Записки Ленинградского ордена Ленина, ордена Октябрьской Революции
и ордена Трудового Красного Знамени горного института им. Г.В.Плеханова,
т. /XXXIУ, 1979 г.

ПРИБЛИЖЕННЫЙ МЕТОД РАСЧЕТА РЕЖИМОВ РАБОТЫ УПК С НЕЛИНЕЙНЫМ ИНДУКТИВНЫМ ШУНТИРУЮЩИМ ЭЛЕМЕНТОМ

В.Г.БАУМАН, В.М.КВЯТКОВСКИЙ,
С.А.МАКСИМОВ

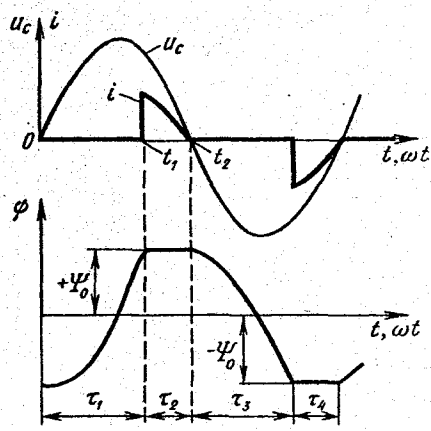


Рис.1. Графики напряжений, тока и потокосцепления нелинейного индуктивного шунта

Для защиты установок продольно-емкостной компенсации УПК от перенапряжений при возрастании тока в цепи можно использовать нелинейный индуктивный шунт [1, 2]. Строгий расчет режимов работы сети с установкой продольной компенсации УПК в этом случае представляет достаточно сложную задачу.

Приближенное решение возможно методом эквивалентных синусоид. Как показали расчеты на аналоговой машине, а также опыты на физической модели и в натуре на УПК (на производственном объединении „Белоруськалий"), ток в сети и напряжение на конденсаторе можно считать практически синусоидальными.

При анализе режимов работы цепи полагаем, что вебер-амперная характеристика катушки идеальная, т.е. прямоугольная с индукцией насыщения $\pm \Psi_0$ и намагничивающим током до насыщения равным нулю. В насыщенном состоянии ($i \neq 0$) потокосцепление сохраняется неизменным и ток в цепи катушки ограничен активным сопротивлением r .

Потокосцепление катушки, ток катушки и напряжение на емкости будут изменяться в функции времени t так, как это показано на рис.1, при этом x_c - емкостное сопротивление конденсаторов УПК; I_{mc} - амплитуда тока конденсаторов; ω - угловая частота тока;

$$\Psi(t) = \frac{x_c I_{mc}}{\omega} (1 - \cos \omega t) - \Psi_0 . \qquad (1)$$

По выражению (I) находим момент насыщения сердечника катушки t_1, который наступает при $\Psi(t) = \Psi_0$, откуда

$$2\Psi_0 = \frac{x_C I_{mC}}{\omega}\left(1 - \cos\omega t_1\right). \qquad (2)$$

В насыщенном состоянии $t_1 \leqslant t \leqslant \frac{T}{2}$ по обмотке катушки протекает ток

$$i = \frac{x_C I_{mC}}{r}\sin\omega t. \qquad (3)$$

Вводя интервал протекания тока

$$\tau_2 = \pi - \tau_1, \qquad (4)$$

(где $\tau_1 = \omega t_1$ - 0 интервал времени, в течение которого шунтирующая цепь заперта), получаем из формулы (2)

$$2\Psi_0 = \frac{x_C I_{mC}}{\omega}\left(1 + \cos\tau_2\right). \qquad (5)$$

Действующее значение тока катушки

$$I = \sqrt{\frac{2}{T}\int_0^{\frac{T}{2}} i^2 dt} = \frac{x_C I_C}{r}\sqrt{\frac{\tau_2 - \frac{\sin 2\tau_2}{2}}{\pi}}, \qquad (6)$$

где $I_C = \frac{I_{mC}}{\sqrt{2}}$.

Угол сдвига эквивалентной синусоиды тока катушки I относительно напряжения на конденсаторе $U_C = x_C I_C$ находим из условия равенства мощностей

$$P = rI^2 \quad \text{и} \quad P = U_C I\cos\varphi_э .$$

Откуда

$$\cos\varphi_э = \sqrt{\frac{\tau_2 - \frac{\sin 2\tau_2}{2}}{\pi}}. \qquad (7)$$

Режим работы фидера с включенной УПК рассчитан для рис.2. Для этой схемы, где r_1, x_1 - активное и индуктивное сопротивления предвключенных участков сети, можно записать уравнения

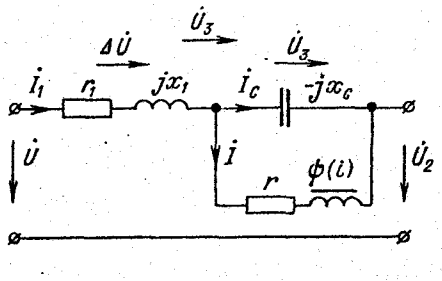


Рис.2. Схема фидера с УПК (одна фаза)

$$\begin{aligned}
&\dot{I}_1 = \dot{I}_C + \dot{I};\\
&\dot{U}_C = -jx_C\dot{I}_C;\\
&\dot{U}_1 = \dot{U}_2 + \dot{U}_3;\\
&\dot{U}_3 = \dot{U}_C + \Delta\dot{U};\\
&\Delta\dot{U} = (r_1 + jx_1)\dot{I}_1 .
\end{aligned} \qquad (8)$$

Обозначения напряжений и токов и выбор их положительных направлений очевидны из рис.2. Дополнительным условием является неизменная величина модуля напряжения $|\dot{U}_1|$.

Порядок расчета следующий. Для заданного значения τ_2 и Ψ_0 находим по формуле (5) величину тока конденсатора

$$I_C = \frac{2\Psi_0}{x_C(1+\cos\tau_2)}, \tag{9}$$

по формуле (7) - значение $\cos\varphi_э$ и величину угла $\varphi_э$, по формуле (6) - величину тока катушки

$$I = \frac{x_C I_C}{r}\cos\varphi_э . \tag{10}$$

Считая, что напряжение на конденсаторе $\dot{U}_C = x_C I_C$ имеет нулевую начальную фазу, комплексные значения токов

$$\begin{aligned} \dot{I} &= Ie^{-j\varphi_э}, \\ \dot{I}_C &= I_C e^{j90^\circ}. \end{aligned} \tag{11}$$

По этим величинам находим

$$\dot{I}_1 = \dot{I} + \dot{I}_C , \tag{12}$$

имеющий модуль I_1 и начальную фазу θ_1. Далее находим величину падения напряжения в комплексном сопротивлении $r_1 + jx_1$

$$\Delta\dot{U} = (r_1 + jx_1)\dot{I}_1 \tag{13}$$

и величину суммарного падения напряжения

$$\dot{U}_3 = \dot{U}_C + \Delta\dot{U}. \tag{14}$$

Начальная фаза θ_2 напряжения $\dot{U}_2$ может быть найдена, как сумма начальной фазы тока $\dot{I}_1$ и заданного фазового угла сдвига нагрузки φ_2,

$$\theta_2 = \theta_1 + \varphi_2 . \tag{15}$$

На основании третьего уравнения системы (8) можно получить выражение для вычисления величины напряжения U_2 ; если $\dot{U}_1 = U_1' + jU_1''$ и $\dot{U}_3 = U_3' + jU_3''$, а $\dot{U}_2 = U_2 e^{j\theta_2} = U_2\cos\theta_2 + jU_2\sin\theta_2$, то

$$\begin{aligned} U_1' &= U_2\cos\theta_2 + U_3', \\ U_1'' &= U_2\sin\theta_2 + U_3''; \end{aligned}$$

принимая во внимание $|\dot{U}_1| = \text{const}$, находим

$$U_1^2 = (U_1')^2 + (U_1'')^2 = (U_2\cos\theta_2 + U_3')^2 + (U_2\sin\theta_2 + U_3'')^2,$$

откуда

$$U_2 = -(U_3'\cos\theta_2 + U_3''\cos\theta_2) + \sqrt{(U_3'\cos\theta_2 + U_3''\sin\theta_2)^2 + U_1^2 - U_3^2} . \tag{16}$$

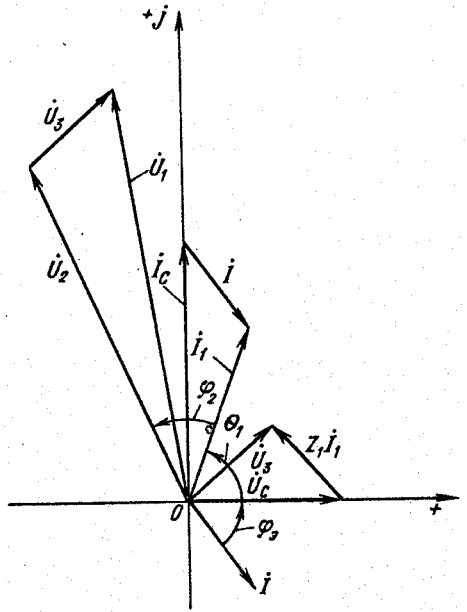


Рис.3. Векторная диаграмма напряжений и токов одной фазы УПК

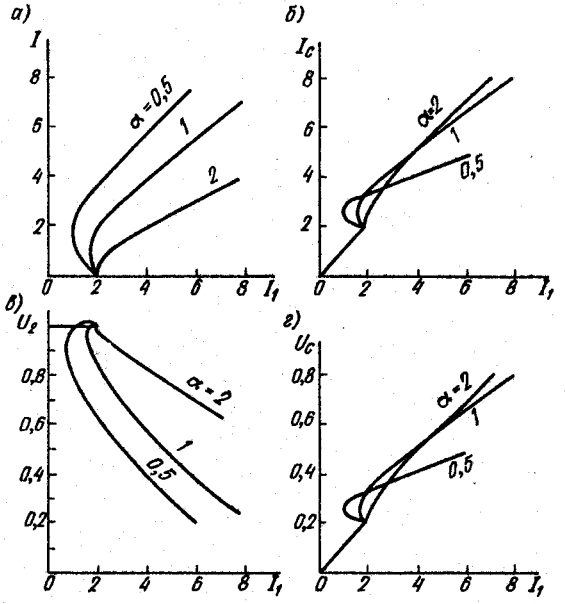


Рис.4. Графики напряжений и токов УПК в функции полного тока при различных отношениях $\alpha = r'/x_c$: а – $I = f(I_1)$; б – $I_c = f(I_1)$; в – $U_2 = f(I_1)$; г – $U_C = f(I_1)$

Все приведенные связи величин показаны на векторной диаграмме рис.3.

П р и м е р. Пусть заданы величины в относительных единицах $U = 1$; $\Psi_0 = 0{,}2$; $x_C = 0{,}1$; $r = 0{,}1$; $\tau_2 = 20^0$; $r_1 = 0{,}01$; $x_1 = 0{,}1$; $\cos\varphi_2 = 0{,}8$ (индуктивный) при базисных $U_б = U_н$; $I_б = I_н$; $\Psi_б = \frac{U_б\sqrt{2}}{\omega}$.

Согласно (9), находим ток конденсатора $I_C = 2{,}062$.

Напряжение на конденсаторе $U_C = 0{,}2062$.

Из условия (7) определяем угол сдвига эквивалентной синусоиды тока $\cos\varphi_э = 0{,}0938$ и затем $\varphi_э = 84{,}6^0$.

Действующее значение эквивалентной синусоиды тока, согласно (10), $I = 0{,}1868$.

В соответствии с векторной диаграммой рис.3, $\dot{I}_C = I_C e^{j90^\circ} = j\,2{,}062$ и $\dot{I} = Ie^{-j\varphi_э} = 0{,}1868\,e^{-j84{,}6^\circ}$.

Полный ток фидера, согласно (8), $\dot{I}_1 = 1{,}876\,e^{j89{,}5^\circ}$ и начальная фаза тока $\theta_1 = 89{,}5^0$.

Падение напряжения в сопротивлении Z_1, согласно (8), $\Delta\dot{U} = -0{,}1874 + j\,0{,}0205$.

Суммарное падение напряжения, согласно (14), $\dot{U}_3 = 0{,}0278\,e^{j47{,}5^\circ}$.

При условии $\cos\varphi_2 = 0{,}8$ (индуктивный) $\varphi_2 = 36{,}9^0$ и тогда, согласно (15), $\theta_2 = 126{,}36^0$.

В соответствии (16), получаем $U_2 = 1{,}002$.

На основании аналогичных расчетов для других значений τ_2 на рис.4 построены графики зависимостей токов и напряжений от полного тока. Как видно из графиков, увеличение тока I_1 приводит к плавному возрастанию тока конденсатора. При включении нелинейного шунта возможен скачок тока, который зависит от соотношения r и x_C. При скачке тока возможно резкое уменьшение напряжения на нагрузке U_2. Таким образом, при $r/x_C < 1$ рассматриваемая схема обладает токоограничивающим действием. Ток короткого замыкания в фидере, оборудованном такой установкой, может быть ограничен заданным значением.

ЛИТЕРАТУРА

1. Шенкман Л.З. Применение насыщающегося дросселя для защиты установок продольно-емкостной компенсации от субгармонического резонанса. – Электричество, 1968, № 11.

2. Бауман В.Г., Иванов О.В., Квятковский В.М. Исследование на аналоговой модели феррорезонансных явлений в установке продольной компенсации, шунтированной нелинейной индуктивностью. – Изв. вузов, Энергетика, 1970, № 12.

3. Жуховицкий Б.Я., Негневицкий И.Б. Теоретические основы электротехники. Т. 2. М., Энергия, 1972.