

РАСЧЕТ ДИНАМИЧЕСКОЙ УСТОЙЧИВОСТИ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СИСТЕМ С МОЩНЫМИ ИНВЕРТОРНЫМИ УСТАНОВКАМИ

В. А. Лукутин

(Представлено профессором, доктором технических наук
И. Д. Кутявиным)

Любое нарушение рабочего режима электрической системы, состоящей из линий передач, связывающих между собой генераторные станции и нагрузки, вызывает перераспределение мощностей между отдельными элементами этой системы. При отключении генераторов, трансформаторов или линий передач, а также при коротких замыканиях, мощности, отдаваемые электрическими станциями, резко меняются. Первичные двигатели генераторов снабжаются регуляторами мощности, но эти регуляторы обладают большой инерцией и реагируют на изменение мощности с большим запозданием. В результате этого нарушается равновесие между электрической мощностью, отдаваемой генераторами в сеть, и мощностью, развиваемой первичными двигателями. На валу машин создаются избыточные моменты, под действием которых скорость вращения роторов и относительные их углы меняются. В процессе возникших колебаний распределение мощностей между генераторами непрерывно изменяется и зависит от многих факторов: от инерции вращающихся масс, от величины и фазы э. д. с. генераторов, от регуляторов напряжения и т. д.

Методика расчета процесса качания синхронных машин очень хорошо разработана в специальных курсах [3]. Но в последние годы стали широко применяться мощные преобразовательные установки для промышленных целей, а также для передачи энергии постоянным током. Присутствие в электрических системах мощных преобразовательных установок определенным образом будет сказываться на их работе, особенно на нестационарных режимах в системе. Расчеты режимов энергосистем, устойчивости параллельной работы электрических станций и токов короткого замыкания приобретают своеобразный характер [7].

Инвертор является новым элементом, причем очень своеобразным, быстро реагирующим на любое изменение режима питаемой им энергосистемы. Короткие замыкания, особенно трехфазные, ведут обычно к снижению напряжения во многих точках энергосистемы, в том числе и на шинах инверторной подстанции. В результате таких изменений напряжения инвертор начинает выдавать в систему изменившуюся активную и реактивную мощность, что в свою очередь влияет на величину избыточных моментов на валах синхронных машин. Но не только напряжение влияет на величину отдаваемой инвертором мощности. Здесь немаловажную роль играет изменение реактивности системы, происходящее в результате коротких замыканий.

Активная и реактивная мощности инвертора являются функциями угла регулирования, угла перекрытия и напряжения постоянного тока на входе инвертора [1, 4, 6, 8], при этом угол регулирования сам может быть функцией тока или мощности. Учтем аналитически весь комплекс

этих факторов чрезвычайно трудно, тем более, что в литературе они освещены слабо. Задача заключается в нахождении достаточно простых методов учета влияния инвертора на процесс качания синхронных машин. Конкретно это может свестись к определению первой гармоники напряжения на шинах инверторной подстанции, зная которую можно легко определить величину отдаваемой синхронными генераторами активной и реактивной мощности. Нахождение же электрической мощности генераторов в любой момент времени является самой трудоемкой операцией в расчетах динамической устойчивости системы.

В настоящей статье будут рассматриваться только симметричные короткие замыкания в электрической системе, в которую отдает свою мощность инвертор, работающий по дважды трехфазной мостовой схеме.

Высшими гармониками инверторного тока будем пренебрегать, учитывая в расчетах лишь ток основной частоты. Кроме упрощения расчетов, это оправдывается еще и тем, что высшие гармоники тока не влияют сколько-нибудь заметно на устойчивость синхронных машин. В дальнейшем изложении предполагается, что в аварийных режимах системы инвертор сохраняет обычный порядок горения вентилях по два и три, а инвертируемый ток идеально сглажен.

В расчетах устойчивости широко практикуется замена группы генераторов и даже целых электрических станций эквивалентным генератором, если есть уверенность, что роторы этих генераторов будут в переходном режиме колебаться одинаково. Однако применение метода последовательных интервалов позволяет объединять в эквивалентный генератор даже несинхронно качающиеся машины, но только такое объединение необходимо производить для каждого расчетного интервала отдельно. Учитывая это обстоятельство, будем объединять по известным формулам электрическую систему в эквивалентный генератор с э. д. с. \dot{E}_u и эквивалентным реактивным сопротивлением x_c . Такое свертывание энергосистемы будем производить в каждом расчетном интервале.

В результате получим простую схему, состоящую из инвертора, работающего через трансформатор и эквивалентное сопротивление на противо-э. д. с. E_u (рис. 1).

В теории преобразователей очень часто принимают за противо-э. д. с. инвертора напряжение на зажимах первичной обмотки силового трансформатора, а в качестве анодных реактивностей берут реактивности рассеяния этого трансформатора. Но это будет справедливо лишь в случае незначительной мощности преобразовательной установки. В нашем же случае мощность инвертора соизмерима с мощностью системы и, поступая подобным образом, можно допустить большую ошибку. При достаточно большой мощности инвертора в качестве противо-э. д. с. необходимо брать эквивалентную э. д. с. системы \dot{E}_u , а анодные реактивности будут зависеть от сопротивления системы z_c [9].

Первая гармоника напряжения на шинах инверторной подстанции \dot{U}_0 будет отличаться от эквивалентной э. д. с. системы как модулем, так и фазой.

Известно, что в формулы для определения инвертируемого тока, углов коммутации, мощности, высших гармоник и т. д. входят противо-э. д. с. инвертора и угол опережения зажигания β [1, 4]. Этот угол отсчитывается от точки пересечения линейных противо-э. д. с. Но схема управляющих импульсов работает от напряжения на входе инвертора, которое отличается от противо-э. д. с. на величину падения напряжения в эквивалентном сопротивлении системы:

$$\dot{U}_0 = \dot{E}_u + \dot{I}_u z_c. \quad (1)$$

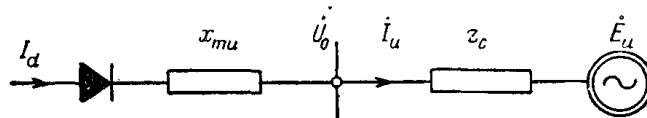


Рис. 1.

Эту зависимость можно проследить и на векторной диаграмме, изображенной на рис. 2.

На диаграмме обозначено:

- \dot{E}_u — эквивалентная противо-э. д. с. инвертора;
- \dot{U}_0 — напряжение основной частоты на шинах инверторной подстанции;
- ψ — угол между векторами \dot{E}_u и \dot{U}_0 ;
- α_z — угол, дополняющий импедансный угол эквивалентного сопротивления системы до $\frac{\pi}{2}$.

Непосредственно из векторной диаграммы можно записать:

$$\sin \psi = \frac{I_u z_c}{E_u} \cos \left(\alpha_z - \beta_0 + \frac{\gamma}{2} \right). \quad (2)$$

Если же схема управляющих импульсов работает от напряжения основной гармоники на выходе инвертора, то при установленном на определенную величину угла β_0 угол опережения зажигания будет фактически все время изменяться при изменении тока инвертора и будет равен:

$$\beta = \beta_0 + \psi. \quad (3)$$

Известно, что угол сдвига основной гармоники инверторного тока относительно противо-э. д. с. находится по формуле

$$\varphi_u = \beta - \frac{\gamma}{2}. \quad (4)$$

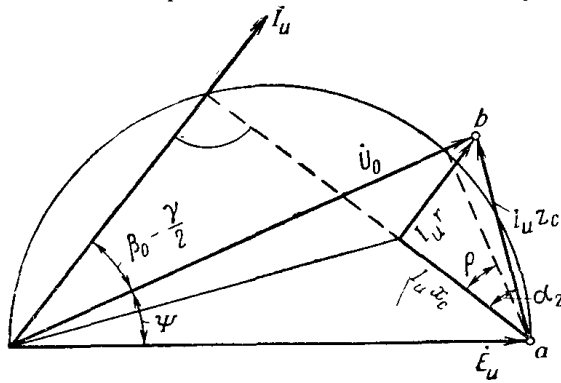


Рис. 2.

При учете равенства (3) последняя формула принимает вид:

$$\varphi_u = \beta_0 + \psi - \frac{\gamma}{2}. \quad (5)$$

Таким образом, для определения фазы инверторного тока необходимо определить угол коммутации γ .

Вопрос об определении угла коммутации достаточно подробно изучается во многих работах [1, 4, 5], но большинство авторов, как уже отмечалось, не учитывает эквивалентную э. д. с. системы и ее реактивность. Этот недостаток может быть устранен, если рассматривать перекрытие анодов как междуфазное короткое замыкание в системе за инверторным трансформатором. При этом задача определения угла коммутации будет сводиться к расчету тока двухфазного короткого замыкания в системе. Известно, что этот ток находится по следующей формуле [2]:

$$I_k = \frac{\sqrt{3} E_u}{x_{1\phi} + x_{2\phi}}, \quad (6)$$

где E_u — фазная эквивалентная э. д. с. системы, найденная ранее;

$x_{1\phi}$ — результирующее реактивное сопротивление прямой последовательности относительно точки короткого замыкания.

$x_{2\phi}$ — результирующее реактивное сопротивление обратной последовательности относительно той же точки.

Активное сопротивление элементов системы значительно меньше реактивного и его можно не учитывать.

Если линейная эквивалентная противо-э. д. с. инвертора изменяется по закону:

$$e_u = \sqrt{6} E_u \sin \omega t, \quad (7)$$

то ток коммутации в момент перекрытия анодов будет иметь следующий вид:

$$i_{\kappa} = \frac{\sqrt{6} E_u}{x_{1\varepsilon} + x_{2\varepsilon}} \sin \left(\omega t - \frac{\pi}{2} \right). \quad (8)$$

Из теории инвертирования [1,4] известно, что перекрытие анодов начинается при $\omega t_1 = 180 - \beta$ и заканчивается при $\omega t_2 = 180 - \beta + \gamma$ и что за время перекрытия ток i_{κ} успевает измениться на величину I_d .

Следовательно,

$$I_d = i_{\kappa}(t_2) - i_{\kappa}(t_1),$$

или

$$I_d = \frac{\sqrt{6} E_u}{x_{1\varepsilon} + x_{2\varepsilon}} [\cos(\beta - \gamma) - \cos \beta]. \quad (9)$$

В наших рассуждениях не учитывается апериодическая составляющая тока двухфазного короткого замыкания. Однако роль этой составляющей при нахождении тока I_d невелика. Согласно данным Н. Н. Щедрина [2], апериодические токи при коротких замыканиях в системах имеют постоянную времени порядка $0,05 \div 0,1$ сек и исчезают через $0,2 \div 0,3$ сек после начала аварии. Перекрытие же анодов при коммутации длится всего $0,0005 \div 0,0015$ сек и за этот короткий промежуток времени апериодический ток изменяется незначительно.

Учитывая равенство (3), последняя формула запишется в следующем виде:

$$I_d = \frac{\sqrt{6} E_u}{x_{1\varepsilon} + x_{2\varepsilon}} [\cos(\beta_0 + \psi - \gamma) - \cos(\beta_0 + \psi)]. \quad (10)$$

Для того, чтобы найти интересующий нас угол коммутации γ , необходимо решить систему уравнений (2) и (10). Уравнения оба трансцендентные и для решения системы можно разложить тригонометрические функции в ряд, ограничившись его первыми двумя членами. В результате получим такую систему:

$$\frac{2I_d(x_{1\varepsilon} + x_{2\varepsilon})}{\sqrt{6} E_u} = 2\gamma\beta_0 - 2\gamma\psi - \gamma^2;$$

$$\psi - \frac{\psi^3}{6} = \frac{I_u z_c}{2E_u} \left[2 - (\alpha_z - \beta_0)^2 - \gamma(\alpha_z - \beta_0) - \frac{\gamma^2}{4} \right].$$

Решим систему относительно γ , после упрощений получим:

$$\gamma = \frac{M - \sqrt{M^2 - \frac{1,045(x_{1\varepsilon} + x_{2\varepsilon})}{z_c} N}}{N}, \quad (11)$$

где

$$M = 1 + \frac{\beta_0 E_u}{I_u z_c} - 0,5(\alpha_z - \beta_0)^2;$$

$$N = \frac{E_u}{I_u z_c} + \alpha_z - \beta_0.$$

Если не учитывать активные сопротивления генераторов, линий передач и т. д., то $\alpha_z = 0$, а вместо z_c будет фигурировать x_c . Теперь легко находится угол ψ из формулы:

$$\psi = \arcsin \frac{I_u z_c}{E_u} \cos \left(\alpha_z - \beta_0 + \frac{\gamma}{2} \right). \quad (12)$$

Интересующее нас напряжение на шинах инверторной подстанции может быть записано:

$$\dot{U}_0 = \dot{E}_u + z_c I_u e^{i(\varphi_E + \beta_0 + \psi - \frac{\gamma}{2})} = U_0 e^{i\varphi_0}. \quad (13)$$

В этой формуле необходимо выяснить величину инверторного тока I_u .

Ток, выдаваемый инвертором в питаемую им электрическую систему, имеет, как известно, несинусоидальную форму. При соединении вентилей по дважды трехфазной мостовой схеме инверторный ток имеет форму, как указано на рис. 3.

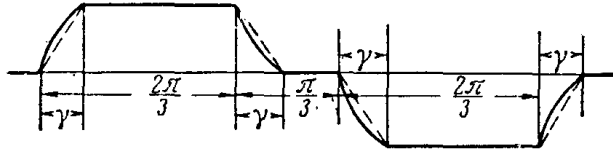


Рис. 3.

Высшие гармоники инверторного тока в данном случае интереса не представляют. Основную же гармонику можно найти разложением функции в ряд Фурье. Для упрощения задачи криволинейные участки заменим прямыми линиями, как это показано пунктиром на рис. 3. Тогда амплитуда основной гармоники тока инвертора будет подсчитываться по формуле

$$\sqrt{2} I_u = \sqrt{A_1^2 + A_2^2}, \quad (14)$$

где

$$A_1 = \frac{I_d}{\pi\gamma} (3 \sin \gamma - \sqrt{3} \cos \gamma + \sqrt{3});$$

$$A_2 = \frac{I_d}{\pi\gamma} (3 \cos \gamma + \sqrt{3} \sin \gamma - 3).$$

Расчеты показывают, что при изменении угла коммутации в самых широких пределах от нуля до 45° при неизменном значении инвертируемого тока I_d амплитуда первой гармоники I_u меняется ничтожно мало, всего в пределах 3%. На этом основании можно считать, что инверторный ток не зависит от угла коммутации и определяется величиной тока I_d следующим соотношением (для мостовой схемы):

$$I_u = 0,78 I_d. \quad (15)$$

Выше были даны некоторые формулы, при помощи которых можно найти напряжение в месте присоединения инвертора в аварийном режиме, что в свою очередь позволяет рассчитывать процесс качания синхронных машин.

В настоящее время расчеты устойчивости электрических систем производятся методом последовательных интервалов. Преимуществами этого метода являются наглядность, возможность исследования процесса во времени и простота учета величин, меняющихся в неустановившемся режиме. Эту широко известную методику можно распространить и на системы, в которых имеются мощные преобразовательные установки. Изложим коротко схему расчета устойчивости подобных систем.

1. Весь процесс качания машин разбивается на равные, достаточно малые интервалы времени.

2. Просчитывается нормальный режим работы системы и находятся рабочий инвертируемый ток I_d , э. д. с. за переходной реактивностью всех генераторов системы и определяются мощности их.

3. В первый момент после аварии э. д. с. генераторов за переходной реактивностью остаются неизменными. Учитывая это свойство, находим эквивалентную против-э. д. с. инвертора в начале первого расчетного интервала. Для этой цепи свертываем по известным формулам систему в эквивалентный генератор.

Звено выпрямитель — инвертор, как правило, работает в режиме неизменного тока I_d , который в начале первого интервала сохраняет свое доаварийное значение. Однако и при другой системе регулирования имеется возможность определить значение инвертируемого тока в аварийном режиме [6, 8].

4. Определяются результирующие сопротивления прямой и обратной последовательностей относительно места перекрытия анодов инвертора.

5. Подсчитываются угол коммутации γ и угол смещения ψ для начала первого интервала (11), (12).

6. Находится комплекс основной гармоники напряжения \dot{U}_0 шин инверторной подстанции (13).

7. Определяется мощность, отдаваемая отдельными генераторами в начале первого расчетного интервала. Для этого можно воспользоваться любыми из известных формул, в частности, следующей:

$$P_r = \frac{(E'_d)^2}{z_{11}} \sin \alpha_{11} + \frac{E'_d U_0}{z_{12}} \sin (\varphi_d - \varphi_0 - \alpha_{12}).$$

8. Находится избыток мощности на валу машин в начале первого интервала

$$\Delta P_{(0)} = \frac{P_0 - P_{(0)}}{P_0}$$

и т. д., как это излагается в курсе устойчивости [3]. После того как будет найдено значение э. д. с. генераторов в конце первого интервала, можно производить расчет второго интервала, причем снова находится эквивалентная против-э. д. с. инвертора и т. д.

Заключение

В данной статье кратко изложены основные предпосылки для расчета динамической устойчивости электрических систем с мощными инверторными установками. Однако эта методика может быть с успехом распространена на системы, в которых имеются мощные выпрямительные установки.

Применение метода последовательных интервалов позволяет учитывать изменение во времени э. д. с. генераторов и инвертируемого тока. Наиболее мощные преобразовательные установки будут применяться для целей передачи энергии постоянным током. Наличие линии передачи постоянного тока и особенно сглаживающих дросселей может при некоторых условиях значительно усложнить расчет, но принципы его сохраняются полностью. Усложнение появится за счет необходимости просчитывать для каждого интервала величину инвертируемого тока, учитывая при этом все элементы линии передачи постоянного тока и характеристики регуляторов как выпрямителя, так и инвертора.

Очень сложная задача возникает при несимметричном коротком замыкании в энергосистеме с преобразователями. Главным препятствием здесь является то, что вопрос о несимметричном режиме управляемых преобразователей вообще изучен очень слабо. Эта задача в некоторой степени тоже может быть решена на основе тех же принципов, что и случай симметричных коротких замыканий [8].

Предлагаемая методика была подтверждена примерами расчета и экспериментальными данными, которые в данной статье не приводятся.

Вопросы нестационарных режимов в энергосистемах с преобразовательными установками очень сложны, так как они объединяют две сложные проблемы: с одной стороны, проблема устойчивости электрических систем и переходные режимы в линиях постоянного тока, с другой —

проблема несимметричных и неустановившихся режимов управляемых преобразователей. Но необходимость решения их уже назрела [7].

Настоящую работу можно рассматривать как одну из попыток найти приемлемое для инженерных целей решение подобных задач.

Литература

1. Каганов И. А., Инвертирование постоянного тока в трехфазный, Госэнергоиздат, 1941.
 2. Щедрин Н. Н., Токи короткого замыкания в высоковольтных системах, методы вычисления, ОНТИ, 1935.
 3. Жданов П. С., Устойчивость электрических систем, Госэнергоиздат, 1948.
 4. Чернышев М. А., Инвертирование тока на тяговых подстанциях, Трансжелдориздат, 1950.
 5. Гикис А. Ф., Перекрытие анодных токов, «Электричество», 1948, № 8.
 6. Круг К. А., Червоненкис Я. М., Находкин Ю. Д., Померанцев М. С., Регулирование тока, напряжения и передаваемой мощности при передаче энергии постоянным током высокого напряжения, АН СССР, ЭНИИ имени Г. М. Кржижановского, отчет 1948 г.
 7. Нейман Л. Р., Теоретические проблемы современной электротехники, «Электричество», 1955, № 7.
 8. Лукутин В. А., Некоторые вопросы динамической устойчивости электрических систем с мощными преобразовательными установками, диссертация, Томск, 1955.
 9. Лукутин В. А., Учет параметров генераторов при определении угла коммутации. Печатается в настоящем сборнике.
-