



PS1 – S3-04



Информационные параметры электрических величин переходного процесса для использования в защитах от замыканий на землю сетей среднего напряжения

В.А. ШУИН, О.А. САРБЕЕВА, Е.С. ШАГУРИНА
Ивановский государственный энергетический университет
Россия
shuin@rza.ispu.ru

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА

Электрические сети среднего напряжения, замыкания на землю, электромагнитные переходные процессы.

1 ВВЕДЕНИЕ

Однофазные замыкания на землю (ОЗЗ) в электрических сетях среднего напряжения, работающих с изолированной нейтралью или с резонансным заземлением нейтрали через дугогасящий реактор (ДГР), являются наиболее вероятным видом повреждений (70-90% от общего числа электрических повреждений) и часто являются причиной опасных кратковременных нарушений электроснабжения (КНЭ) или аварий, сопровождающихся значительным экономическим ущербом. Поэтому надежность электроснабжения потребителей в значительной мере зависит от технического совершенства (селективности и устойчивости функционирования) устройств защиты от ОЗЗ.

В рассматриваемых сетях в качестве защиты от ОЗЗ, действующей на сигнал или на отключение, применяются два основных типа устройств, соответственно основанных:

- на контроле значений и соотношений различных составляющих установившегося тока и напряжения нулевой последовательности (промышленной частоты, высших гармоник, «наложенных» токов – искусственно создаваемых при ОЗЗ составляющих не промышленной частоты);
- на контроле значений и соотношений электрических величин переходного процесса, возникающего в момент пробоя изоляции фазы сети на землю.

Для устройств защиты первого типа токи и напряжения электромагнитного переходного процесса при ОЗЗ являются помехами, искажающими значения и соотношения контролируемых величин установившегося режима ОЗЗ и оказывающими значительное влияние на динамическую устойчивость их функционирования. Для устройств второй группы электрические величины переходного процесса являются информационными сигналами.

К основным информационным параметрам электрических величин переходного процесса при ОЗЗ в сетях 6-10 кВ, влияющим на функционирование устройств защиты обеих указанных групп, относятся:

- значения токов и напряжений переходного процесса (амплитуды и интегральные значения) и их соотношения;
- частотные характеристики переходных токов и напряжений (спектр частот, амплитудно-частотные характеристики, энергетические характеристики);

Основными факторами, влияющими на значения и частоты переходных токов при ОЗЗ, являются: суммарный емкостный ток сети $I_{\Sigma\epsilon}$, индуктивность источника питания $L_{\text{и}}$, удаленность l_3 места ОЗЗ от шин источника питания, режим заземления нейтрали сети [1, 2].

Исследование и оценка информационных параметров электрических величин переходного процесса при ОЗЗ в электрических сетях среднего напряжения представляет важную задачу, решение которой необходимо для повышения технического совершенства защит от данного вида повреждений, прежде всего, устойчивости функционирования при наиболее опасных дуговых прерывистых (перемежающихся) замыканиях на землю.

Для определения значений и оценки диапазонов возможного изменения параметров электрических величин переходного процесса при ОЗЗ и исследования влияния на них указанных выше факторов могут быть использованы:

- аналитическое решение для уравнений переходного процесса при ОЗЗ;
- математическое моделирование переходных процессов при ОЗЗ на ЭВМ.

Эффективность имитационного моделирования на ЭВМ можно существенно повысить, если из множества влияющих факторов и их сочетаний предварительно приближенными аналитическими методами выделить основные и определить требуемый диапазон их изменения. Поэтому наилучшим методом исследования электромагнитных переходных процессов при ОЗЗ в сетях среднего напряжения представляется сочетание аналитических методов решения рассматриваемой задачи на основе упрощенной модели электрической сети среднего напряжения и метода имитационного моделирования на ЭВМ, обеспечивающего возможности усложнения и повышения точности модели.

2 ОСНОВНАЯ ЧАСТЬ

Аналитическое определение значений информационных параметров электрических величин переходного процесса при ОЗЗ в сетях с изолированной нейтралью. Практически все известные способы выполнения и исполнения устройств защиты от ОЗЗ основаны на использовании тока i_0 и напряжения u_0 нулевой последовательности. Аналитические решения для тока i_0 и напряжения нулевой последовательности при ОЗЗ можно получить только для упрощенной модели (схемы замещения) электрической сети. В то же время модель сети должна по возможности учитывать все основные факторы, влияющие на форму и амплитуду свободных составляющих i_0 и u_0 . В [1, 2] показано, что этому требованию в достаточной степени удовлетворяет схема замещения электрической сети среднего напряжения по рис. 1, учитывающая наличие в электрических величинах переходного процесса при ОЗЗ двух основных частотных составляющих – разрядной (связанной с разрядом емкостей поврежденной фазы) и зарядной (связанной с подзарядом емкостей неповрежденных фаз).

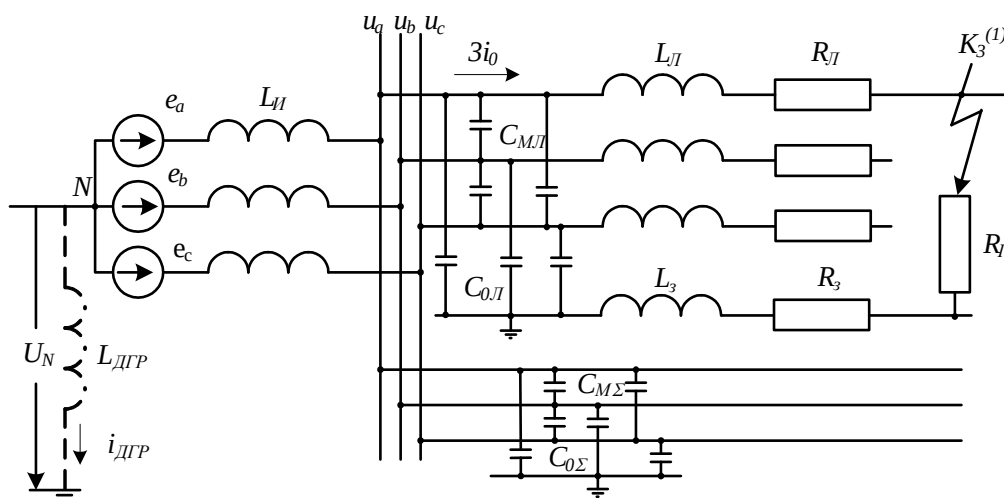


Рис. 1: Двухчастотная схема замещения радиальной сети среднего напряжения для анализа переходных процессов при ОЗЗ

Для схемы замещения сети по рис. 1, работающей с изолированной нейтралью, для напряжения нулевой последовательности $u_0(t)$ можно получить следующие уравнения [1, 2]:

$$u_0(t) = u_{np} + u_p + u_z \gg U_m \sin(\omega t + \varphi) - U_m a_1 e^{-\delta_p t} \left[\frac{\sqrt{\omega^2 \cos^2 \varphi + \omega_p^2 \sin^2 \varphi}}{\omega_p} \sin(\omega_p t + \varphi_p) - \frac{u_N(0)}{U_m} \cos \omega_p t \right] - U_m a_2 e^{-\delta_z t} \left[\frac{\sqrt{\omega^2 \cos^2 \varphi + \omega_z^2 \sin^2 \varphi}}{\omega_z} \sin(\omega_z t + \varphi_z) - \frac{u_N(0)}{U_m} \cos \omega_z t \right]; \quad (1)$$

$$U_{mp} = U_m a_1 \frac{\sqrt{\omega^2 \cos^2 \varphi + \omega_p^2 \sin^2 \varphi}}{\omega_p} \quad (2)$$

$$U_{mz} = U_m a_2 \frac{\sqrt{\omega^2 \cos^2 \varphi + \omega_z^2 \sin^2 \varphi}}{\omega_z} \quad (3)$$

где u_{np} – принужденная составляющая переходного напряжения $u_0(t)$; u_p – разрядная составляющая $u_0(t)$; u_z – зарядная составляющая $u_0(t)$; U_m – амплитуда составляющей напряжения промышленной частоты на поврежденной фазе; $u_N(0)$ – напряжение смещения нейтрали сети в момент пробоя изоляции; ω_p – частота разрядных колебаний; ω_z – частота зарядных колебаний; δ_p – постоянная затухания разрядных колебаний; δ_z – постоянная затухания зарядных колебаний;

$$tg \varphi_p = \frac{\omega_p \sin \varphi}{\omega \cos \varphi + \delta_p \sin \varphi}; \quad tg \varphi_z = \frac{\omega_z \sin \varphi}{\omega \cos \varphi + \delta_z \sin \varphi}; \quad a_1 = \frac{\omega_1^2 - \omega_z^2}{\omega_p^2 - \omega_z^2}; \quad a_2 = \frac{\omega_1^2 - \omega_p^2}{\omega_z^2 - \omega_p^2}.$$

Частоты ω_p , ω_z и постоянные затухания δ_p , δ_z разрядных и зарядных колебаний определяются из следующих уравнений [1, 2]:

$$\omega_p = \frac{1}{\sqrt{2}} \sqrt{k_c \omega_1^2 + \omega_2^2 + \sqrt{k_c^2 \omega_1^4 + \omega_2^4 + (2k_c - 4)\omega_1^2 \omega_2^2}}; \quad (4)$$

$$\omega_z = \frac{1}{\sqrt{2}} \sqrt{k_c \omega_1^2 + \omega_2^2 - \sqrt{k_c^2 \omega_1^4 + \omega_2^4 + (2k_c - 4)\omega_1^2 \omega_2^2}}; \quad (5)$$

$$\delta_p = \alpha \cdot \frac{\omega_p^2 - \omega_2^2}{2 \cdot (2\omega_p^2 - \omega_2^2 - k_c \cdot \omega_1^2)}; \quad (6)$$

$$\delta_z = \alpha \cdot \frac{\omega_z^2 - \omega_2^2}{2 \cdot (2\omega_z^2 - \omega_2^2 - k_c \cdot \omega_1^2)} \quad (7)$$

где $\alpha_1 = R_1/L_1$; $\omega_1^2 = 1/L_1 C_1$; $\omega_2^2 = 1/L_2 C_2$; $k_c = 1 + C_1/C_2$; $L_1 = 3L_{\text{Л}} + L_{\text{З}}$; $C_1 = C_{0\Sigma} + C_{0Л}$; $C_2 = C_{0\Sigma} + C_{0Л}$; $R_1 = 3R_{\text{Л}} + R_{\text{З}} + 3R_{\text{ЛЛ}}$; $L_2 = 2L_{\text{Л}}$; $C_2 = 0,5[C_{0\Sigma} + C_{0Л} + 3(C_{\text{М}\Sigma} + C_{\text{МЛ}})]$.

Переходный ток ОЗЗ в месте повреждения для сети с изолированной нейтралью пропорционален производной напряжения $u_0(t)$:

$$\begin{aligned} 3i_0 &= -3C_1 du_0/dt = i_{np} + i_z + i_p = \\ &= 3C_{0\Sigma} U_m \cos(\omega t + \varphi) + I_{mp} e^{-\delta_p t} \cos(\omega_p t + \theta_p) + \\ &+ I_{mz} e^{-\delta_z t} \cos(\omega_z t + \theta_z); \end{aligned} \quad (8)$$

$$I_{mp} = -3C_{0\Sigma} U_m \omega_p a_1 \sqrt{\frac{\omega^2 \cos^2 \varphi + \omega_p^2 \sin^2 \varphi}{\omega_p^2 + \delta_p^2}}; \quad (9)$$

$$I_{mz} = -3C_{0\Sigma} U_m \omega_z a_2 \sqrt{\frac{\omega^2 \cos^2 \varphi + \omega_z^2 \sin^2 \varphi}{\omega_z^2 + \delta_z^2}}, \quad (10)$$

где $\theta_{p,3} = \varphi_{p,3} + \arctg \frac{\delta_{p,3}}{\omega_{p,3}}$.

В компенсированных сетях ДГР из-за своей инерционности практически не влияет на амплитуду и частоту разрядной и зарядной составляющих переходного тока, поэтому параметры свободных составляющих тока и напряжения приближенно могут быть определены по (1)-(10).

При дуговых прерывистых ОЗЗ пробой изоляции при повторных пробоях возникает при больших, чем амплитуда U_m , значениях напряжения, что приводит к пропорциональному увеличению амплитуд разрядной и зарядной составляющих. Зная предельные значения напряжения на поврежденной фазе при повторных пробоях изоляции (например, [3]), по выражениям (8) – (10) можно определить составляющие переходного тока и при дуговых прерывистых ОЗЗ.

Амплитуды переходных токов при ОЗЗ. Амплитуды разрядной и зарядной составляющих переходного тока нулевой последовательности определялись по уравнениям (9), (10). На рис. 2 приведены полученные по уравнениям по указанным уравнениям ток переходного процесса при ОЗЗ и его составляющие.

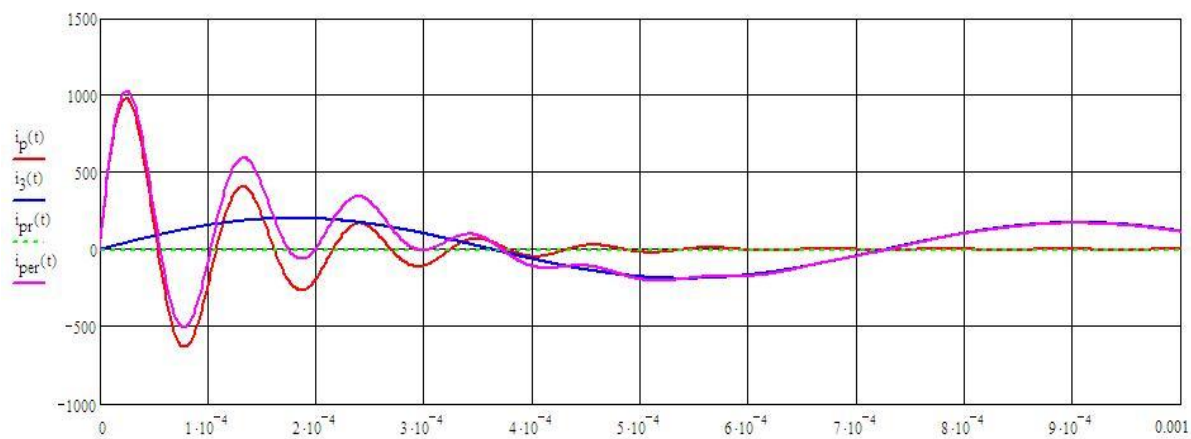


Рис. 2: Токи переходного процесса при ОЗЗ в сети 6 кВ с $I_{C\Sigma} = 30$ А при удаленности места ОЗЗ от шин $I_3 = 1$ км и $\varphi = 90^\circ$: $i_p(t)$ – разрядная составляющая; $i_3(t)$ – зарядная составляющая; $i_{pr}(t)$ – принужденная составляющая; $i(t)$ – полный ток переходного процесса

Из рис. 2 можно видеть, что при малых потерях в контуре нулевой последовательности сети, когда разрядная составляющая переходного тока $i_p(t)$ при ОЗЗ сохраняет колебательный характер, $I_{mp} \gg I_{m3}$ и амплитуда полного переходного тока $I_{mпер}$ определяется в основном значением I_{mp} и может быть определена как значение тока $3i_0$ при $t = t_m \approx 1/4f_p$ по выражению (8).

Наиболее существенное влияние на амплитуду I_{m3} зарядной составляющей тока переходного процесса оказывает величина суммарного емкостного тока сети $I_{C\Sigma}$ и индуктивности источника питания L_n (просто определяемой по значению тока трехфазного КЗ на шинах), на амплитуду разрядного составляющей I_{mp} – величина $I_{C\Sigma}$ и индуктивность поврежденной линии от шин до места пробоя, т.е. удаленность l_3 точки ОЗЗ от шин.

Расчеты показали, что при изменении суммарного емкостного тока сети $I_{C\Sigma}$ от 5 до 100 А, тока трехфазного КЗ на шинах источника питания от 5 до 20 кА и удаленности места ОЗЗ от шин от 0,1 до 10 км амплитуда разрядного тока I_{mp} и полного тока переходного процесса I_m в сетях напряжением 6-10 кВ может изменяться в пределах от сотен ампер до ~3 кА, амплитуда зарядного тока I_{m3} – до ~1 кА.

Результаты, полученные аналитическим путем по уравнениям (1) – (10), были проверены моделированием на ЭВМ с учетом распределенного характера параметров поврежденной линии для идентичных расчетных условий (параметры сети и поврежденной линии): расхождение результатов аналитического расчета и моделирования на ЭВМ не превышает ~5%.

Интегральные значения токов переходного процесса. Наиболее широкое применение в электрических сетях среднего напряжения получили токовые защиты (ТЗНП), и токовые

направленные (ТНЗНП) защиты нулевой последовательности, реагирующие на интегральные (как, правило, среднеквадратичные) значения тока и напряжения нулевой последовательности в защищаемом присоединении. ТЗНП с измерительными органами на электромеханической базе и большинство исполнений микропроцессорных ТЗНП и ТНЗНП реагируют на среднеквадратичное значение контролируемого тока. В микроэлектронных и микропроцессорных исполнениях для действия ТЗНП и ТНЗНП могут быть использованы также средневыпрямленные значения контролируемых тока и напряжения нулевой последовательности.

Для исследования динамической устойчивости функционирования различных исполнений ТЗНП, а также некоторых исполнений токовых направленных защит от ОЗЗ (ТНЗНП) представляют интерес интегральные значения переходных токов при однократном пробое изоляции и дуговом перемежающемся ОЗЗ.

Для однократного пробоя изоляции с гашением дуги при последнем переходе через нуль тока свободных колебаний (худший случай по условиям отстроенности ТЗНП от внешних ОЗЗ) из уравнений (9), (10) получим:

$$I_{эфф.одн} = \sqrt{\frac{1}{T_{зат}} \int_0^{T_{зат}} i_{неп}^2 dt} = \sqrt{\frac{1}{T_{зат}} \int_0^{T_{зат}} (i_p + i_z)^2 dt} = \sqrt{\frac{1}{T_{зат}} \int_0^{T_{зат}} \left(I_{mp} e^{-\delta_p t} \cos(\omega_p t + \theta_p) + I_{mz} e^{-\delta_z t} \cos(\omega_z t + \theta_z) \right)^2 dt}; \quad (11)$$

$$I_{ср.одн} = \frac{1}{T_{зат}} \int_0^{T_{зат}} |i_{неп}| dt \approx \frac{1}{T_{зат}} \int_0^{T_{зат}} |i_z + i_p| dt = \frac{1}{T_{зат}} \int_0^{T_{зат}} |I_{mp} e^{-\delta_p t} \cos(\omega_p t + \theta_p) + I_{mz} e^{-\delta_z t} \cos(\omega_z t + \theta_z)| dt; \quad (12)$$

$$I_{эфф.одн} = \sqrt{\frac{2}{T_{50}} \int_0^{T_{50}/2} i_{неп}^2 dt} = \sqrt{\frac{2}{T_{50}} \int_0^{T_{50}/2} (i_p + i_z)^2 dt} = \sqrt{\frac{2}{T_{50}} \int_0^{T_{50}/2} \left(I_{mp} e^{-\delta_p t} \cos(\omega_p t + \theta_p) + I_{mz} e^{-\delta_z t} \cos(\omega_z t + \theta_z) \right)^2 dt}; \quad (13)$$

$$I_{ср.одн} = \frac{2}{T_{50}} \int_0^{T_{50}/2} |i_{неп}| dt \approx \frac{1}{T_{зат}} \int_0^{T_{зат}} |i_z + i_p| dt = \frac{2}{T_{50}} \int_0^{T_{50}/2} |I_{mp} e^{-\delta_p t} \cos(\omega_p t + \theta_p) + I_{mz} e^{-\delta_z t} \cos(\omega_z t + \theta_z)| dt, \quad (14)$$

где $T_{зат}$ – время полного затухания свободных составляющих переходного процесса при ОЗЗ (может быть принято равным $\sim 3 \dots 5$ мс [3]).

Для случая гашения заземляющей дуги в момент перехода через нуль тока промышленной частоты (теория Петерса и Слепьяна)

$$I_{эфф.одн} = \sqrt{\frac{2}{T_{50}} \int_0^{T_{50}/2} i_{неп}^2 dt} = \sqrt{\frac{2}{T_{50}} \int_0^{T_{50}/2} (i_p + i_z)^2 dt} = \sqrt{\frac{2}{T_{50}} \int_0^{T_{50}/2} \left(I_{mp} e^{-\delta_p t} \cos(\omega_p t + \theta_p) + I_{mz} e^{-\delta_z t} \cos(\omega_z t + \theta_z) \right)^2 dt}; \quad (15)$$

$$I_{ср.одн} = \frac{2}{T_{50}} \int_0^{T_{50}/2} |i_{неп}| dt \approx \frac{1}{T_{зат}} \int_0^{T_{зат}} |i_z + i_p| dt = \frac{2}{T_{50}} \int_0^{T_{50}/2} |I_{mp} e^{-\delta_p t} \cos(\omega_p t + \theta_p) + I_{mz} e^{-\delta_z t} \cos(\omega_z t + \theta_z)| dt, \quad (16)$$

где $T_{50} = 20$ мс – период тока промышленной частоты.

Расчеты по выражениям (11) и (12) показывают, что фактором, оказывающим наибольшее влияние на интегральные значения переходного тока при однократном пробое, является суммарный емкостный ток сети $I_{\Sigma\epsilon}$.

При перемежающемся дуговым ОЗЗ по теории Петерсена амплитуда переходного при повторных пробоях изоляции в пределе может увеличиваться в 2,0...2,5 раза по сравнению с амплитудой переходного тока при первом пробое, при дуговом перемежающемся ОЗЗ по теории Петерса и Слепьяна - примерно в 2 раза.

Из рис. 3 можно видеть, что при дуговых перемежающихся ОЗЗ среднеквадратичное (эффективное) и средневыпрямленное значения контролируемого защитой тока могут увеличиваться в 5...15 раз по сравнению с установившимся режимом замыкания, что приводит к необходимости значительного загробления ряда исполнений ТЗНП, ограничению их чувствительности и области возможного применения [4].

Частоты токов переходного процесса. Частоты разрядной i_{0p} и зарядной i_{0z} составляющих тока переходного процесса могут быть определены из (4) и (5).

Анализ результатов расчета показал, что частоты указанных составляющих f_z и f_p в зависимости от параметров электрической сети и положения места ОЗЗ приближенно изменяются в пределах: $f_p = 3000...30000$ Гц и $f_z = 300...2000$ Гц.

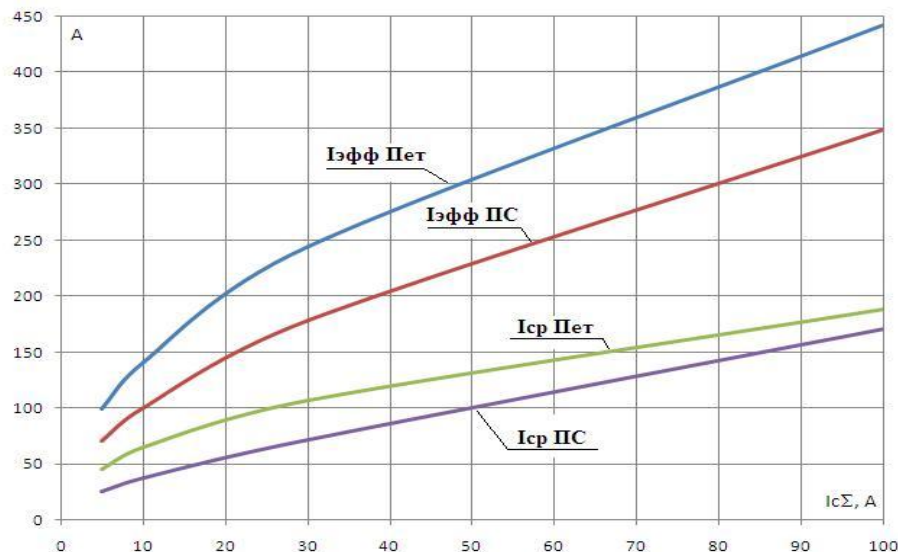


Рис. 3: Зависимости среднеквадратичных (эффективных) и среднев्यпрямленных значений переходного тока от суммарного емкостного тока кабельной сети 6 кВ при дуговом перемежающемся ОЗЗ по теории Петерсена и Петерса и Слепяна ($l_3 = 1$ км, $\varphi = 90^\circ$): $I_{эфф.Пет}$, $I_{ср.Пет}$ – эффективное и среднев्यпрямленное значения при гашении заземляющей дуги в момент перехода через ноль свободной составляющей тока переходного процесса (теория Петерсена); $I_{эфф.ПС}$, $I_{ср.ПС}$ – то же самое при гашении заземляющей дуги в момент перехода через ноль принужденной составляющей (теория Петерса и Слепяна)

Влияние частотной фильтрации на интегральные значения переходных токов ОЗЗ. Ограничить влияние токов переходного процесса на устойчивость функционирования ТЗНП при внешних дуговых прерывистых ОЗЗ можно с помощью входных фильтров низших частот (ФНЧ).

Расчеты на математической модели показали, что применение ФНЧ с частотой среза около 500 Гц позволяет ограничить среднев्यпрямленные значения переходного тока при дуговом перемежающемся ОЗЗ до значения, не превышающих среднев्यпрямленное значение установившегося тока замыкания на землю, т.е. обеспечивает эффективную отстройку от влияния токов переходного процесса.

Для получения аналогичного эффекта для ТЗНП, основанной на использовании среднеквадратичных (эффективных) значений контролируемого тока, необходимо применение ФНЧ с частотой среза около 300 Гц.

Спектральные характеристики переходных токов. Спектральная плотность $\tilde{S}(\omega)$, ее вещественная $A(\omega)$ и мнимая $B(\omega)$ части и амплитудно-частотная (АЧХ) характеристика непериодического сигнала $3i_0(t)$ определяются по выражениям [5]:

$$\tilde{S}(\omega) = \int_0^{t_n} 3i_0(t) e^{-j\omega t} dt = S(\omega) e^{-j\phi(\omega)} = A(\omega) - jB(\omega); \quad (17)$$

$$A(\omega) = \int_0^{t_n} 3i_0(t) \cos \omega t dt; \quad (18)$$

$$B(\omega) = \int_0^{t_n} 3i_0(t) \sin \omega t dt; \quad (19)$$

$$S(\omega) = \sqrt{A(\omega)^2 + B(\omega)^2}, \quad (20)$$

где t_n – время наблюдения непериодического сигнала, принимаемое в данном случае равным времени затухания свободных составляющих переходного процесса при ОЗЗ ($\sim 3...5$ мс [3]).

Связь между энергией сигнала и его спектральной характеристикой устанавливается равенством Парсеваля:

$$E = \int_0^{t_n} [3i_0(t)]^2 dt = \frac{1}{2\pi} \int_0^\infty S(\omega)^2 d\omega, \quad (21)$$

где E – энергия, выделяемая током $i_3(t)$ на сопротивлении 1 Ом.

По выражениям (18) – (21) с использованием выражений (1) – (10) были рассчитаны зависимости энергии тока переходного процесса при ОЗЗ в диапазоне частот $f = 0 \dots 10000$ Гц при варьировании суммарного емкостного тока сети $I_{C\Sigma}$ в пределах 5...100 А, удаленности места ОЗЗ от шин I_3 в пределах 0,1...10 км и величины тока трехфазного КЗ на шинах $I_K^{(3)}$ в пределах 5...20 кА.

Расчеты показали, что основная часть энергии (более 90%) свободных составляющих тока переходного процесса при ОЗЗ в кабельных сетях напряжением 6 – 10 кВ сосредоточена в спектральном диапазоне с верхней частотой $f = 3-4$ кГц (например, рис. 4).

Наиболее существенное влияние на верхнюю частоту указанного диапазона оказывают суммарный емкостный ток сети и индуктивность источника питания (величина тока трехфазного КЗ на шинах источника). Полученные результаты показывают, что без ущерба для эффективности функционирования при внутренних повреждениях защит от ОЗЗ, основанных на использовании электрических величин переходного процесса, рабочий диапазон частот можно ограничить верхней частотой $f \leq 3-4$ кГц. Это позволяет существенно упростить требования к подобным защитам от ОЗЗ на микропроцессорной элементной базе.

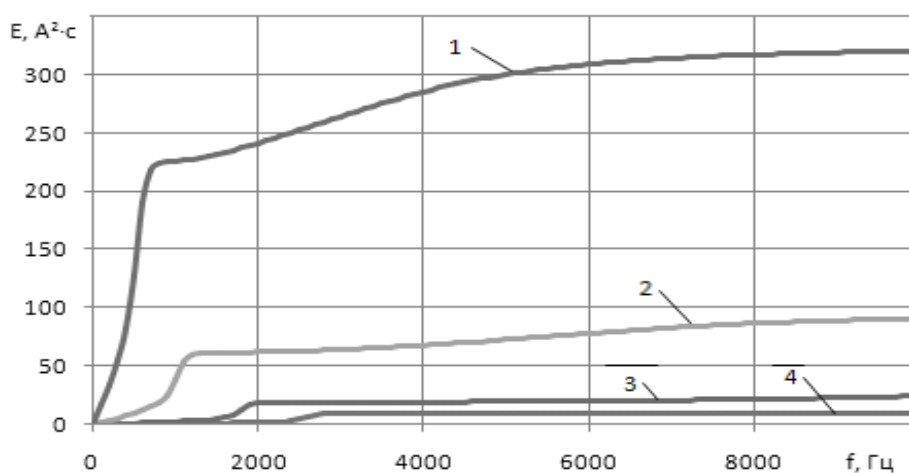


Рис. 4: Зависимость энергии свободных составляющих тока переходного процесса сети с $U_{ном} = 6$ кВ, $I_K^{(3)} = 10$ кА при $I_3 = 1$ км от частоты для различных значений суммарного емкостного тока сети $I_{C\Sigma}$: 1 – $I_{C\Sigma} = 100$ А; 2 – $I_{C\Sigma} = 30$ А; 3 – $I_{C\Sigma} = 10$ А; 4 – $I_{C\Sigma} = 50$ А

3 ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. На функционирование различных исполнений защит от ОЗЗ электрических сетей среднего напряжения существенное влияние оказывают значения токов и напряжений электромагнитных переходных процессов (амплитуды и интегральные значения) и их соотношения, частотные характеристики переходных токов и напряжений (спектр частот, амплитудно-частотные характеристики, энергетические характеристики) электрических величин переходного процесса.

2. На основе решения уравнений переходного процесса при ОЗЗ для упрощенной двухчастотной схемы замещения электрической сети среднего напряжения получены аналитические выражения для оценки основных информационных параметров токов переходного процесса: амплитудных и интегральных значений, частот разрядной и зарядной

составляющих, энергетических характеристик при однократном пробое изоляции и при дуговых прерывистых ОЗЗ по теориям Петерсена и Петерса и Слепяна.

3. Расчеты показали, что при дуговых перемежающихся ОЗЗ среднеквадратичное (эффективное) и средневыпрямленное значения тока в месте повреждения могут увеличиваться в 10...15 раз по сравнению с установившимся режимом замыкания, что приводит к необходимости значительного заглубления большинства исполнений ТЗНП, ограничению их чувствительности и области возможного применения.

4. Применение ФНЧ с частотой среза около 300-500 Гц позволяет ограничить среднеквадратичное и средневыпрямленное значения переходных токов при дуговом перемежающемся ОЗЗ до значений, не превышающих среднеквадратичное и средневыпрямленное значения установившегося тока замыкания на землю, т.е. обеспечивает эффективную отстройку ТЗНП с ИОТ, реагирующим на эффективное значение контролируемого тока от влияния электромагнитных переходных процессов.

5. Основная часть энергии (более 90%) свободных составляющих тока переходного процесса при ОЗЗ в кабельных сетях напряжением 6 – 10 кВ сосредоточена в спектральном диапазоне с верхней частотой $f = 3-4$ кГц, что позволяет ограничить рабочий диапазон частот и существенно упростить требования к защитам от ОЗЗ, основанным на использовании переходных процессов, на микропроцессорной базе.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Шуин, В.А. Начальные фазовые соотношения электрических величин переходного процесса при замыканиях на землю в кабельных сетях 6-10 кВ // Электричество. – 1991, № 10. – С. 58 – 61.
- [2] Шуин В.А. Теория и практическая реализация защит от однофазных замыканий на землю, основанных на использовании переходных процессов, в электрических сетях 3-35 кВ / Дисс. ... докт. техн. наук. – М.: ВНИИЭ, 1994.
- [3] Лихачев Ф.А. Замыкания на землю в сетях с изолированной нейтралью и с компенсацией емкостных токов. - М.: Энергия, 1971.
- [4] Шуин В.А., Сарбеева О.А., Чутрова Е.С. Влияние электромагнитных переходных процессов на функционирование токовых защит от замыканий на землю в электрических сетях 6-10 кВ // Вестник ИГЭУ. – 2009, Вып. 4. – С. 84 – 91.
- [5] Гоноровский И.С. Радиотехнические цепи и сигналы: Учебник для вузов. Изд. 3-е, перераб. И доп. – М.: «Советское радио», 1977.