения, суммарный ток в начале линии имеет сложную форму, которая сохраняется и при квазистационарном режиме. Из кривой тока видно, что на каждом периоде (0,02 с) имеются минимум три пика. Эти пики сохраняются и при квазиустановившемся режиме. При компьютерном моделировании обнаружить феррорезонансное перенапряжение и использовать полученную кривую тока целесообразно с точки зрения организации защиты при отсутствии ОПН на шинах РУ. На рис. 2 приведены и результаты компьютерного моделирования при наличии ОПН, включенного на входе трансформатора. Как видно, феррорезонансные перенапряжения на невключенных фазах не превышают $1,8U_{\text{фmax}}$. Процесс устанавливается с момента, когда напряжение на невключенной фазе превышает напряжение срабатывания ОПН. Ток на фазе невключенной фазы и через ОПН имеют определенную форму, показанную на рисунке, и регулярно повторяются. Указанный режим является опасным для ОПН, так как при определенном числе повторяющихся срабатываний приводит к его разрушению. Наличие этих импульсов дает возможность совмещать применение устройств защиты от неполнофазного режима ЛЭП [10] с применением ОПН, облегчающим выбор характеристики действия защиты при обнаружении режима феррорезонанса, что аналогично выводам и результатам для сетей 6...10 кВ [10]. На рис. 2 также показан суммарный ток трех фаз, необходимый для указанного устройства и имеющий такую же форму кривой, как и ток на фазе, и ток через ОПН. Напряжение на нейтрали трансформатора при наличии ОПН имеет стабильную форму и не превышает $1,5U_{\text{фmax}}$. Это дает возможность использовать напряжение $3U_0$, имеющее одинаковую форму и амплитуду с напряжением на нейтрали при организации защиты отключения ЛЭП с трансформаторами.

Проведенные исследования показали, что увеличение мощности трансформатора не влияет ни на форму, ни на число пиков на одном периоде изменения напряжения при наличии ОПН. Результаты этих исследований показаны на рис. 3. Здесь приведены изменения суммы токов трех фаз, т. е. Σi_n при наличии и отсутствии ОПН. При отсутствии ОПН кривые токов имеют такую форму, что при организации защиты отключения ЛЭП с их помощью не нужно и требуются дополнительные условия, в частности число пиков на одном периоде изменения напряжения.

Для задания параметров суммы токов трех фаз важно определение оптимальной длины линии, что существенно влияет на время расчетов. Для этого был проведен анализ феррорезонансных процессов при длинах ЛЭП соответственно 18, 36 и 72 км с учетом ОПН и без него. Здесь возможно рассмотреть различные мощности трансформатора. Так как основное внимание при проведении расчета феррорезонансных процессов было уделено анализу токов в начале линии, комплекс вычислительных экспериментов был выполнен при различных длинах линии ЛЭП и мощностях трансформатора. На рис. 4 приведены результаты расчетов Σi_n при отсутствии и наличии ОПН для трех вариантов длины ЛЭП при мощности трансформатора 20 МВ · А. Из кривых токов можно вычислить гармонические составляющие, которые при наличии ОПН имеют постоянные амплитуды.

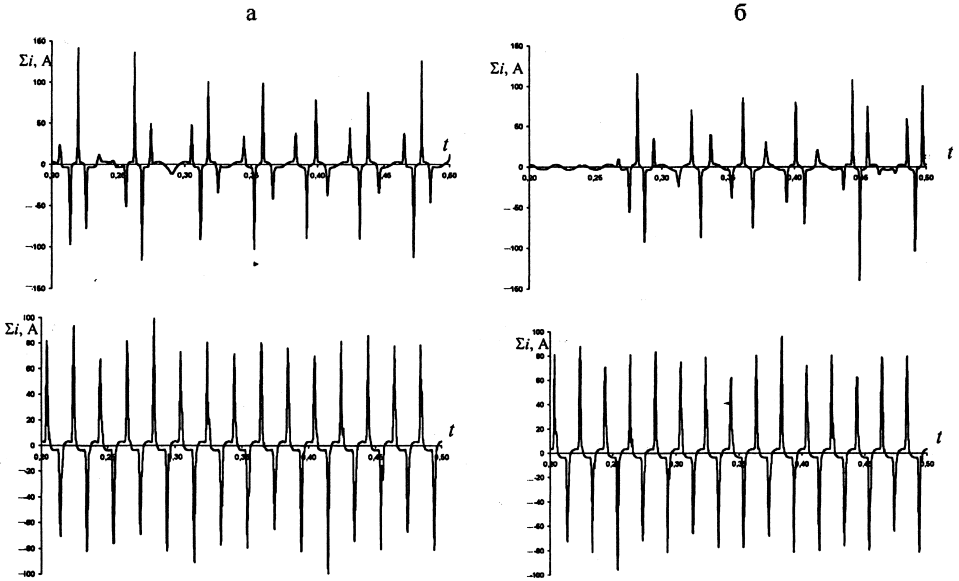


Рис. 3. Кривые суммы токов трех фаз в феррорезонансном процессе при однофазном включении трансформатора через ЛЭП длиной 18 км при отсутствии и наличии ОПН: а – мощность трансформатора 20 МВ · А; б – 40 МВ · А

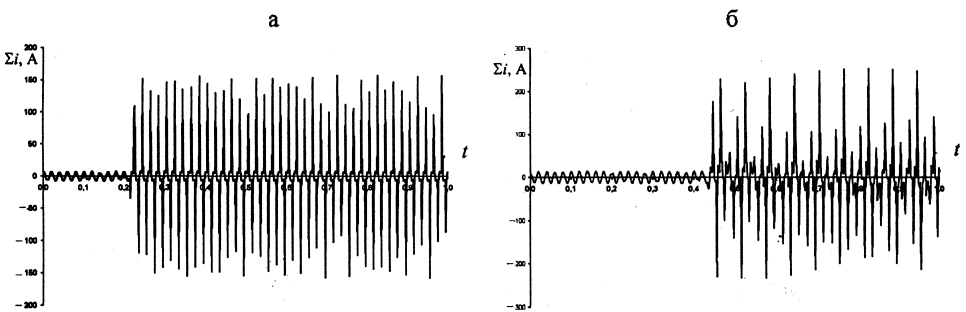


Рис. 4. Кривые токов трех фаз в феррорезонансном процессе при однофазном включении трансформатора мощностью 20 МВ · А при наличии ОПН: а – длина ЛЭП – 36 км; б – 72 км (ср. рис. 2)

Длительности феррорезонансных процессов, которые начинаются с определенным сдвигом по времени в зависимости от длины ЛЭП, как видно из рис. 4., не изменяют форму кривых токов при наличии ОПН и их установившиеся амплитуды наблюдаются с момента срабатывания ОПН, т. е. с момента возникновения феррорезонансного процесса. Это дает возможность настраивать защиту только на уровне перенапряжения и суммы токов трех фаз с соответствующими гармониками, пренебрегая длиной ЛЭП и мощностью трансформатора.

Учитывая, что в энергосистемах для защиты от перенапряжений начато массовое внедрение ОПН и его влияние при организации мероприятий по предотвращению неполнофазного режима ЛЭП становится существенным, естественно, возникает обратная задача – защита самого ОПН от длительного воздействия на него феррорезонансных перенапряжений при неполнофазном режиме ЛЭП, при котором через ОПН протекают недопустимые

токи, приводящие к тепловому разрушению его варисторов. Полученные данные позволяют сформулировать следующие рекомендации:

- для проведения предварительных апробаций разработанных устройств обнаружения и предотвращения феррорезонансных процессов можно успешно использовать предложенный алгоритм;
- использование устройства отключения ЛЭП с трансформатором при феррорезонансе, основанного на сумме токов трех фаз, оказывается более надежным в случае применения ОПН;
- целесообразно совмещать защиту оборудования как сетей, так и ОПН от феррорезонансных перенапряжений, используя характеристики ОПН в едином алгоритме при компьютерном моделировании.

ЛИТЕРАТУРА

1. Гашимов А. М., Дмитриев Е. В., Пивчик И. Р. Численный анализ волновых процессов в электрических сетях. – Новосибирск: Наука, 2003. – 147 с.
2. Расчетные формулы для уравнений линии электропередачи с учетом поверхностного эффекта и короны / Ч. М. Джуварлы, Е. В. Дмитриев, А. М. Гашимов, Б. М. Садыхов // Техническая электродинамика. – 1991. – № 1. – С. 85–92.
3. Алгоритм расчета подхода тока короткого замыкания к нулю и восстанавливающихся напряжений между контактами выключателей / Ч. М. Джуварлы, Е. В. Дмитриев, А. М. Гашимов, С. А. Рустамов // Техническая электродинамика. – 1995. – № 3. – С. 62–66.
4. Устройство для отключения линии электропередачи / Е. В. Дмитриев, А. М. Гашимов, И. Р. Пивчик, А. Р. Бабаева // Официальный бюллетень изобретения. – № 3. – 01.10.2003 (a2002 0103).
5. Тиходеев Н. Н., Шур С. С. Изоляция электрических сетей. – Л.: Энергия, 1979. – 304 с.
6. Математическое моделирование вольт-амперных характеристик защитных аппаратов / Е. В. Дмитриев, А. М. Гашимов, Г. Р. Кулиев, С. Г. Алиев // Изв. АН Азербайджана. Серия ФТ и МН. – 1998. – Т. XVIII, № 1. – С. 190–191.
7. Применение сплайн-интерполяции для моделирования ограничителей перенапряжений / Ч. М. Джуварлы, Е. В. Дмитриев, А. М. Гашимов и др. // ДАН-Баку: Элм, 1986. – Т. XLII, № 5. – С. 24–27.
8. Дмитриев Е. В., Гашимов А. М., Ахмедов Х. М. Защита оборудования электрических подстанций от высокочастотных перенапряжений слабнолинейными резисторами // Энергетика... (Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ). – 1999. – № 6. – С. 32–39.
9. Иманов Г. М., Халилов Ф. Х., Таджибаев А. И. Характеристики, выбор и размещение ограничителей перенапряжений 110...220 кВ: Учеб. пособие. – СПб.: Изд-во Минтопэнерго РФ. – 1997. – 42 с.
10. Евдокунин Г. А., Титенков С. С. Феррорезонансные перенапряжения при несимметричных включениях силовых трансформаторов 6...10 кВ // Изв. РАН. Энергетика. – 2001. – № 6. – С. 67–76.

Представлена лабораторией
физики и техники высоких напряжений

Поступила 22.03.2004