

МИНИМАЛЬНО-ДОПУСТИМЫЕ ОСТАТОЧНЫЕ НАПРЯЖЕНИЯ НА ШИНАХ ИНВЕРТОРНОЙ ПОДСТАНЦИИ ПРИ КОРОТКИХ ЗАМЫКАНИЯХ В ТРЕХФАЗНОЙ СЕТИ

В. К. ЩЕРБАКОВ и А. Т. ПУТИЛОВА

1. В мощных электропередачах преобразование постоянного тока в переменный возможно с помощью высоковольтных вентилях, снабженных системой сеточного управления (инвертор). Преобразованная энергия в наиболее общем случае вливается в трехфазную сеть (приемная сеть), где имеются свои источники активной мощности — синхронные генераторы.

При коротких замыканиях в приемной трехфазной сети возможно значительное снижение напряжения на стороне переменного тока инвертора, что поведет к нарушению нормального режима работы последнего, а при некоторых предельных значениях снижения величины противоэлектродвижущей силы инвертора неизбежно наступит потеря управления инвертором. В общем виде здесь происходит следующее: понижение напряжения на стороне переменного тока инвертора приводит к увеличению отдаваемого тока инвертора в сеть переменного тока; при увеличенном токе инвертора возрастает время, необходимое для перехода дуги с одного вентиля на другой; при некотором значении тока инвертора дуга в выключаемом вентилю не погаснет и процесс коммутации в инверторе нарушится.

За счет более раннего зажигания дуги следующего вентиля возможно улучшить условия отключения предыдущего вентиля, однако это связано с ухудшением коэффициента мощности инвертора и ограничено некоторым пределом возможного времени опережения зажигания дуги следующего вентиля.

Таким образом, возникает вопрос о величине допустимых снижений напряжения в трехфазной сети, вопрос об устойчивой работе преобразователя постоянного тока в переменный — инвертора.

Особенностью работы вентилях в инверторном режиме является наличие угла опережения β . Сетка вступающего в работу вентиля должна быть открыта с опережением на некоторый угол относительно точки пересечения кривых фазовых э. д. с. Время, определяемое величиной угла опережения β , должно быть достаточно для коммутации тока с одного вентиля на другой (угол γ) и для восстановления управляющего действия сетки вентиля, выходящего из работы (угол погасания δ) (рис. 1).

Для устойчивой работы инвертора необходимо, чтобы угол погасания (δ) не падал ниже $\delta_0 = 10 - 15^\circ$ для ртутных вентилях обычной конструкции. Угол погасания определяется известной формулой:

$$\cos \delta = \cos \beta + \frac{I_g X}{U_2}, \quad (1)$$

где β — угол опережения инвертора,

X — реактивное сопротивление контура коммутации (в частном случае реактивное сопротивление инверторного трансформатора),

I_g — инвертируемый постоянный ток,

U_2 — линейное напряжение трехфазной сети, под действием которого происходит коммутация тока с одного вентиля на другой.

С другой стороны, если напряжение на шинах источника постоянного тока остается неизменным, то снижение напряжения в трехфазной сети

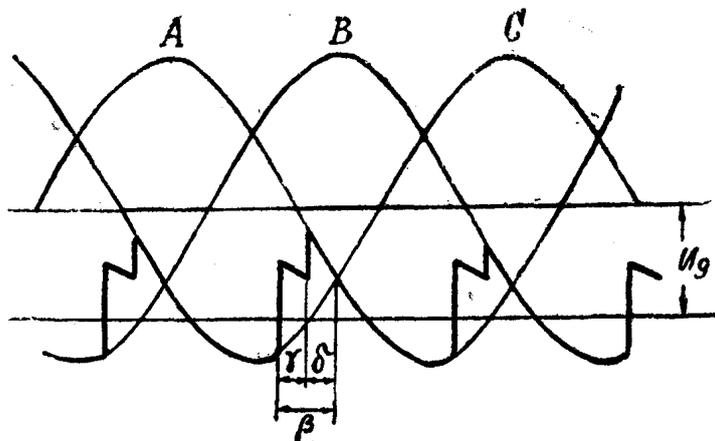


Рис. 1. Против-э.д.с. трехфазного инвертора

приводит к снижению коммутирующего напряжения и к увеличению инвертируемого тока на величину

$$\Delta I_g = \frac{(1 - U_g) \cos \beta}{Z_g}, \quad (2)$$

где

U_g — против-э. д. с. инвертора,

Z_g — сопротивление цепи постоянного тока.

При симметричных снижениях напряжения допустимые остаточные напряжения трехфазной сети могут быть определены по формуле

$$U_2 = \frac{X + \frac{X}{Z_g} \cos \beta}{\cos \delta - \cos \beta + \frac{X}{Z_g} \cos \beta}, \quad (3)$$

которая получена из уравнений (1) и (2).

Допустимые остаточные напряжения определяются, исходя из условия, что угол погасания снижается до минимального допустимого значения δ_0 .

В этой формуле и во всех последующих формулах для определения допустимых остаточных напряжений принимается, что до предполагаемого снижения значения U_2 через инвертор протекал ток, равный номинальному току.

Будем считать, что сеточное управление инвертора получает питание от отдельного источника, работающего синхронно с трехфазной сетью, и что изменения напряжения в этой сети не сказываются на сеточном напряжении.

2. Несимметричные короткие замыкания в трехфазной сети приводят не только к снижению напряжения в сети, но и к изменению углов опережения у различных вентилях инвертора. Как в случае однофазных, так и в случае двухфазных коротких замыканий угол опережения при коммутации тока с вентиля поврежденной фазы на вентиль здоровой фазы уменьшается.

Следовательно, запас устойчивости инвертора, характеризующийся величиной угла погасания, при несимметричных снижениях напряжения, вызванных однофазным и двухфазным короткими замыканиями, уменьшает-

ся не только за счет снижения коммутирующего напряжения, но и вследствие уменьшения угла опережения из-за перемещения точки пересечения кривых фазовых напряжений (рис. 2).

Под допустимым снижением напряжения при несимметричных коротких замыканиях понимается такая степень снижения, при которой угол

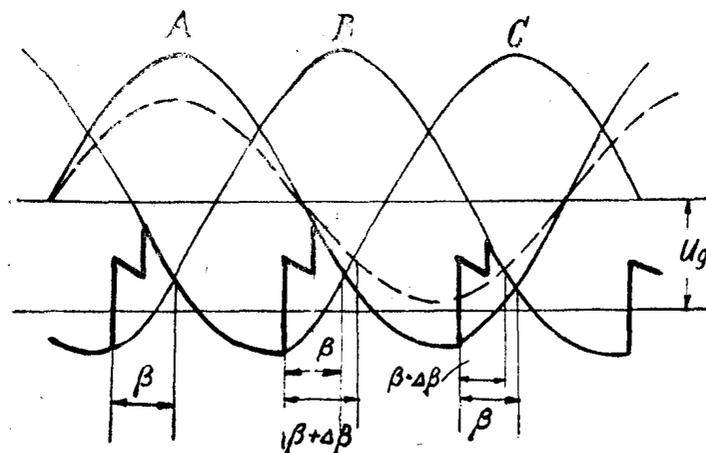


Рис. 2. Изменение углов опережения вентилей инвертора при однофазных к.з.

погасания вентиля, находящегося в самых неблагоприятных условиях для коммутации, остается не ниже минимально необходимого угла погасания δ_0 .

3. При однофазных коротких замыканиях величина допустимых остаточных напряжений определяется следующим образом.

Так как вентиль поврежденной фазы находится в самых неблагоприятных условиях для коммутации тока, то допустимые остаточные напряжения определяются, исходя из условий коммутации тока с вентиля поврежденной фазы на вентиль здоровой фазы.

Как видно из выражения (1), угол погасания определяется величиной тока инвертора и величиной напряжения U_2 , в данном случае, следовательно, линейным напряжением поврежденной и здоровой фаз.

Инвертируемый ток при снижении напряжения в трехфазной сети увеличивается. Значение инвертируемого тока определяется напряжением на шинах источника постоянного тока (это напряжение предполагается неизменным) и значением противо-э. д. с. инвертора.

Среднее значение противо-э. д. с. холостого хода инвертора при нормальном режиме и при симметричных снижениях напряжения, вызванных, например, трехфазными короткими замыканиями в сети, определяется по известной формуле

$$U_g = \frac{\sqrt{2} U_2 \sin \frac{\pi}{m}}{\frac{\pi}{m}}$$

или для дважды трехфазной мостовой схемы $U_g = 1,35 U_2$, где U_2 — линейное напряжение в трехфазной сети, подведенное к инвертору.

При несимметричных коротких замыканиях противо-э. д. с. инвертора уже не может быть определена по этой формуле, так как линейные напряжения различны по величине и углы сдвига между ними также различны.

В этом случае среднее значение противо-э.д.с. холостого хода инвертора за период находим, интегрируя по кривой изменения противо-э. д. с. инвертора, предварительно разбив эту кривую на три участка.

При однофазных коротких замыканиях приближенное значение противо-э. д. с. для дважды трехфазной мостовой схемы выражается формулой:

$$U_g = \frac{1}{3} (2 U_{2\text{фз}} + 1),$$

где $U_{2\text{фз}}$ — линейное напряжение поврежденной и здоровой фаз.

Это выражение подставляется в формулу (2) для определения величины нарастания инвертируемого тока.

Остаточное напряжение поврежденной фазы определяется из треугольника линейных напряжений (рис. 3) формулой:

$$U_{\text{ост}} = \frac{\sqrt{3}}{2} + \text{tg } \theta - 0,5, \quad (4)$$

где θ — угол между линейным напряжением поврежденной и неповрежденной фаз и линейным напряжением неповрежденных фаз.

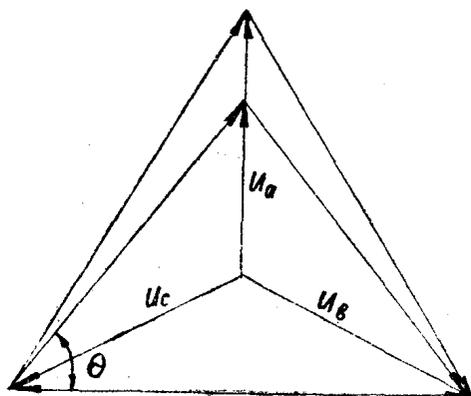


Рис. 3. Векторная диаграмма напряжений при однофазных к. з.

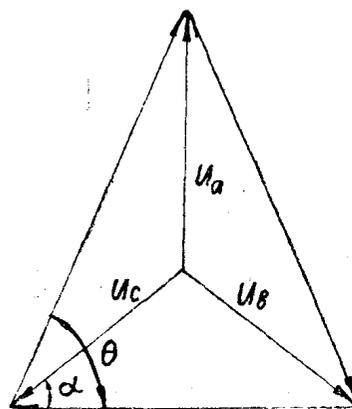


Рис. 4. Векторная диаграмма напряжений при двухфазных к. з.

Величина θ зависит от степени снижения напряжения. Тангенс угла θ определяется из уравнения вида

$$A \text{tg}^2 \theta + B \text{tg } \theta + e = 0, \quad (5)$$

которое получается из совместного решения относительно $\text{tg } \theta$ уравнений:

$$U_{2\text{фз}} = \frac{1}{2 \cos \theta}, \quad (\text{рис. 3}),$$

и уравнения (1).

Находим корни уравнения (5) при угле погасания, равном δ_0 , и из двух корней берем тот, значение которого находится в пределах $30^\circ < \theta < 60^\circ$:

Затем по формуле (4) определяем величину допустимого остаточного напряжения для данного угла опережения инвертора.

Угол между напряжениями здоровых фаз не остается постоянным, но при удаленных к. з. мы можем принять его неизменным и равным 120° .

4. При двухфазных коротких замыканиях в трехфазной сети среднее значение противо-э. д. с. холостого хода находится также путем интегрирования кривой противо-э. д. с. по частям. Оно выражается формулой:

$$U_g = 2 U_{2\text{фз}} \frac{1 + \cos \theta}{3},$$

где θ — угол между линейным напряжением поврежденной и здоровой фаз и линейным напряжением поврежденных фаз;

$U_{2\text{фз}}$ — линейное напряжение поврежденной и здоровой фаз.

Форма кривой противо-э. д. с. сильно искажается. Среднее значение противо-э. д. с. снижается в большей степени, чем при однофазных к. з., но в меньшей степени, чем при трехфазных к. з.

Остаточные напряжения определяются по формуле:

$$U_{\phi_{ост}} = \frac{0,5}{\sin \alpha}, \text{ (рис. 4),}$$

α — угол между линейным напряжением поврежденных фаз и фазовым напряжением неповрежденной фазы.

Угол α зависит от степени снижения напряжения в трехфазной сети и может быть подсчитан как

$$\alpha = \arctg \frac{1}{3} \operatorname{tg} \theta.$$

В свою очередь $\operatorname{tg} \theta$ находится как один из корней квадратного уравнения вида уравнения (5), полученного от совместного решения двух уравнений: уравнения (1) и уравнения

$$U_{2\pi 3} = \frac{1}{\frac{2}{\sqrt{3}} \sin \theta}, \text{ (рис. 4).}$$

Берется корень уравнения (5), значение которого находится в пределах $60^\circ < \theta < 90^\circ$.

5. На основе предложенной методики были подсчитаны допустимые остаточные напряжения в трехфазной сети при различных углах опережения инвертора для кабельного и воздушного вариантов мощной линии длиной 800 км и для кабельного варианта линии длиной 120 км. Получены нижеследующие результаты.

1) При параллельной работе синхронных генераторов сети и инвертора снижение напряжения, подводимого к инвертору со стороны переменного трехфазного тока, более чем на 14,7% при угле опережения, равном 40° , недопустимо.

2) Если короткие замыкания, происходящие в трехфазной сети, сопровождаются снижением напряжения, подводимого к инвертору в большей степени, чем это допустимо, то короткие замыкания в трехфазной сети вызывают короткое замыкание линии постоянного тока. Передача энергии в трехфазную сеть прекращается. Сеть трехфазного тока оказывается в этом случае в сложных условиях: отключается источник активной мощности (активная мощность, отдаваемая инвертором) и возможно еще дополнительное короткое замыкание в этой сети на инверторный трансформатор.

3) Как показывает сравнение различных видов к. з., двухфазные к. з. являются более опасными для устойчивости инвертора, чем однофазные и даже чем трехфазные к. з. (рис. 5, 6).

4) При передаче энергии постоянным током высокого напряжения на дальние и сверхдальние расстояния возможно 2 способа регулирования электропередачи:

а) поддерживается неизменным напряжение у источника постоянного тока — на выпрямительной подстанции;

б) с помощью системы сеточного регулирования выпрямителей автоматически поддерживается неизменным ток в линии, равным заданному значению. Заданное значение тока можно изменять в широких пределах при изменении нагрузки.

Сравнение этих двух способов регулирования показывает, что при втором способе регулирования допустимы значительно большие снижения

напряжения, чем при первом, как при плавных статических изменениях напряжения, так и при резких.

Степень допустимого снижения напряжения зависит от мощности электропередачи, от параметров линии постоянного тока.

Из сравнения кривых рис. 5 и 6 следует, что чем мощнее линия электропередачи, тем большая степень снижения допустима, и что при воз-

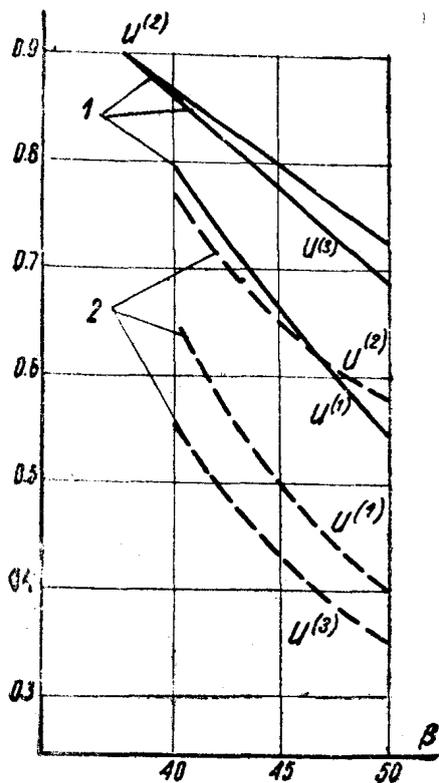


Рис. 5

- 1—при постоянстве напряжения на шинах выпрямительной п/ст
2—при статических изменениях напряжений в приемной сети при $I_g = \text{const}$.

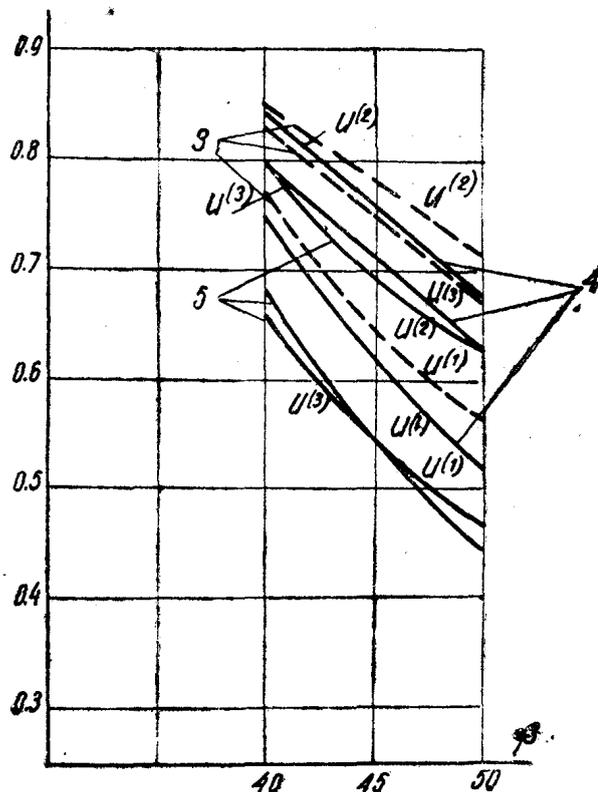


Рис. 6

- При регулировании на постоянство выпрямленного тока:
3—кабельный вариант линии длиной 120 км,
4—кабельный вариант мощной ЛЭППТ длиной 800 км,
5—воздушный вариант мощной ЛЭППТ длиной 800 км.

Допустимые остаточные напряжения на шинах инверторной п/ст при однофазных, двухфазных, трехфазных к. з. в питаемой сети.

душном варианте линии постоянного тока при втором способе регулирования электропередачи допустимы большие снижения напряжения, чем в случае кабельного варианта этой линии.