

ТОКОВЫЕ НАГРУЗКИ НА ОГРАНИЧИТЕЛИ ПЕРЕНАПРЯЖЕНИЙ ПРИ ОДНОФАЗНЫХ ЗАМЫКАНИЯХ НА ЗЕМЛЮ В РАСПРЕДЕЛИТЕЛЬНЫХ СЕТЯХ 6-10 кВ

Барановская М.Л., Иончиков А.Н.
Криворожский технический университет

Введение. Перенапряжения - одна из основных причин выхода из строя элементов электрических сетей 6-10 кВ. В кабельных сетях по частоте возникновения на первом месте стоят перенапряжения от однофазных дуговых замыканий на землю (80 %), на втором (10 %) - перенапряжения от феррорезонансных явлений [1].

Ограничить перенапряжения до любого заданного уровня при однофазных замыканиях на землю возможно с применением нелинейных ограничителей перенапряжений (ОПН) [2]. Для определения формы, амплитуды, длительности тока, протекающего через ограничитель, выполнены исследования переходных процессов в распределительной сети с ОПН [3].

Цель работы. Целью работы является расчет токовых нагрузок на ограничителях перенапряжений при однофазных замыканиях на землю.

Материал и результаты исследований.

Поскольку ограничители непрерывно изменяют параметры модели, для исследования выбран метод последовательных интервалов (с основным недостатком - накопление погрешности при последующих интервалах времени). При рациональном выборе интервала времени и повышении точности на предыдущих интервалах [4] он позволил произвести оценку угловых частот, амплитуд, декрементов затухания свободных составляющих в любой момент времени.

Схема замещения распределительной сети с ОПН (рис. 1) описывается системой нелинейных дифференциальных уравнений (1):

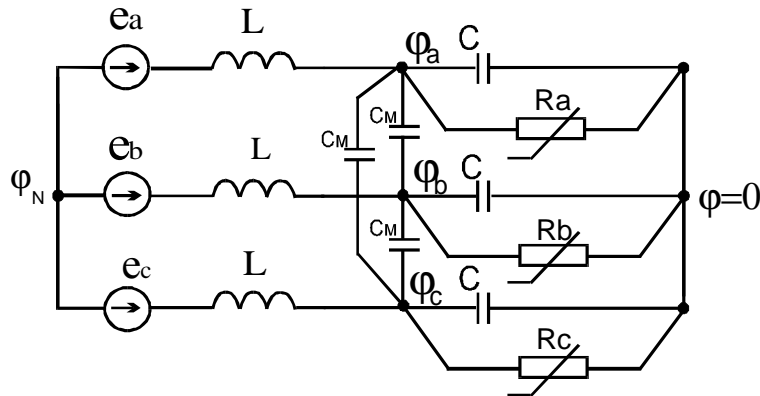


Рисунок 1 - Схема замещения распределительной сети с нелинейными ограничителями перенапряжений

$$\left. \begin{aligned} \frac{1}{L} \int (\varphi_N + e_a - \varphi_a) dt + C_M \frac{d(\varphi_c - \varphi_a)}{dt} - C_M \frac{d(\varphi_a - \varphi_b)}{dt} - C \frac{d\varphi_a}{dt} - \frac{\varphi_a}{R_a(\varphi_a)} &= 0; \\ \frac{1}{L} \int (\varphi_N + e_b - \varphi_b) dt + C_M \frac{d(\varphi_a - \varphi_b)}{dt} - C_M \frac{d(\varphi_b - \varphi_c)}{dt} - C \frac{d\varphi_b}{dt} - \frac{\varphi_b}{R_b(\varphi_b)} &= 0; \\ \frac{1}{L} \int (\varphi_N + e_c - \varphi_c) dt + C_M \frac{d(\varphi_b - \varphi_c)}{dt} - C_M \frac{d(\varphi_c - \varphi_a)}{dt} - C \frac{d\varphi_c}{dt} - \frac{\varphi_c}{R_c(\varphi_c)} &= 0; \\ \frac{1}{L} \int (\varphi_N + e_a - \varphi_a) dt + \frac{1}{L} \int (\varphi_N + e_b - \varphi_b) dt + \frac{1}{L} \int (\varphi_N + e_c - \varphi_c) dt &= 0, \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

где $R_a(\varphi_a)$, $R_b(\varphi_b)$, $R_c(\varphi_c)$ - активные сопротивления фаз относительно земли, которые являются эквивалентными для сопротивлений изоляции фаз и сопротивлений, вносимыми ОПН.

С учетом выражения $k = C_M/C$ преобразуем систему дифференциальных уравнений (1):

$$\left. \begin{aligned} (1+2k)C \frac{d\varphi_a}{dt} + \frac{1}{L} \int \varphi_a dt + \frac{\varphi_a}{R_a} - kC \frac{d\varphi_b}{dt} - kC \frac{d\varphi_c}{dt} - \frac{1}{L} \int \varphi_N dt &= \frac{1}{L} \int e_a dt; \\ (1+2k)C \frac{d\varphi_b}{dt} + \frac{1}{L} \int \varphi_b dt + \frac{\varphi_b}{R_b} - kC \frac{d\varphi_a}{dt} - kC \frac{d\varphi_c}{dt} - \frac{1}{L} \int \varphi_N dt &= \frac{1}{L} \int e_b dt; \\ (1+2k)C \frac{d\varphi_c}{dt} + \frac{1}{L} \int \varphi_c dt + \frac{\varphi_c}{R_c} - kC \frac{d\varphi_a}{dt} - kC \frac{d\varphi_b}{dt} - \frac{1}{L} \int \varphi_N dt &= \frac{1}{L} \int e_c dt; \\ \frac{1}{L} \int \varphi_a dt + \frac{1}{L} \int \varphi_b dt + \frac{1}{L} \int \varphi_c dt - \frac{3}{L} \int \varphi_N dt &= \frac{1}{L} \int (e_a + e_b + e_c) dt, \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

где R_a, R_b, R_c - значения активных сопротивлений фаз относительно земли на заданном интервале времени.

Характеристическое уравнение данной системы имеет вид:

$$\nabla = \begin{vmatrix} \left[\frac{1}{Lp} + (1+2k)Cp + \frac{1}{R_a} \right] - kCp & -kCp & -\frac{1}{Lp} \\ -kCp & \left[\frac{1}{Lp} + (1+2k)Cp + \frac{1}{R_b} \right] - kCp & -\frac{1}{Lp} \\ -kCp & -kCp & \left[\frac{1}{Lp} + (1+2k)Cp + \frac{1}{R_c} \right] - \frac{1}{Lp} \\ -\frac{1}{Lp} & -\frac{1}{Lp} & -\frac{1}{Lp} & \frac{3}{Lp} \end{vmatrix} = 0. \quad (3)$$

Преобразуя определитель, получим

$$p^5 + \frac{(1+k)G_1}{1+3k} \frac{1}{C} p^4 + \left[\frac{2}{(1+3k)} \frac{1}{LC} + \frac{(1+2k)G_2}{(1+3k)^2} \frac{1}{C^2} \right] p^3 + \left[\frac{2(2+3k)G_1}{3(1+3k)} \frac{1}{LC^2} + \frac{G_0}{(1+3k)^2} \frac{1}{C^3} \right] p^2 + \left[\frac{1}{(1+3k)^2} \frac{1}{L^2 C^2} + \frac{2}{3(1+3k)^2} \frac{G_2}{LC^3} \right] p + \frac{1}{3(1+3k)^2} \frac{G_1}{L^2 C^3} = 0. \quad (4)$$

Затем

$$p^5 + \frac{1+k}{(1+3k)} G_{1*} p^4 + \left[\frac{2}{(1+3k)} + \frac{(1+2k)}{(1+3k)^2} G_{2*} \right] p^3 + \left[\frac{2(2+3k)}{3(1+3k)^2} G_{1*} + \frac{1}{(1+3k)^2} G_{0*} \right] p^2 + \left[\frac{1}{(1+3k)^2} + \frac{2}{3(1+3k)^2} G_{2*} \right] p + \frac{1}{3(1+3k)^2} G_{1*} = 0. \quad (5)$$

Решением уравнения (5) являются корни: один действительный p_{1*} и две пары комплексно-сопряженных $p_{2,3*} = \delta_{1*} \pm \omega_{k1*} j$,

$p_{3,4*} = \delta_{2*} \pm \omega_{k2*} j$. Тогда напряжения фаз будут изменяться по закону:

$$\varphi_i(t) = \varphi_{\infty i} \sin(\omega t + \psi_{\infty i}) + A_1 e^{p_{1*} \omega_0 t} + A_2 e^{\delta_{1*} \omega_0 t} \sin(\omega_{k1*} \omega_0 t + \nu_1) + A_3 e^{\delta_{2*} \omega_0 t} \sin(\omega_{k2*} \omega_0 t + \nu_2) \quad (6)$$

Анализ результатов решения характеристического уравнения и вычисленных амплитуд свободных составляющих переходного процесса показывает, что корни характеристического уравнения и амплитуды напряжений в процессе развития переходного процесса определяются сопротивлением цепи замыкания на землю R [5] и только при снижении сопро-

тивлений ОПН до нескольких ρ ($\rho = \sqrt{L/C}$) зависят и от сопротивлений, вносимых ограничителями.

С увеличением сопротивления цепи замыкания на землю амплитуды токов уменьшаются (расчеты выполнены для сети 6,3 кВ и глубокого ограничения напряжений: $U_{фм} = 5134$ В; $U_{ост1=100A} = 10,5$ кВ.).

При $R_* > 1$ воздействия на ОПН минимальны (рис. 2).

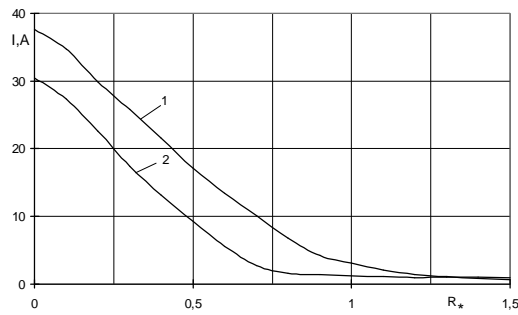
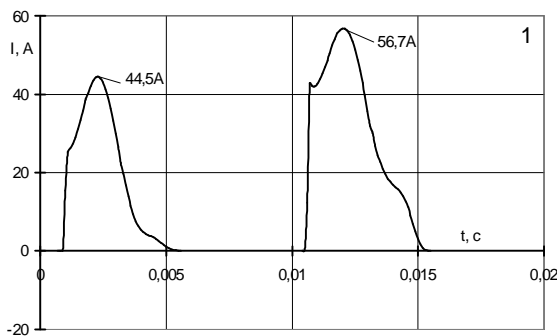


Рисунок 2 - Графики зависимостей максимальных амплитуд в ограничителях за время T_c от сопротивления цепи замыкания на землю ($U_{фм} = 5134$

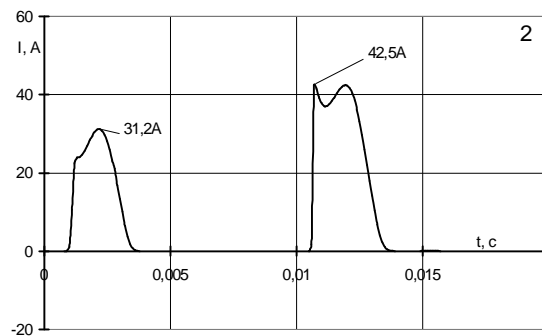
В; $U_{ост I=100A} = 10,5$ кВ):

1- $0,05$ Гн; $C = 2,5$ мкФ; 2 - $L = 0,01$ Гн; $C = 0,5$ мкФ

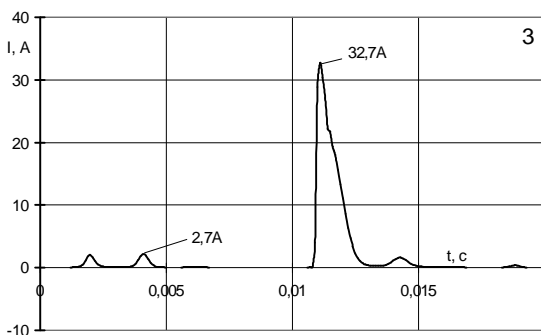
В сетях с высокой частотой собственных колебаний и при не глубоком уровне ограничения через ограничители могут протекать токи в виде серии кратковременных импульсов, а в сетях с низкой частотой - в виде одиночных импульсов, максимальные амплитуды и длительности которых увеличиваются с увеличением глубины ограничения (рис. 3) Графики зависимостей максимальных амплитуд от уровня ограничения перенапряжений в сети с напряжением 6,3 кВ представлены на рис. 4.



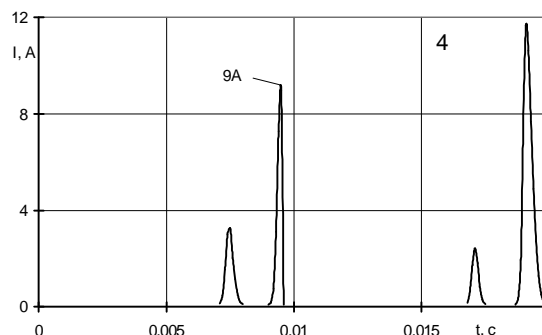
а)



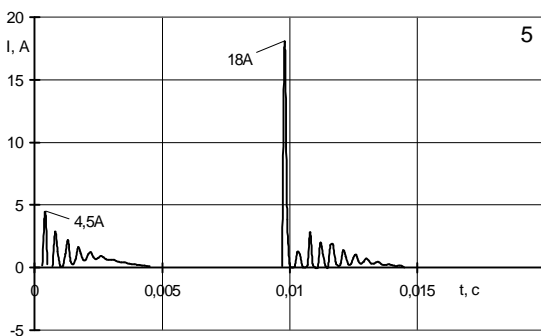
б)



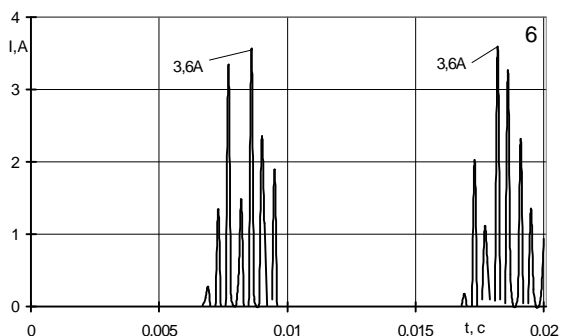
в)



г)



д)



е)

Рисунок 3 - Формы и амплитуды токов в нелинейных ограничителях перенапряжений ОП-6-1а: токи в ограничителе опережающей фазы для $L=0,05$ Гн, $C=2,5$ мкФ, $R_* = 0,05$, $U_{фм} = 5880$ В - а)- $U_{ост I=100A} = 10,5$ кВ , б)- $U_{ост I=100A} = 12$ кВ , в)- $U_{ост I=100A} = 18,2$ кВ ; токи в ограничителе поврежденной фазы при $R_* = 0,1$, $U_{фм} = 5208$ В: г) для $L=0,05$ Гн; $C=2,5$ мкФ; е)- для $L=0,01$ Гн; $C=0,5$ мкФ; д) токи в ог-

раничителе опережающей фазы ($L=0,01$ Гн; $C=0,5$ мкФ; $R_*=0,1$; $U_{фм} = 5208$ В)

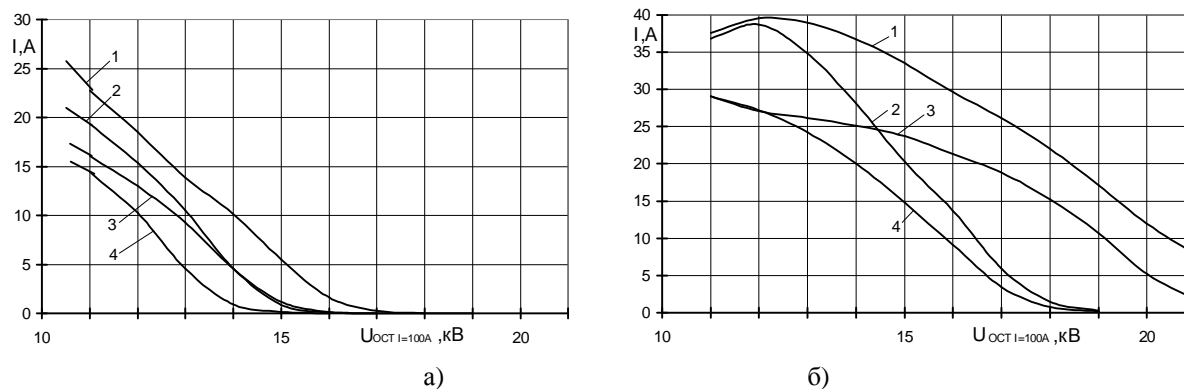


Рисунок 4 - Графики зависимостей максимальных амплитуд токов при горении дуги в ОПН от уровня ограничения ($R_*=0,05$):

а) - в первом цикле; б) - во втором цикле; 1,2 - $f_0=450$ Гц; 3,4 - $f_0=2250$ Гц; 1,3 - $C_M=0$; 2,4 - $C_M=C/3$

Выводы. Исследование ОЗЗ в распределительной сети с напряжением 6,3 кВ показывает, что максимальные амплитуды токов ОПН в первом цикле незначительны и составляют 15-30 А при $U_{остI=100A} = 10,5$ кВ, при $U_{остI=100A} = 15-17$ кВ - практически равны нулю. При повторном зажигании дуги нагрузки на ОПН возрастают до 30-50 А при $U_{остI=100A} = 10-12$ кВ. Увеличение уровня ограничения перенапряжений приводит к уменьшению токовых нагрузок на ОПН. При повторных зажиганиях дуги междуфазная емкость $C_M=C/3$ эффективно ограничивает амплитуды токов ОПН лишь при $U_{остI=100A} > 12$ кВ, при $U_{остI=100A} = 18-19$ кВ они примерно равны нулю.

Проведенные на математической модели исследования форм и максимальных амплитуд токов в ОПН показали, что они зависят от величины сопротивления цепи замыкания на землю, от уровня ограничения и от параметров распределительных сетей.

ЛИТЕРАТУРА

1. Самойлович И.С. Защита от перенапряжений электроустановок открытых горных работ. - М.: Недра, 1992. - 128 с.
2. Дергилев М.П., Обабков В.К. К вопросу о перенапряжениях в сетях 6-10 кВ горных предприятий // Промышленная энергетика. - 1992. - №6. - С. 46-48.
3. Васюра Ю.Ф., Вильнер А.В. Диапазоны изменения амплитуд токов через ограничители перенапряжений в сетях собственных нужд электростанций // Электротехника. - 1988. - №3. - С. 17-21.
4. Барановская М.Л., Иончиков А.Н. Ограничение перенапряжений в распределительных сетях при включении нелинейных ограничителей перенапряжений // "Вісник" КДПУ, Наукові праці Кременчуцького державного політехнічного університету- Выпуск 3/2005 (32). - Кременчуг: 2005. - С. 138-141.
5. Барановская М.Л. Влияние сопротивления цепи замыкания на землю на характер и уровни перенапряжений при однофазных замыканиях // Разработка рудных месторождений. - Кривой Рог. - 1998. - №63. - С. 31-37.

Стаття поступила 15.03.06 г.
Рекомендовано к печати д.т.н., проф.
Синолицым А.Ф.