

**МЕТОДИКА
РАСЧЕТОВ НЕПОЛНОФАЗНЫХ РЕЖИМОВ ДЛИННЫХ ЛИНИЙ
ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧ ВЫСОКОГО НАПРЯЖЕНИЯ**

Р. И. БОРИСОВ

(Представлено профессором доктором В. К. Щербаковым)

Пофазное управление линиями электропередачи в существующих системах получило широкое распространение, так как это мероприятие в значительной степени увеличивает надежность электроснабжения потребителей без существенных дополнительных капитальных затрат.

Применение пофазного АПВ, вместо трехфазного, позволяет увеличить при замыканиях на землю время отключенного состояния фаз линии без нарушения ее устойчивости при передаче мощности нормального режима. Предельное значение времени работы при отключенном состоянии поврежденных фаз в процессе АОПВ не должно, как известно, превышать время деионизации воздушного промежутка по месту замыкания.

Экспериментальная проверка, проведенная в последнее время [1], еще раз подтвердила возможность применения ОАПВ на линиях напряжением до 220 кВ и длиной до 500 км, на которых происходит погасание дуги не более чем через 250 мксек после отключения поврежденной фазы. Как правило, для линий 220 кВ предельное по условиям динамической устойчивости время отключенного состояния оказывается значительно больше. На линиях 400 кВ длиной свыше 250 км совсем не происходит погасание дуги в месте замыкания на землю даже после отключения поврежденной фазы, вследствие чего успешное автоматическое повторное включение оказывается невозможным. Поддержание тока в дуге осуществляется при этом индуктированным напряжением от здоровых фаз.

Для линий на напряжение 400 кВ длина участка в 250 км является предельной, при которой произойдет погасание дуги по месту повреждения и окажется возможным осуществить пофазное управление линий.

На длинной линии, оборудованной пофазным управлением, по целому ряду причин могут возникнуть длительные неполнофазные режимы.

Так, при устойчивом однофазном коротком замыкании на каком-нибудь участке поврежденная фаза окажется отключенной с двух сторон, тогда при наличии второй цепи установка окажется в работе

на трех фазах, но пяти проводах. В поврежденной фазе эквивалентное сопротивление несколько увеличится по сравнению с работой в нормальном режиме, но такой несимметричный режим будет легче условий, которые возникнут при отключении одной фазы в блочной схеме. Это будет означать потерю одной фазы и уменьшение мощности, передаваемой по линии. Несимметрия токов и напряжений, которая возникает при этом, будет проявлять себя более резко.

Таким образом, наиболее частые однофазные замыкания, в том случае, если они окажутся устойчивыми, приведут к однократным несимметриям.

При раздельном управлении фазами линии появляется возможность значительного расширения номенклатуры работ по осмотрам и ремонтам линий и аппаратуры, проводимых без полного отключения линии электропередачи и выполняемых методом пофазного ремонта.

При производстве таких работ на одной фазе, под напряжением на других, возможно наложение несимметричных режимов при аварийном отключении какой-либо фазы и аварии в другой точке линии. Вероятность таких совпадений увеличивается с возрастанием длины линии и количества цепей. Из этих соображений нами рассматриваются следующие схемы неполнофазных режимов, как наиболее вероятных в практике эксплуатации длинных линий: 1) разрыв фазы на одном участке, 2) разрыв разноименных фаз на одном участке, 3) разрыв двух разноименных фаз на разных участках.

Длительная работа данной линии электропередачи в таких режимах связана с рядом особенностей и отрицательных последствий, которые могут ограничить их применение. Поэтому при решении вопросов об оборудовании линии пофазным управлением следует в каждом конкретном случае доказать не только целесообразность этого, но и возможность длительной работы линий в несимметричном режиме, которые, безусловно, возникнут при эксплуатации такой линии.

Как было установлено ранее, применять общую методику анализа для любого случая несимметрии невыгодно из-за трудоемкости расчетов [2].

Применение общей методики может быть уместно только при расчетах несимметричных режимов в несимметрично выполненной цепи. Поэтому многие авторы, анализирующие несимметричные режимы и схемы, используют метод симметричных составляющих, но стремятся найти такие расчетные приемы, которые бы облегчали производство расчетов для рассматриваемых конкретных условий.

Обычно такими приемами расчет действительной схемы несимметричного режима удается свести к расчету симметричной схемы, но с различными э. д. с., действующими в фазах, или к расчету симметричной схемы с некоторыми дополнительными параметрами по месту несимметрии. Этим значительно облегчается расчет, так как можно пользоваться принципом независимости действия симметричных составляющих.

Таким приемом, который может значительно облегчить производство расчетов неполнофазных режимов длинных линий, является использование теории матрично-векторных параметров электрических схем. При этом все элементы электрической системы в схемах замещения каждой последовательности замещаются матричными параметрами, если они были пассивные, или матрично-векторными параметрами, если элементы активные.

Так как отключение фазы или разных фаз линий произойдет не по всей длине, а на отдаленных участках длиной не свыше 250 км,

которые можно представить сосредоточенными параметрами, то действие отключения по концам участка можно учитывать разрывом фазы в одном месте.

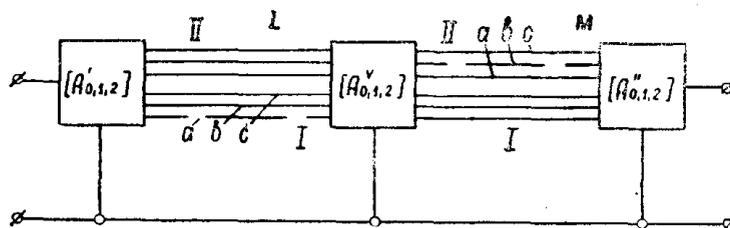
Предлагаемый метод расчета состоит в следующем.

Схема замещения элементов системы представляется в виде трехполюсников, соединенных между собой в соответствии с действительными условиями. В качестве входных зажимов для схемы каждой последовательности принимается место разрыва для того участка, где особенная фаза совпадает с расчетной, а в качестве вторичных — место разрыва, где особенная фаза отличается от расчетной. Затем схемы каждой последовательности связываются между собой в соответствии с уравнениями граничных условий для данного вида повреждения. Связь для участка разрыва, где особенная фаза совпадает с расчетной, должна быть электрической, а для того участка, где особенная и расчетная фазы не совпадают — электромагнитной, выполненной через идеальные трансформаторы. Связь схем отдельных последовательностей через идеальные трансформаторы с комплексными коэффициентами трансформации соответствует преобразованиям особенной фазы в расчетную для тех мест несимметрии, где эти фазы не совпадают.

Преобразуя схемы каждой последовательности к результирующей и используя граничные условия, находятся параметры эквивалентного трехполюсника, составленного из схем обратной и нулевой последовательностей, которые учитывают действие несимметрии в схеме прямой последовательности. В случае связанной схемы и при двукратных разрывах результирующие схемы каждой последовательности сводятся к полным четырехполюсникам, к которым обычные уравнения, связывающие токи и напряжения концевых зажимов через параметры схем, применить нельзя.

Для преодоления этого расчетного затруднения при определении эквивалентного трехполюсника осуществляется переход от полной матрицы активных и пассивных элементов к упрощенной. Подставив найденное значение эквивалентного трехполюсника по месту несимметрии в схему прямой последовательности, окажется возможным рассчитать неполнофазный режим.

Рассмотрим применение данного метода к длинной компенсированной двухцепной линии электропередачи напряжением 400 кВ, связывающей удаленную станцию и приемную систему и разделенную переключательными постами на 4 равных по длине участка (фиг. 1).



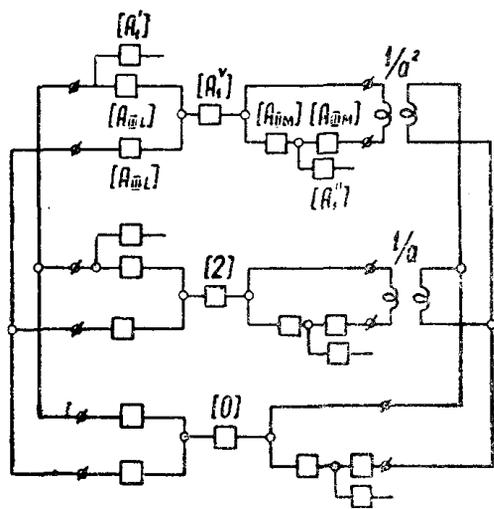
Фиг. 1.

Предположим, что при отключении фазы *a* на участке *L* произошло также отключение фазы *b* на участке *M*. Влиянием заземления при отключении проводов пренебрегаем.

Переключательные посты позволяют осуществлять пофазное управление участками линии, длина которых не более 250 км. В нормальном режиме по каждой цепи передается мощность, равная натураль-

ной, что позволяет определить э. д. с. эквивалентных генераторов передающей станции и приемной системы.

В соответствии с изложенным выше элементы передачи в схеме каждой последовательности заменяем трехполюсниками.



Фиг. 2.

В качестве конечных зажимов трехполюсников для схем различных последовательностей принимаем места разрывов, тогда схемы на участке L , где особая и расчетная фазы совпадают, связываются электрически в соответствии с соотношением граничных условий для этого участка

$$\dot{I}_{AL_1} + \dot{I}_{AL_2} + \dot{I}_{AL_0} = 0.$$

Для участка M связь осуществляется по своим соотношениям граничных условий через идеальные трансформаторы с комплексным коэффициентом трансформации таким образом, чтобы ток в связывающей части равнялся току в поврежденной фазе

$$\dot{I}_{BM_1} + \dot{I}_{BM_2} + \dot{I}_{BM_0} = 0$$

или в координатах расчетной фазы A

$$a^2 \dot{I}_{AM_1} + a \dot{I}_{AM_2} + \dot{I}_{AM_0} = 0,$$

$[\bar{A}_{1L}]; [\bar{A}_{1L}]$ — матрицы линий на участке L схемы соответствующей последовательности,

$[\bar{A}^V]$ — матрица пассивных элементов между участками обрыва,

$[\bar{A}']; [\bar{A}'']$ — матрицы активных элементов передачи в схеме прямой последовательности; в схемах обратной и нулевой последовательностей они представляют пассивные элементы.

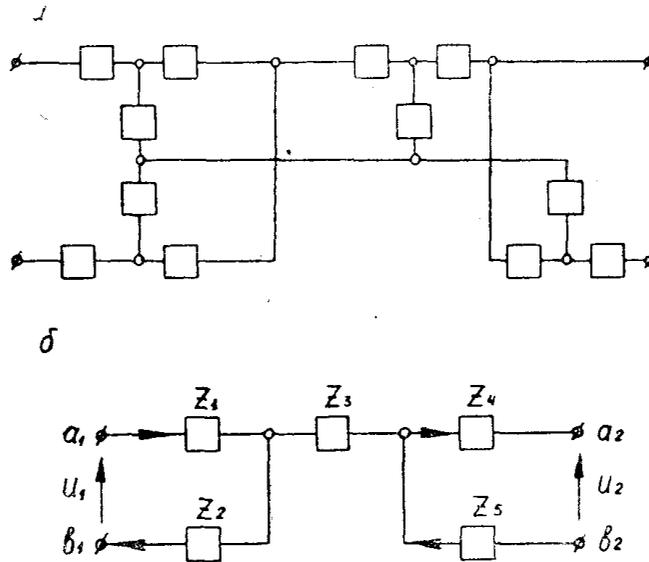
Параметры каждого из трехполюсников схемы замещения любой последовательности связывают токи и напряжения относительно нулевого провода, изолированного внутри своей схемы, т. е. не имеющего связей с нулевыми проводами других схем. В этом случае задача получения эквивалентной пассивной схемы несколько усложняется.

Рассмотрим схемы каждой последовательности отдельно, а так как они имеют одинаковую конфигурацию, индексы в дальнейшем опустим.

После сложения трехполюсников $[\bar{A}']$ с $[\bar{A}_{1L}]$, а также $[\bar{A}_{1M}]$, $[\bar{A}_{1M}]$ и $[\bar{A}'']$ и преобразований, получившихся трехполюсников в эквивалентные Т-образные схемы, получим для каждой последовательности схему замещения, представленную на фиг. 3, а.

Сворачивая ее до результирующей относительно входных и выходных зажимов и преобразуя параметры, получим схему на фиг. 3, б.

Как показали в своих работах Р. А. Воронов и Г. Е. Пухов [3, 4], обычные уравнения трехполюсника не могут определять электрического состояния таких схем, у которых нарушено равенство токов в ветвях входных и выходных зажимов или, что то же самое, если одна из сторон не будет сверхпроводящей.



Фиг. 3.

Так как схема фиг. 3, б не удовлетворяет условиям, при которых можно применить упрощенные формулы четырехполюсника, воспользуемся соотношениями для четырехполюсника в их полном виде в форме Y .

Для принятых положительных направлениях тока и напряжения, представленных на фиг. 3, б, будем иметь:

$$I_1 = \bar{Y}_{11} U_1 - \bar{Y}_{12} U_2 + \bar{Y}_{1x} U_x,$$

$$I_2 = \bar{Y}_{21} U_1 - \bar{Y}_{22} U_2 + \bar{Y}_{2x} U_x,$$

$$I_x = \bar{Y}_{x1} U_1 - \bar{Y}_{x2} U_2 + \bar{Y}_{xx} U_x,$$

$$\text{где } I_1 = \frac{1}{2}(I_{a1} + I_{b1}),$$

$$I_2 = \frac{1}{2}(I_{a2} + I_{b2}),$$

$$I_x = I_{a1} - I_{b1} = I_{a2} - I_{b2}$$

или в матричной форме

$$\begin{bmatrix} I_1 \\ I_2 \\ I_x \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \bar{Y}_{11} & \bar{Y}_{12} & \bar{Y}_{1x} \\ \bar{Y}_{21} & \bar{Y}_{22} & \bar{Y}_{2x} \\ \bar{Y}_{x1} & \bar{Y}_{x2} & \bar{Y}_{xx} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} U_1 \\ -U_2 \\ U_x \end{bmatrix}. \quad (1)$$

Определение отдельных составляющих матрицы проводимости производится из уравнений (1) для разных случаев коротких замыканий схемы фиг. 3, б [3].

Так, замыкая зажимы a_2 и b_2 и присоединяя их к средней точке между зажимами a_1 и b_1 , будем иметь:

$$U_2 = 0, \quad U_x = 0;$$

при этом

$$Y_{11} = \frac{I_1}{U_1}; \quad Y_{21} = \frac{I_2}{U_1}; \quad Y_{x1} = \frac{I_x}{U_1}; \quad (2)$$

$$I_{a_1} = U_1 \left[\frac{1}{z_1 + z_2} + \frac{1}{2(z_1 + z_3 + z_4)} \right];$$

$$I_{b_1} = U_1 \left[\frac{1}{z_1 + z_2} + \frac{1}{2(z_2 + z_3 + z_5)} \right];$$

$$I_{a_2} = \frac{1}{2} U_1 \left[\frac{1}{z_1 + z_3 + z_4} \right];$$

$$I_{b_2} = \frac{1}{2} U_1 \left[\frac{1}{z_2 + z_3 + z_5} \right];$$

$$I_1 = \frac{1}{2} U_1 \left[\frac{2}{z_1 + z_2} + \frac{1}{2(z_1 + z_3 + z_4)} + \frac{1}{2(z_2 + z_3 + z_5)} \right];$$

$$I_2 = \frac{1}{4} U_1 \left[\frac{1}{z_1 + z_3 + z_4} + \frac{1}{z_2 + z_3 + z_5} \right];$$

$$I_x = \frac{1}{2} U_1 \left[\frac{1}{z_1 + z_3 + z_4} - \frac{1}{z_2 + z_3 + z_5} \right];$$

Подставляя I_1 , I_2 , и I_x в уравнения (2), находим

$$\bar{Y}_{11} = \frac{1}{2} \left[\frac{2}{z_1 + z_2} + \frac{1}{2(z_1 + z_3 + z_4)} + \frac{1}{2(z_2 + z_3 + z_5)} \right],$$

$$Y_{21} = \frac{1}{4} \left[\frac{1}{z_1 + z_3 + z_4} + \frac{1}{z_2 + z_3 + z_5} \right],$$

$$Y_{x1} = \frac{1}{2} \left[\frac{1}{z_1 + z_3 + z_4} - \frac{1}{z_2 + z_3 + z_5} \right].$$

Из опыта обратного короткого замыкания будем иметь:

$$U_1 = 0, \quad U_x = 0.$$

Тогда

$$Y_{12} = -\frac{I_1}{U_2} = \frac{1}{4} \left[\frac{1}{z_1 + z_3 + z_4} + \frac{1}{z_2 + z_3 + z_5} \right],$$

$$\bar{Y}_{22} = -\frac{I_2}{U_2} = \frac{1}{2} \left[\frac{2}{z_1 + z_5} + \frac{1}{2(z_1 + z_3 + z_4)} + \frac{1}{2(z_2 + z_3 + z_5)} \right],$$

$$Y_{2x} = -\frac{I_x}{U_2} = -\frac{1}{2} \left[\frac{1}{z_2 + z_3 + z_5} - \frac{1}{z_1 + z_3 + z_4} \right].$$

Полагая, наконец, напряжения U_1 и U_2 равными нулю, то есть порознь замыкая входные и выходные зажимы, получим

$$U_1 = 0, \quad U_2 = 0.$$

Тогда

$$Y_{1x} = \frac{I_1}{U_x} = \frac{1}{2} \left[\frac{1}{z_1 + z_3 + z_5} - \frac{1}{z_2 + z_3 + z_5} \right],$$

$$Y_{2x} = \frac{I_2}{U_x} = \frac{1}{2} \left[\frac{1}{z_1 + z_3 + z_5} - \frac{1}{z_2 + z_3 + z_5} \right],$$

$$\bar{Y}_{xx} = \frac{I_x}{U_x} = \frac{1}{z_1 + z_3 + z_4} + \frac{1}{z_2 + z_3 + z_5}.$$

Обозначим

$$\frac{1}{z_1 + z_3 + z_4} = \bar{\nu}, \quad \frac{1}{z_2 + z_3 + z_5} = \bar{\mu}.$$

Полная матрица проводимости четырехполюсника запишется так:

$$[Y] = \begin{bmatrix} \frac{1}{2} \left(\frac{2}{z_1 + z_3} + \frac{1}{2} \bar{\nu} + \frac{1}{2} \bar{\mu} \right); & \frac{1}{4} (\bar{\nu} + \bar{\mu}); & \frac{1}{2} (\bar{\nu} - \bar{\mu}) \\ \frac{1}{4} (\bar{\nu} + \bar{\mu}); & \frac{1}{2} \left(\frac{2}{z_1 + z_5} + \frac{1}{2} \bar{\nu} + \frac{1}{2} \bar{\mu} \right); & \frac{1}{2} (\bar{\nu} - \bar{\mu}) \\ \frac{1}{2} (\bar{\nu} - \bar{\mu}); & \frac{1}{2} (\bar{\nu} - \bar{\mu}); & \bar{\nu} + \bar{\mu} \end{bmatrix}.$$

Определив полную матрицу проводимости, можно по уравнениям (1) перейти к упрощенной матрице проводимости, действительной при отсутствии продольного уравнительного тока I_x .

Для этого необходимо создать сверхпроводящую сторону, замкнув накоротко зажимы b_1 и b_2 схемы фиг. 3, б. Так как сделать непосредственно это нельзя, то между зажимами b_1 и b_2 вставим добавочное сопротивление z , найдем для него полную матрицу проводимостей и сложим ее с матрицей четырехполюсника. Затем по уравнениям (1) определим параметры упрощенной матрицы для ре-

зультурующей при $I_x = 0$ и придадим \bar{z} значение, равное нулю. Полную матрицу проводимости $\left[\frac{1}{z} \right]$ найдем аналогично предыдущей:

$$\left[\frac{1}{z} \right] = \begin{bmatrix} \frac{1}{4z} & \frac{1}{4z} & \frac{1}{2z} \\ \frac{1}{4z} & \frac{1}{4z} & \frac{1}{2z} \\ -\frac{1}{2z} & -\frac{1}{2z} & \frac{1}{z} \end{bmatrix}$$

Сложим матрицу добавочного сопротивления с матрицей проводимости четырехполюсника и получим общую матрицу продольной проводимости

$$\begin{aligned} [\bar{Y}] + \left[\frac{1}{z} \right] = & \begin{bmatrix} \frac{1}{2} \left(\frac{2}{z_1 + z_2} + \frac{1}{2} \bar{\nu} + \frac{1}{2} \bar{\mu} \right) + \frac{1}{4z} & \frac{1}{4} (\bar{\nu} + \bar{\mu}) + \frac{1}{4z} \\ \frac{1}{4} (\bar{\nu} + \bar{\mu}) + \frac{1}{4z} & \frac{1}{2} \left(\frac{1}{z_4 + z_5} + \frac{1}{2} \bar{\nu} + \frac{1}{2} \bar{\mu} \right) + \\ \frac{1}{2} (\bar{\nu} - \bar{\mu}) - \frac{1}{2z} & \frac{1}{2} (\bar{\nu} - \bar{\mu}) - \frac{1}{2z} \end{bmatrix} \\ & + \begin{bmatrix} \frac{1}{2} (\bar{\nu} - \bar{\mu}) \\ \frac{1}{4z} & \frac{1}{2} (\bar{\nu} - \bar{\mu}) \\ \bar{\nu} + \bar{\mu} + \frac{1}{z} \end{bmatrix} \end{aligned}$$

Упрощенную матрицу проводимости из общей можно получить из формул, положив $I_x = 0$ и подставив найденное значение U_x в два других уравнения.

Тогда будем иметь:

$$\bar{Y}_{11}^1 = Y_{11} - \frac{Y_{1x}^2}{Y_{xx}}; \quad \bar{Y}_{12}^1 = \bar{Y}_{12} - \frac{Y_{2x} \bar{Y}_{1x}}{Y_{xx}}; \quad Y_{22}^1 = Y_{22} - \frac{\bar{Y}_{2x}^2}{Y_{xx}}$$

Подставляя значения проводимостей общей матрицы, получим после преобразований и раскрытия неопределенности по правилу Лопиталля при $z \rightarrow 0$ значения членов упрощенной матрицы

$$[\bar{Y}^1] = \begin{bmatrix} \frac{1}{z_1 + z_2} + \frac{1}{2} \bar{\mu}; & -\frac{\bar{\nu} \bar{\mu}}{\bar{\nu} + \bar{\mu}} \\ \frac{\bar{\nu} \bar{\mu}}{\bar{\nu} + \bar{\mu}}; & \frac{1}{z_4 + z_5} + \frac{1}{2} \bar{\mu} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Y_{11}^1; & Y_{12}^1 \\ Y_{21}^1; & Y_{22}^1 \end{bmatrix}$$

По известным формулам перейдем от формы $[Y]$ к матрице формы $[\bar{A}]$

$$[A^1] = \begin{bmatrix} \frac{Y_{22}^1}{Y_{21}^1}; & \frac{1}{Y_{21}^1} \\ |Y^1| & Y_{11}^1 \\ \frac{Y_{21}^1}{Y_{21}^1}; & \frac{Y_{21}^1}{Y_{21}^1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A^1; & B^1 \\ C^1; & D^1 \end{bmatrix}.$$

Такие преобразования следует проделать со схемами обратной и нулевой последовательностей, после чего можно найти матрицу $[\bar{A}]$ эквивалентного пассивного трехполюсника

$$[\bar{A}] = \begin{bmatrix} \frac{\bar{A}_2 \bar{B}_0 + \bar{B}_2 \bar{A}_0}{B_2 + a B_0}; & \frac{\bar{B}_0 \bar{B}_2}{B_2 + a B_0} \\ a^2 \bar{C}_2 + C_0 + \frac{(\bar{A}_2 - a \bar{A}_0)(a \bar{D}_0 - \bar{D}_2)}{B_2 + a B_0}; & \frac{\bar{B}_0 \bar{D}_0 + \bar{B}_2 \bar{D}_2}{B_2 + a B_0} \end{bmatrix}$$

Аналогичным образом параметры эквивалентного трехполюсника, учитывающего влияние разрыва, могут быть найдены и для других случаев неполнофазных режимов. Не приводя выкладок по определению параметров матриц $[\bar{A}]$, результаты запишем в таблицу 1.

Таблица 1

Значение парам. $[A_3]$	Вид повреждения	Разрыв фазы в одном месте	Разрыв двух фаз на одном участке	Разрыв двух фаз на разных участках
\bar{A}		1	1	$\frac{\bar{A}_2 \bar{B}_0 + \bar{A}_0 \bar{B}_2}{B_2 + a B_0}$
\bar{B}		$\frac{\bar{B}_2 \bar{B}_0}{B_2 + \bar{B}_0}$	$\bar{B}_2 + B_0$	$\frac{\bar{B}_0 \bar{B}_2}{B_2 + a B_0}$
\bar{C}		0	0	$a^2 \bar{C}_2 + a C_0 + \frac{(\bar{A}_2 - a \bar{A}_0)(a \bar{D}_0 - \bar{D}_2)}{B_2 + a B_0}$
\bar{D}		1	1	$\frac{\bar{B}_2 \bar{D}_0 + \bar{D}_2 \bar{B}_0}{B_2 + a B_0}$

Расчеты схем неполнофазных режимов, произведенные для параметров электропередачи Куйбышев—Москва, показали [5], что при работе по блочной схеме отключение фазы на одном участке приводит к несимметрии токов в фазах генератора, равной 65%, и несимметрии напряжений на шинах приемной системы — 1,0%. Работа установки в таком режиме без применения специальных мероприятий по снижению несимметрии является недопустимой.

При работе по связанной схеме подсчеты показали, что при отключении фазы на одном из участков получается несимметрия токов в фазах генератора не более 8% при несимметрии напряжений.

равной 1%, а при обрыве двух разноименных фаз на разных участках несимметрия токов составит 14% при несимметрии напряжений на шинах приемной системы, равной 2%. Работа генераторов в таких режимах может быть допустима. Расчеты неполнофазных режимов выполнялись со значениями э. д. с. у эквивалентного генератора передающей станции и приемной системы, а также углом сдвига между векторами этих э. д. с., равными соответствующим величинам нормального симметричного режима.

ЛИТЕРАТУРА

1. Вопрос устойчивости шведских линий электропередач. ж. „Новости зарубежной техники“, 1956.
2. Гершенгорн А. И., Мельников Н. А. Расчет несимметрии в электрической системе при увеличенной длине цикла транспозиции на длинных линиях. „Труды Всесоюзного заочного энергетического института“, Госэнергоиздат, 1954.
3. Воронов Р. А. Общая теория четырехполюсников и многополюсников. Госэнергоиздат, 1951.
4. Пухов. Г. Е. Основы новой теории четырехполюсника. „Научные записки ЛПИ“, Львов, 1949.
5. Борисов Р. И. Установившиеся несимметричные режимы при неполнофазной работе длинных линий электропередач. Кандидатская диссертация. Томск, 1955.