

## ГЛАВА 6 ПАРАЛЛЕЛЬНАЯ РАБОТА ТРАНСФОРМАТОРОВ

### § 23. НАЗНАЧЕНИЕ ПАРАЛЛЕЛЬНОЙ РАБОТЫ ТРАНСФОРМАТОРОВ

При параллельной работе первичные обмотки трансформаторов включены на общую первичную сеть, а вторичные обмотки — на общую вторичную сеть. Параллельно могут быть включены два и более трансформаторов. Параллельная работа целесообразна при суточных или сезонных колебаниях нагрузки, а также в случае, когда нагрузка подстанции увеличивается постепенно, в течение ряда лет.

Параллельная работа трансформаторов позволяет при снижении нагрузки отключать часть трансформаторов, уменьшая расход энергии на покрытие магнитных потерь в них. При этом проще решается проблема резервирования, так как в случае выхода из строя какого-либо трансформатора остальные могут полностью или частично принять на себя его нагрузку. Когда нагрузка подстанции увеличивается постепенно, устанавливают несколько трансформаторов последовательно по мере роста нагрузки.

Параллельное включение трансформаторов применяют и в более сложных случаях, например, когда сеть низшего напряжения (осветительная) имеет большую протяженность. Такую сеть питают несколькими трансформаторами в различных местах, что уменьшает падение напряжения в линии и дает возможность применять провода меньшего сечения для устройства такой линии. Так как нагрузка обычно неравномерно распределена по длине линии, трансформаторы размещают в главных пунктах нагрузки.

В некоторых случаях используют совместную работу нескольких трансформаторов на общую сеть нагрузки, первичные обмотки которых включены в различные сети с различными напряжениями. Например, в местности, где благодаря обилию гидравлической энергии сооружают несколько гидравлических электростанций, появляются несколько линий электропередачи. В точках пересечения линий электропередачи возникают пункты отбора энергии, и электроснабжение определенного района производится несколькими электростанциями. Трансформаторы, включенные на одну и ту же сеть низкого напряжения в нескольких ее пунктах, со стороны высшего напряжения включены в различные сети с различными первичными напряжениями.

Основной трудностью, возникающей при параллельной работе трансформаторов, является обеспечение равномерного распределения нагрузки между ними. При включении на параллельную рабо-

ту трансформаторов, одинаковых по мощности и конструкции, нагрузка равномерно распределяется между ними автоматически благодаря симметрии всех параллельных цепей. Однако на практике приходится часто включать параллельно трансформаторы, не одинаковые по мощности и различные в конструктивном отношении. В этом случае равномерное распределение нагрузок между параллельно работающими трансформаторами часто оказывается невозможным. При параллельном включении трансформаторов их вторичные обмотки образуют замкнутую цепь, в которой не должно возникать каких-либо неуравновешенных напряжений или э. д. с., т. е. сумма э. д. с. вторичных обмоток должна быть равна нулю.

### § 24. УСЛОВИЯ ВКЛЮЧЕНИЯ ТРАНСФОРМАТОРОВ НА ПАРАЛЛЕЛЬНУЮ РАБОТУ

При параллельном включении трансформаторов их первичные и вторичные обмотки раздельно присоединяются параллельно к общим шинам (рис. 32). На схеме изображены два трансформатора, включенные на параллельную работу, но их число может быть и большим.

Для нормальной работы трансформаторов при их параллельном включении должны быть выполнены условия:

- 1) равенство номинальных первичных и вторичных напряжений трансформаторов;
- 2) принадлежность трансформаторов к одинаковым группам;
- 3) равенство напряжений коротких замыканий, их активных и реактивных составляющих.

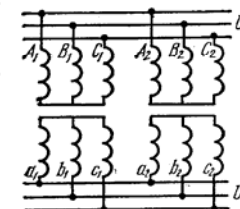


Рис. 32. Схема включения двух трехфазных трансформаторов на параллельную работу

#### Условия равенства первичных и вторичных напряжений

Это условие сводится к условию равенства коэффициентов трансформации параллельно работающих трансформаторов. При включении на параллельную работу обмотки трансформаторов должны быть соединены одноименными зажимами:  $a_1$  с  $a_2$ ,  $b_1$  с  $b_2$  и т. д., чтобы индуцируемые во вторичных обмотках э. д. с. находились в противофазе и их геометрическая сумма была равна нулю, тогда при включении трансформаторов не возникает никаких уравнительных токов.

Если коэффициенты трансформации не равны, то не равны и э. д. с. вторичных обмоток, значит и их геометрическая сумма не равна нулю:

$$\dot{E}_{21} + \dot{E}_{211} = \Delta \dot{E},$$

где  $E_{2I}$  и  $E_{2II}$  — э. д. с. вторичных обмоток соответственно первого и второго трансформаторов.

Под действием результирующей э. д. с.  $\Delta E$  по обмоткам трансформаторов циркулируют уравнительные токи  $I_{ур}$ . Суммарное напряжение вторичных обмоток  $\Delta E$  уравнивается падением напряжения в сопротивлениях коротких замыканий трансформаторов, приведенных ко вторичным обмоткам, т. е.

$$\Delta E = I_{ур}(z_{кI} + z_{кII}) \text{ и } I_{ур} = \frac{\Delta E}{z_{кI} + z_{кII}}$$

В мощных трансформаторах индуктивные сопротивления обмоток больше, чем активные сопротивления, так что уравнительный ток почти чисто реактивный. Уравнительный ток для трансформатора с большей величиной э. д. с. — индуктивный и уменьшает вторичное напряжение этого трансформатора до напряжения вторичной сети  $U_2$ . Для трансформатора с меньшей вторичной э. д. с. уравнительный ток — емкостный и повышает вторичное напряжение до напряжения вторичной сети  $U_2$ .

Сопротивления коротких замыканий трансформаторов малы и при небольшом неравенстве коэффициентов трансформации уравнительный ток может оказаться значительно большим номинального; параллельное включение трансформаторов будет недопустимым. Относительное значение уравнительного тока определим на примере параллельной работы двух одинаковых однофазных трансформаторов с одинаковыми напряжениями короткого замыкания  $u_{к} = 5\%$ , вторичные э. д. с. которых отличаются на  $\Delta e = 5\%$ .

Номинальный и уравнительный токи определяются следующими выражениями:

$$I_n = \frac{u_k}{100} \cdot \frac{U_n}{z_k}; \quad I_{ур} = \frac{\Delta e}{100} \cdot \frac{U_n}{2z_k}$$

Откуда

$$\frac{I_{ур}}{I_n} = \frac{\Delta e}{2u_k} = \frac{5}{2 \cdot 5} = 0,5,$$

т. е. уравнительный ток составляет 50% номинального.

Таким образом, при отсутствии нагрузки трансформаторы оказались нагруженными токами, равными половине номинальных. Совершенно очевидно, что при таких условиях использовать полную мощность трансформаторов нельзя, так как при полной нагрузке они окажутся перегруженными и в случае продолжительной работы выйдут из строя. Если бы коэффициенты трансформации были отличными в большей мере, уравнительный ток оказался бы еще больше. На практике допускается разница в коэффициентах трансформации не более 1%.

#### Условия принадлежности трансформаторов к одинаковым группам

Как было установлено выше, в зависимости от группы соединения обмоток трехфазного трансформатора вектор вторичной линейной э. д. с. может быть сдвинут относительно вектора первичной

линейной э. д. с. на любой угол, кратный  $30^\circ$ . Первичные обмотки трансформаторов при их параллельной работе включены в общую сеть источника тока и вне зависимости от групп соединения обмоток векторы линейных э. д. с. первичных обмоток совпадают по фазе.

Если трансформаторы, включаемые на параллельную работу, принадлежат к одинаковым группам, то векторы линейных э. д. с. вторичных обмоток совпадают по фазе и при включении трансформаторов нет уравнительных токов. Если же трансформаторы принадлежат к различным группам, то при совпадении векторов линейных э. д. с. первичных обмоток вторичные линейные э. д. с. не совпадают по фазе и геометрическая сумма э. д. с. вторичных обмоток не равна нулю. В этом случае при включении трансформаторов на параллельную работу появляются уравнительные токи, значительно большие номинальных, и трансформаторы могут выйти из строя.

Предположим, что мы включили на параллельную работу два одинаковых по своим параметрам трансформатора, имеющих различные группы соединения обмоток: первый трансформатор

$Y/Y-0$ , второй —  $Y/\Delta-11$ . Тогда векторы линейных

э. д. с. вторичных обмоток трансформаторов будут сдвинуты на угол  $30^\circ$ , а геометрическая сумма линейных э. д. с. вторичных обмоток  $\Delta E = 2U_n \sin 15^\circ = 0,52U_n$  и уравнительный ток при включении трансформаторов будет очень большим:

$$I_{ур} = \frac{0,52U_n}{z_{кI} + z_{кII}}$$

Если трансформаторы имели бы одинаковую номинальную мощность, уравнительный ток при их включении на параллельную работу оказался бы равным 0,26 установившегося значения тока короткого замыкания, т. е. примерно в 5 раз больше номинального. Такой бросок тока может привести к аварии и вызвать выход трансформаторов из строя.

#### Условия равенства напряжений коротких замыканий, их активных и реактивных составляющих

Напряжения короткого замыкания, их активные и реактивные составляющие определяют распределение нагрузки между трансформаторами при их параллельной работе. При неравенстве напряжений короткого замыкания нагрузка между параллельно работающими трансформаторами распределяется неравномерно и трансформатор с меньшим напряжением короткого замыкания нагружается в большей мере, чем трансформатор с большим напряжением короткого замыкания.

Для одной фазы трансформатора

$$\dot{U}_1 = -\dot{U}_2' + \dot{I}_1 z_k,$$

где  $U_1$  — напряжение первичной обмотки;  $U_2'$  — приведенное напряжение вторичной обмотки;  $I_1$  — ток первичной обмотки при нагрузке;  $z_k$  — сопротивление короткого замыкания.

Если два трансформатора включены на параллельную работу, то напряжения их первичных и вторичных обмоток одинаковы, т. е.

$$U_{1I} = U_{1II} \text{ и } U_{2I} = U_{2II}.$$

Поэтому падения напряжения в сопротивлениях обмоток должны быть также одинаковы, т. е.

$$I_1 z_{kI} = I_{II} z_{kII} \text{ или } \frac{I_1}{I_{II}} = \frac{z_{kII}}{z_{kI}}.$$

Напряжение короткого замыкания определяется соотношением:

$$u_k \% = \frac{I_n z_k}{U_1} \cdot 100,$$

откуда

$$z_k = \frac{u_k}{100} \cdot \frac{U_1}{I_n},$$

где  $I_n$  — номинальный ток трансформатора.

Таким образом, получим соотношение:

$$\frac{I_1}{I_{II}} = \frac{u_{kII}}{u_{kI}} \cdot \frac{I_{nI}}{I_{nII}}.$$

Умножив и разделив обе части равенства на общее для обоих трансформаторов номинальное напряжение, получим

$$\frac{U_1 I_1}{U_1 I_{II}} = \frac{P_I}{P_{II}} = \frac{u_{kII}}{u_{kI}} \cdot \frac{P_{nI}}{P_{nII}}.$$

Это выражение показывает, что нагрузка между параллельно работающими трансформаторами распределяется прямо пропорционально их номинальным мощностям и обратно пропорционально напряжениям короткого замыкания.

При неравенстве напряжений коротких замыканий параллельная работа трансформаторов нежелательна, так как нельзя получить полной мощности этих трансформаторов. При номинальной нагрузке трансформатора с меньшим напряжением короткого замыкания трансформатор с большим напряжением короткого замыкания будет недогружен. Если же трансформатор с большим напряжением короткого замыкания нагрузить номинальной мощностью, то трансформатор с меньшим напряжением короткого замыкания окажется перегруженным и длительно работать не сможет.

Чтобы недоиспользование установленной мощности было малым, на практике допускается включение на параллельную работу

таких трансформаторов, напряжение коротких замыканий которых отличается от номинального значения не более чем на  $\pm 10\%$ .

Если, например, два трансформатора одинаковой номинальной мощности  $P_{nI} = P_{nII} = 1000$  ква имеют напряжения короткого замыкания  $u_{kI} = 5,5\%$  и  $u_{kII} = 6,5\%$ , то недоиспользование мощности определяется следующими соображениями. Трансформатор с меньшим напряжением короткого замыкания нагружается в большей мере и его нагрузка не должна быть больше номинальной, так как нормально перегрузка не допускается. Следовательно,  $P_I = P_{nI} = 1000$  ква.

Определим нагрузку второго трансформатора:

$$\frac{P_{II}}{P_I} = \frac{u_{kI}}{u_{kII}}, \text{ откуда } P_{II} = P_I \cdot \frac{u_{kI}}{u_{kII}} = 1000 \cdot \frac{5,5}{6,5} = 850 \text{ ква.}$$

Таким образом, недоиспользована мощность 150 ква, что составит  $\frac{150}{2000} \cdot 100 = 7,5\%$  установленной мощности.

При включении на параллельную работу трансформаторов различных мощностей нужно, чтобы трансформатор большей номинальной мощности имел меньшее напряжение короткого замыкания, чем трансформатор меньшей номинальной мощности. В этом случае недоиспользование установленной мощности будет меньше, чем когда трансформатор большей мощности имеет большее напряжение короткого замыкания.

Если на параллельную работу включить трансформаторы с  $P_{nI} = 40\,500$  ква,  $u_{kI} = 8,5\%$ ,  $P_{nII} = 7\,500$  ква,  $u_{kII} = 7,5\%$ , то второй трансформатор с меньшим напряжением короткого замыкания может быть нагружен до номинальной мощности, т. е.  $P_{II} = P_{nII} = 7\,500$  ква.

Определим нагрузку первого трансформатора:

$$\frac{P_I}{P_{II}} = \frac{u_{kII}}{u_{kI}} \cdot \frac{P_{nI}}{P_{nII}}, \text{ откуда } P_I = P_{nI} \cdot \frac{u_{kII}}{u_{kI}} = 40\,500 \cdot \frac{7,5}{8,5} = 35\,750 \text{ ква.}$$

Таким образом, недоиспользована установленная мощность  $40\,500 - 35\,750 = 4\,750$  ква, что составляет  $\frac{4\,750 \cdot 100}{40\,500 + 7\,500} \approx 10\%$  установленной мощности.

Если бы трансформатор большей мощности имел меньшее напряжение короткого замыкания, т. е.  $u_{kI} = 7,5\%$  и  $u_{kII} = 8,5\%$ , то первый трансформатор был бы нагружен до номинальной нагрузки, т. е.  $P_I = P_{nI} = 40\,500$  ква. Нагрузка второго трансформатора была бы  $P_{II} = P_{nII} \cdot \frac{u_{kI}}{u_{kII}} = 7\,500 \cdot \frac{7,5}{8,5} = 6\,600$  ква, т. е. недоиспользована

установленная мощность  $7\,500 - 6\,600 = 900$  ква или  $\frac{900 \cdot 100}{40\,500 + 7\,500} = 1,87\%$  установленной мощности.

Если на параллельную работу включено большое число трансформаторов, распределение нагрузки между ними определяется соотношением:

$$\frac{P_I}{P_{нI}} : \frac{P_{II}}{P_{нII}} : \frac{P_{III}}{P_{нIII}} \dots = \frac{1}{u_{кI}} : \frac{1}{u_{кII}} : \frac{1}{u_{кIII}} \dots$$

Пусть на параллельную работу включены три трансформатора, номинальные мощности и напряжения коротких замыканий которых имеют следующие значения:

$$P_{нI} = 10\,000 \text{ ква}, u_{кI} = 7,5\%; P_{нII} = 20\,000 \text{ ква}, u_{кII} = 8\%;$$

$$P_{нIII} = 15\,000 \text{ ква}, u_{кIII} = 8,5\%.$$

Первый трансформатор с наименьшим напряжением короткого замыкания может быть нагружен до номинальной нагрузки, т. е.  $P_I = P_{нI} = 10\,000 \text{ ква}$ . Нагрузку других трансформаторов определим из соотношений:

$$\frac{P_I}{P_{нI}} : \frac{P_{II}}{P_{нII}} : \frac{P_{III}}{P_{нIII}} = \frac{1}{u_{кI}} : \frac{1}{u_{кII}} : \frac{1}{u_{кIII}},$$

откуда

$$P_{II} = P_{нII} \cdot \frac{u_{кI}}{u_{кII}} = 20\,000 \cdot \frac{7,5}{8} = 18\,750 \text{ ква}$$

$$\text{и } P_{III} = P_{нIII} \cdot \frac{u_{кI}}{u_{кIII}} = 15\,000 \cdot \frac{7,5}{8,5} = 13\,250 \text{ ква}.$$

Таким образом, недоиспользована мощность  $(20\,000 - 18\,750) + (15\,000 - 13\,250) = 3\,000 \text{ ква}$ , что составит  $\frac{3000 \cdot 100}{15\,000 + 20\,000 + 10\,000} = 6,7\%$  общей установленной мощности трансформаторов.

На параллельную работу трансформаторов оказывает влияние соотношение активных и реактивных составляющих напряжений коротких замыканий. Если составляющие напряжений коротких замыканий не равны, трансформаторы будут недоиспользованы.

При неравенстве активных и реактивных составляющих напряжения короткого замыкания токи параллельно работающих трансформаторов не будут совпадать по фазе и ток, отдаваемый ими приемнику электрической энергии, будет равен геометрической сумме токов трансформаторов, т. е. будет меньше арифметической суммы токов. Следовательно, при номинальных нагрузках трансформаторов ток, потребляемый приемником энергии, будет меньше суммы номинальных токов трансформаторов.

Для трансформаторов различных мощностей активные и реактивные составляющие напряжений короткого замыкания различны: у трансформатора большей мощности реактивное сопротивление и реактивная составляющая напряжения короткого замыкания больше, а активное сопротивление и активная составляющая напряжения короткого замыкания меньше, чем у трансформатора меньшей мощности. Поэтому условие равенства активных и реак-

тивных составляющих напряжений коротких замыканий делает нежелательным включение на параллельную работу трансформаторов, номинальные мощности которых отличаются более чем в 2,5 раза.

#### Контрольные вопросы

1. В каких случаях целесообразно включение трансформаторов на параллельную работу?
2. Перечислите условия, необходимые для включения на параллельную работу трехфазных трансформаторов.
3. Как распределяется нагрузка между параллельно работающими трансформаторами различной номинальной мощности и неравными напряжениями короткого замыкания?
4. Почему нежелательно включение на параллельную работу трансформаторов, мощности которых отличаются во много раз?