

## ЗАЩИТА КОНДЕНСАТОРОВ ДЛЯ ПРОДОЛЬНОЙ КОМПЕНСАЦИИ ОТ ПЕРЕНАПРЯЖЕНИЙ

А. И. ЗАЙЦЕВ, Я. В. ПЕТРОВ

(Представлено научным семинаром электромеханического факультета)

Пропускная способность электропередачи высокого напряжения в значительной мере определяется условиями устойчивости параллельной работы генераторных станций. Эти условия в основном определяются величиной индуктивного сопротивления. На основании анализа существующих и предложенных способов увеличения предела передаваемой мощности можно утверждать, что наиболее целесообразным способом увеличения предела передаваемой мощности является продольная компенсация параметров линии электропередачи. Эта компенсация может быть осуществлена синхронными и асинхронными машинами, а также статическими конденсаторами. Из [1, 2, 3] известно также применение продольной компенсации для целей регулирования напряжения.

Статические конденсаторы являются наиболее естественным и целесообразным средством продольной компенсации индуктивности линии. Применение их устраняет необходимость в сложных регулирующих устройствах, но на этом пути имеются значительные трудности. При коротких замыканиях на линии неизбежно повышается напряжение на обкладках конденсаторов.

Для предохранения их от пробоев и уменьшения токов короткого замыкания все конденсаторные установки снабжены устройствами,

тем или иным путем шунтирующими конденсаторы в момент появления недопустимых напряжений. В [4] дано описание принципа действия схемы продольной компенсации с одновременным ограничением токов короткого замыкания и влияние этого устройства на динамическую устойчивость. Для защиты конденсаторов от перенапряжений предлагается шунтировать их дросселями насыщения. Соответствующим подбором вольтамперных ха-

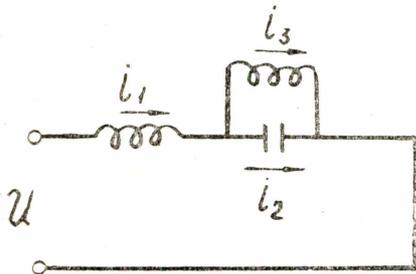


Рис. 1.

рактеристик конденсаторов и дросселя насыщения (рис. 1) можно получить следующие режимы работы.

1. При нормальном режиме ток нагрузки будет протекать через конденсаторы и будет осуществляться продольная компенсация.

2. При коротком замыкании напряжение на конденсаторе начинает резко возрастать. С ростом напряжения ток намагничивания дросселя увеличивается. При дальнейшем увеличении тока через конденсатор дроссель будет шунтировать его еще больше и с наступлением насыщения наступает резонанс тока, либо основная часть тока нагрузки будет протекать через дроссель, если напряжение резонанса будет меньше значения фазного напряжения.

Для исследования поведения схемы защиты составим уравнения переходного процесса для схемы, приведенной на рис. 1. Для упрощения расчетов активным сопротивлением внешней цепи (линии, трансформатора) и дросселя насыщения пренебрегаем, а характеристику дросселя замещаем кусочно-линейной аппроксимацией. Такое пренебрежение допустимо, так как индуктивное сопротивление этих элементов во много раз больше активного. Для переходного процесса с учетом допущений на любом прямолинейном участке кривой намагничивания дросселя насыщения составим систему уравнений:

$$i_1 = i_2 + i_3;$$

$$L_1 \frac{di_1}{dt} + \frac{1}{C} \int_0^t i_2 dt = U_M \sin \omega t;$$

$$L_1 \frac{di_1}{dt} + L_2 \frac{di_3}{dt} = U_M \sin \omega t.$$

Составим уравнения в операторной форме:

$$i_1(p) = i_2(p) + i_3(p). \quad (1)$$

$$L_1 p i_1(p) - L_1 p i_1(0) + \frac{1}{cp} i_2(p) - U_{co} = \frac{Up\omega}{p^2 + \omega^2}. \quad (2)$$

$$L_1 p i_1(p) - L_1 p i_1(0) + L_2 p i_3(p) - L_2 p i_3(0) = \frac{U \cdot p\omega}{p^2 + \omega^2}. \quad (3)$$

Значение  $i_1(p)$  из уравнения (1) подставим в уравнения (2) и (3)

$$L_1 p [i_2(p) + i_3(p)] - L_1 p (i_{20} + i_{30}) + \frac{1}{cp} i_2(p) - U_{co} = \frac{Up\omega}{p^2 + \omega^2}. \quad (4)$$

$$L_1 p [i_2(p) + i_3(p)] - L_1 p (i_{20} + i_{30}) + L_2 p i_3(p) - L_2 p i_{30} = \frac{Up\omega}{p^2 + \omega^2}. \quad (5)$$

$$i_2(p) \left( L_1 p + \frac{1}{cp} \right) + L_1 p i_3(p) - L_1 p (i_{20} + i_{30}) - U_{co} = \frac{Up\omega}{p^2 + \omega^2}. \quad (4a)$$

$$i_2(p) L_1 p + i_3(p) (L_1 p + L_2 p) - L_1 p (i_{20} + i_{30}) - L_2 p i_{30} = \frac{Up\omega}{p^2 + \omega^2}. \quad (5a)$$

Из уравнения (5а) определяем  $i_3(p)$

$$i_3 p = \frac{Up\omega + [L_1 p(i_{20} + i_{30}) + L_2 p i_{30}](p^2 + \omega^2)}{(p^2 + \omega^2)(L_1 p + L_2 p)} - \frac{L_1 p}{(L_1 p + L_2 p)} \cdot i_2(p)$$

Значение  $i_3(p)$  подставим в уравнение (4а)

$$i_2(p) \left( L_1 p + \frac{1}{cp} \right) + \frac{L_1 p \{ Up\omega + [L_1 p(i_{20} + i_{30}) + L_2 p i_{30}](p^2 + \omega^2) \}}{(p^2 + \omega^2)(L_1 p + L_2 p)} - \\ - \frac{L_1^2 p^2}{(L_1 p + L_2 p)} i_2(p) - L_1 p(i_{20} + i_{30}) - U_{co} = \frac{Up\omega}{p^2 + \omega^2}$$

Определим значение  $i_2(p)$

$$i_2(p) \left( L_1 p + \frac{1}{cp} - \frac{L_1^2 p^2}{L_1 p + L_2 p} \right) + \\ + \frac{L_1 p^2 U\omega + [L_1^2 p^2(i_{20} + i_{30}) + L_1 L_2 p^2 i_{30}](p^2 + \omega^2)}{(p^2 + \omega^2)(L_1 p + L_2 p)} - \\ - L_1 p(i_{20} + i_{30}) - U_{co} = \frac{Up\omega}{p^2 + \omega^2}$$

$$i_2(p) = \frac{\{ Up\omega + [L_1 p(i_{20} + i_{30}) + U_{co}](p^2 + \omega^2) \} (L_1 p + L_2 p)}{\left( L_1 L_2 p^2 + \frac{L_1}{C} + \frac{L_2}{C} \right) (p^2 + \omega^2)} - \\ - \frac{\{ L_1 p^2 U\omega + [L_1^2 p^2(i_{20} + i_{30}) + L_1 L_2 p^2 i_{30}](p^2 + \omega^2) \} (L_1 p + L_2 p)}{(p^2 + \omega^2) \left( L_1 L_2 p^2 + \frac{L_1}{C} + \frac{L_2}{C} \right) (L_1 p + L_2 p)}$$

Определяем „фи“ функцию

$$\varphi(p) = \frac{\{ Up\omega + [L_1 p(i_{20} + i_{30}) + U_{co}](p^2 + \omega^2) \} (L_1 + L_2) p}{\left( L_1 L_2 p^2 + \frac{L_1}{C} + \frac{L_2}{C} \right) (p^2 + \omega^2) p} e^{pt} - \\ - \frac{\{ Up\omega L_1 + [L_1^2 p(i_{20} + i_{30}) + L_1 L_2 p i_{30}](p^2 + \omega^2) \} p}{\left( L_1 L_2 p^2 + \frac{L_1}{C} + \frac{L_2}{C} \right) (p^2 + \omega^2) p} e^{pt}$$

Получено изображение для тока в конденсаторе. Определим оригинал по заданному изображению. Для этого воспользуемся интегралом Бромвича

$$f(t) = \frac{1}{2\pi j} \int_{s-j\infty}^{s+j\infty} \varphi(p) dp = \sum_{k=1}^H a_{-1}^{(k)}$$

Для определения вычетов в отдельных полюсах определим корни характеристического уравнения

$$\left( L_1 L_2 p^2 + \frac{L_1}{C} + \frac{L_2}{C} \right) (p^2 + \omega^2) = 0.$$

$$p_1 = -j\omega, \quad p_3 = -j \frac{L_1 + L_2}{L_1 L_2 C},$$

$$p_2 = +j\omega, \quad p_4 = +j \sqrt{\frac{L_1 + L_2}{L_1 L_2 C}}.$$

Все полюса получились простыми, а поэтому вычеты находим по следующей формуле:

$$a_{-1} = \lim_{p \rightarrow a} [(p - a)\varphi(p)].$$

Вычет для первого полюса  $p_1$

$$\begin{aligned} a_{-1}^{(1)} &= \lim_{p \rightarrow j\omega} \left\{ \frac{(p - j\omega)A}{L_1 L_2 \left( p^2 + \frac{L_1 + L_2}{L_1 L_2 C} \right) (p - j\omega) (p + j\omega)} \right\} e^{j\omega t} = \\ &= \frac{(UL_1 \omega j\omega + UL_2 \omega j\omega - Uj\omega \omega L_1) e^{j\omega t}}{L_1 L_2 \left( -\omega^2 + \frac{L_1 + L_2}{L_1 L_2 C} \right) 2j\omega} = 0 = \\ &= \frac{+ UL_2 \omega}{L_1 L_2 \left( -\omega^2 + \frac{L_1 + L_2}{L_1 L_2 C} \right)^2} e^{j\omega t}. \end{aligned}$$

Вычет для второго полюса  $p_2$

$$\begin{aligned} a_{-1}^{(2)} &= \lim_{p \rightarrow -j\omega} \left\{ \frac{(p + j\omega)A}{L_1 L_2 \left( p^2 + \frac{L_1 + L_2}{L_1 L_2 C} \right) (p - j\omega) (p + j\omega)} \right\} e^{-j\omega t} = \\ &= \frac{U\omega(-j\omega)(L_1 + L_2)e^{-j\omega t} - U\omega(-j)L_1 e^{-j\omega t}}{\left( -\omega^2 + \frac{L_1 + L_2}{L_1 L_2 C} \right) (-2j\omega)L_1 L_2} = \\ &= \frac{U\omega L_2}{2 \left( \frac{L_1 + L_2}{L_1 L_2 C} - \omega^2 \right) L_1 L_2} e^{-j\omega t}. \end{aligned}$$

Вычет для третьего полюса  $p_3$

$$a_{-1}^{(3)} = \lim \times$$

$$p \rightarrow j \sqrt{\frac{L_1 + L_2}{L_1 L_2 C}}$$

$$\times \left\{ \frac{\left( p - j \sqrt{\frac{L_1 + L_2}{L_1 + L_2 C}} \right) A}{(p^2 + \omega^2) \left( p + j \sqrt{\frac{L_1 + L_2}{L_1 L_2 C}} \right) \left( p - j \sqrt{\frac{L_1 + L_2}{L_1 L_2 C}} \right) L_1 L_2} \right\} e^{j \sqrt{\frac{L_1 + L_2}{L_1 L_2 C}} t} =$$

$$= \frac{U_{\omega} j \sqrt{\frac{L_1 + L_2}{L_1 L_2 C}} (L_1 + L_2) e^{j \sqrt{\frac{L_1 + L_2}{L_1 L_2 C}} t}}{2j \sqrt{\frac{L_1 + L_2}{L_1 L_2 C}} \left( \omega^2 - \frac{L_1 + L_2}{L_1 L_2 C} \right) L_1 L_2} +$$

$$+ \frac{L_1 j \sqrt{\frac{L_1 + L_2}{L_1 L_2 C}} (i_{20} + i_{30}) \left( \omega^2 - \frac{L_1 + L_2}{L_1 L_2 C} \right) (L_1 + L_2) e^{j \sqrt{\frac{L_1 + L_2}{L_1 L_2 C}} t}}{2j \sqrt{\frac{L_1 + L_2}{L_1 L_2 C}} \left( \omega^2 - \frac{L_1 + L_2}{L_1 L_2 C} \right) L_1 L_2} +$$

$$+ \frac{U_{co} \left( \omega^2 - \frac{L_1 + L_2}{L_1 L_2 C} \right) (L_1 + L_2) e^{j \sqrt{\frac{L_1 + L_2}{L_1 L_2 C}} t}}{2j \sqrt{\frac{L_1 + L_2}{L_1 L_2 C}} \left( \omega^2 - 2 \frac{L_1 + L_2}{L_1 L_2 C} \right) L_1 L_2} -$$

$$- \frac{U_{\omega} L_1 j \sqrt{\frac{L_1 + L_2}{L_1 L_2 C}} e^{j \sqrt{\frac{L_1 + L_2}{L_1 L_2 C}} t}}{2j \sqrt{\frac{L_1 + L_2}{L_1 L_2 C}} \left( \omega^2 - \frac{L_1 + L_2}{L_1 L_2 C} \right) L_1 L_1}$$

$$- \frac{L_1^2 j \sqrt{\frac{L_1 + L_2}{L_1 L_2 C}} (i_{20} + i_{30}) \left( \omega^2 - \frac{L_1 + L_2}{L_1 L_2 C} \right) e^{j \sqrt{\frac{L_1 + L_2}{L_1 L_2 C}} t}}{2j \sqrt{\frac{L_1 + L_2}{L_1 L_2 C}} \left( \omega^2 - \frac{L_1 + L_2}{L_1 L_2 C} \right) L_1 L_2}$$

$$- \frac{j \sqrt{\frac{L_1 + L_2}{L_1 L_2 C}} L_1 L_2 i_{30} \left( \omega^2 - \frac{L_1 + L_2}{L_1 L_2 C} \right) e^{j \sqrt{\frac{L_1 + L_2}{L_1 L_2 C}} t}}{2j \sqrt{\frac{L_1 + L_2}{L_1 L_2 C}} \left( \omega^2 - \frac{L_1 + L_2}{L_1 L_2 C} \right) L_1 L_2}$$

Вычет для четвертого полюса  $p_4$

$$\begin{aligned}
 a_{-1}^{(4)} = \lim_{p \rightarrow -j\sqrt{\frac{L_1+L_2}{L_1L_2C}}} & \left\{ \frac{(p+j)\sqrt{\frac{L_1+L_2}{L_1L_2C}} A}{(p^2 + \omega^2) \left( p + j\sqrt{\frac{L_1+L_2}{L_1L_2C}} \right) \left( p - j\sqrt{\frac{L_1+L_2}{L_1L_2C}} L_1L_2 \right)} \right\} e^{-j\sqrt{\frac{L_1+L_2}{L_1L_2C}} t} = \\
 & = \frac{U\omega e^{-j\sqrt{\frac{L_1+L_2}{L_1L_2C}} t}}{2 \left( \omega^2 - \frac{L_1+L_2}{L_1L_2C} \right) L_1L_2} + \\
 & + \frac{(L_1+L_2)L_1(i_{20} + i_{30}) \left( \omega^2 - \frac{L_1L_2}{L_1L_2C} \right) e^{-j\sqrt{\frac{L_1+L_2}{L_1L_2C}} t}}{2L_1L_2 \left( \omega^2 - \frac{L_1L_2}{L_1L_2C} \right)} - \\
 & - \frac{U_{C0}(L_1+L_2) \left( \omega^2 - \frac{L_1+L_2}{L_1L_2C} \right) e^{-j\sqrt{\frac{L_1+L_2}{L_1L_2C}} t}}{2j\sqrt{\frac{L_1+L_2}{L_1L_2C}} t \left( \omega^2 - \frac{L_1+L_2}{L_1L_2C} \right) L_1L_2} - \frac{U\omega L_1 e^{-j\sqrt{\frac{L_1+L_2}{L_1L_2C}} t}}{2L_1L_2 \left( \omega^2 - \frac{L_1+L_2}{L_1L_2C} \right)} \cdot \\
 & - \frac{L_1^2(i_{20} + i_{30}) e^{-j\sqrt{\frac{L_1+L_2}{L_1L_2C}} t}}{2L_1L_2} + \frac{L_1L_2i_{30} e^{-j\sqrt{\frac{L_1+L_2}{L_1L_2C}} t}}{2j\sqrt{\frac{L_1+L_2}{L_1L_2C}} L_1L_2} - \frac{L_1^2(i_{20} + i_{30}) e^{-j\sqrt{\frac{L_1+L_2}{L_1L_2C}} t}}{2j\sqrt{\frac{L_1+L_2}{L_1L_2C}} L_1L_2}
 \end{aligned}$$

Ток в конденсаторе равен сумме вычетов во всех четырех полюсах.

$$i_2 = a_{-1}^{(1)} + a_{-1}^{(2)} + a_{-1}^{(3)} + a_{-1}^{(4)}.$$

$$\begin{aligned}
 i_2 = & \frac{U\omega(L_1+L_2)\cos\omega t}{L_1L_2 \left( \frac{L_1+L_2}{L_1L_2C} - \omega^2 \right)} + \left\{ \frac{U\omega(L_1+L_2)}{L_1L_2 \left( \omega^2 - \frac{L_1+L_2}{L_1L_2C} \right)} + \frac{L_1(L_1+L_2)(i_{20} + i_{30})}{L_1L_2} - \right. \\
 & \left. - i_{30} - \frac{U\omega L_1}{L_1L_2 \left( \omega^2 - \frac{L_1+L_2}{L_1L_2C} \right)} - \frac{L_1^2(i_{20} + i_{30})}{L_1L_2} \right\} \cos \sqrt{\frac{L_1+L_2}{L_1L_2C}} t +
 \end{aligned}$$

$$+ \left\{ \frac{U_{co}(L_1+L_2)}{\sqrt{\frac{L_1+L_2}{L_1L_2C}} L_1L_2} \right\} \sin \sqrt{\frac{L_1+L_2}{L_1L_2C}} t.$$

Из уравнения (5а) определяем значение  $i_2(p)$

$$i_2(p) = \frac{Up\omega + [L_1p(i_{20} + i_{30}) + L_2pi_{30}](p^2 + \omega^2)}{(p^2 + \omega^2)L_1p} - i_3(p) \cdot \frac{(L_1p + L_2p)}{L_1p}.$$

Значение  $i_2(p)$  подставим в уравнение (4а) и определим ток в дросселе

$$i_3(p) = \frac{\{Up\omega + [L_1p(i_{20} + i_{30}) + L_2pi_{30}](p^2 + \omega^2)\} \left(L_1p + \frac{1}{Cp}\right) L_1p}{L_1p(p^2 + \omega^2) \left(p^2 + \frac{L_1+L_2}{L_1L_2C}\right) L_1L_2} - \frac{\{Up\omega + [L_1p(i_{20} + i_{30}) + U_{co}](p^2 + \omega^2)\} L_1p}{(p^2 + \omega^2) \left(p^2 + \frac{L_1+L_2}{L_1L_2C}\right) L_1L_2}.$$

Далее по аналогии определив „ $\varphi$ “ функцию, корни характеристического уравнения и значения вычетов для этих корней, находим значение тока  $i_3$ , протекающего через дроссель.

$$i_3 = - \frac{U \frac{1}{\omega C} p}{\left(\frac{L_1+L_2}{L_1L_2C} - \omega^2\right) L_1L_2} \cos \omega t - \left\{ \frac{U\omega}{(L_1+L_2) \left(\omega^2 - \frac{L_1+L_2}{L_1L_2C}\right)} + \frac{L_1(i_{20} + i_{30}) + L_2i_{30}}{2(L_1+L_2)} \right\} \cos \sqrt{\frac{L_1+L_2}{L_1L_2C}} t - \frac{U_{co}}{\sqrt{\frac{L_1+L_2}{L_1L_2C}} L_2} \cdot \sin \sqrt{\frac{L_1+L_2}{L_1L_2C}} t.$$

Ток во внешней цепи  $i_1 = i_2 + i_3$

$$i_1 = \frac{U \left(\omega L_2 - \frac{1}{\omega C}\right)}{L_1L_2 \left(\frac{L_1+L_2}{L_1L_2C} - \omega^2\right)} \cos \omega t + \left\{ \frac{U\omega(L_1+L_2)}{L_1L_2 \left(\omega^2 - \frac{L_1+L_2}{L_1L_2C}\right)} + \frac{L_1(L_1+L_2)(i_{20} + i_{30})}{L_1L_2} - i_{30} - \frac{U\omega}{L_2 \left(\omega^2 - \frac{L_1+L_2}{L_1L_2C}\right)} \right\}$$

$$-\frac{L_1^2(i_{20}+i_{30})}{L_1L_2} \left\{ \cos \sqrt{\frac{L_1+L_2}{L_1L_2C}} t + \frac{U_{co} \cdot L_2}{\sqrt{\frac{L_1+L_2}{L_1L_2C}} L_1L_2} \cdot \sin \sqrt{\frac{L_1+L_2}{L_1L_2C}} t - \right.$$

$$\left. - \left\{ \frac{U\omega}{(L_1+L_2) \left( \omega^2 - \frac{L_1+L_2}{L_1L_2C} \right)} + \frac{L_1(i_{20}+i_{30}) + L_2i_{30}}{2(L_1+L_2)} \right\} \cos \sqrt{\frac{L_1+L_2}{L_1L_2C}} t \right.$$

Определение кривых изменения токов  $i_1$ ,  $i_2$  и  $i_3$  во времени необходимо в соответствующие выражения для токов подставлять последовательно значения  $L_2$  для каждого отрезка кусочно-линейной аппроксимации кривой намагничивания дросселя насыщения. Причем конечные значения величин токов  $i_1$ ,  $i_2$  и  $i_3$  для предшествующего участка будут начальными значениями для последующего отрезка.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. А. А. Глазунов. Сети электрических систем, ГЭИ, 1947.
2. М. С. Баяхчев. Регулирование напряжения последовательно включенными конденсаторами. Электричество, № 9, 1949.
3. Я. В. Петров и А. И. Зайцев. О схеме трехфазного ферромагнитного устроителя частоты. Известия ТПИ, т. 97, 1959.
4. А. И. Зайцев. Продольная компенсация с одновременным ограничением токов короткого замыкания. Известия ТПИ, т. 72, 1952.