

## УСЛОВИЯ СОВМЕСТНОЙ РАБОТЫ ИНВЕРТОРА, СИНХРОННЫХ МАШИН И НАГРУЗКИ

В. К. ЩЕРБАКОВ И Р. С. ЗАЙНУЛИНА

### I

#### Введение

Приемный конец электропередачи постоянного тока может включать в общем случае инвертор (преобразователь постоянного тока в переменный), синхронные генераторы, параллельно работающие с инвертором, генераторы реактивной мощности (синхронные компенсаторы и конденсаторы) и нагрузку (двигатели, печи, светильники и т. д.)

Настроенная работа всех этих элементов приемного конца предполагает, что при неизменном напряжении сети приемного конца электропередачи инвертор и синхронные генераторы должны давать столько активной мощности, сколько ее требует нагрузка, с одной стороны, и, с другой стороны, синхронные генераторы, синхронные компенсаторы и конденсаторы и другие возможные генераторы реактивной мощности должны дать столько реактивной мощности, сколько ее требуется со стороны инвертора и нагрузки.

Возможное отклонение напряжения от номинального значения в приемной сети неизбежно вызовет изменение величины отдаваемой и потребляемой мощностей элементами приемного конца и, как следствие, появление небаланса активной и реактивной мощностей в сети, дальнейшее изменение напряжения сети и т. д.

Такое положение можно ожидать, имея в виду относительную независимость величины отдаваемой активной мощности и потребляемой реактивной мощности инвертора от поведения нагрузки сети. Если генераторы активной и реактивной мощностей при установившемся режиме отдадут в сеть ровно столько мощности, сколько требует этой мощности нагрузка плюс потери в сети, то между отдаваемой и потребляемой мощностями инвертора, с одной стороны, и нагрузки, с другой стороны, подобной связи нет. Раз настроенное соответствие между инвертором и нагрузкой легко может быть нарушено при отклонениях напряжения от номинального значения.

При некоторых условиях и до некоторого предела синхронные генераторы и синхронные компенсаторы могут являться буфером между инвертором и нагрузкой и при определенных условиях могут содействовать восстановлению равновесия в сети приемного конца электропередачи при изменившемся напряжении сети. В других случаях нужно прибегать к специальным регулирующим средствам, в каждый данный момент обеспечивающим баланс активной и реактивной мощностей в сети приемного конца.

Ниже излагается методика исследования условий совместной устойчивой работы инвертора, генераторов, компенсаторов и нагрузки примени-

тельно к частному случаю, когда мощность электропередачи принята равной мощности других источников активной мощности в сети приемного конца; характеристики генераторов и компенсаторов взяты типичными для крупных современных машин; учтена некоторая средняя типичная нагрузка.

## II

### Характеристики активной и реактивной мощностей элементов сети

На рис. 1 приведена схема соединения элементов. Для упрощения все элементы непосредственно присоединены к одним и тем же шинам.

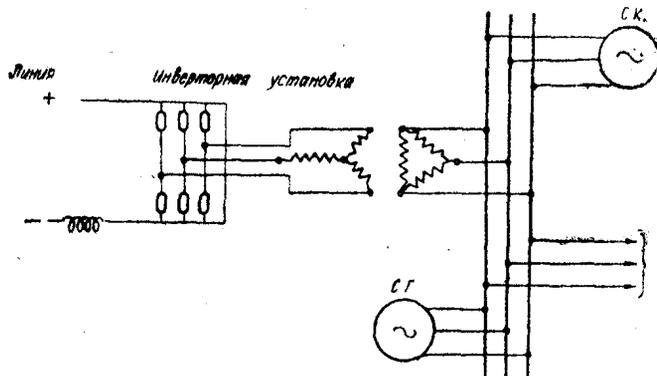


Рис. 1. Приемный конец электропередачи постоянного тока

Сначала рассматривается поведение каждого элемента в отдельности при изменении напряжения на общих шинах, а затем—во взаимной связи.

#### Синхронные генераторы

Общая мощность синхронных генераторов принята равной мощности инвертора. Генераторы являются источниками коммутационного напряжения для инвертора, определяют частоту

в сети и форму кривой напряжения на шинах приемной подстанции.

В небольших пределах изменения напряжения можно считать, что активная мощность генератора не изменяется с изменением напряжения.

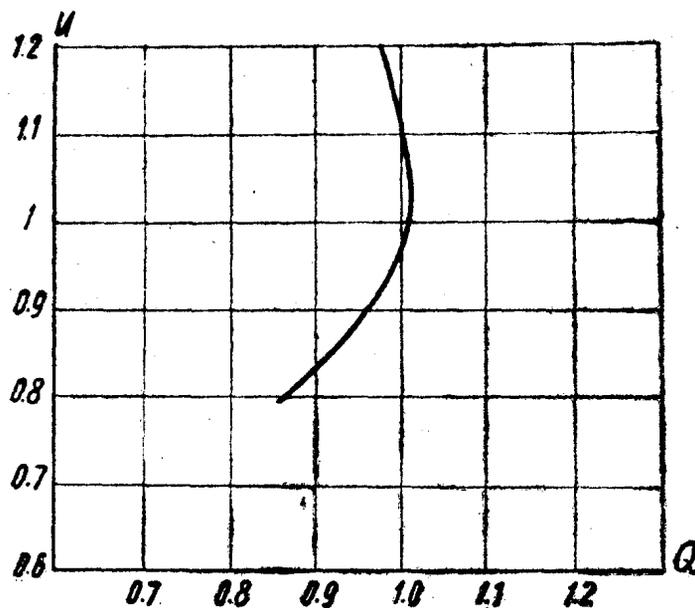


Рис. 2. Кривая реактивной мощности генератора

На рис. 2 приведена зависимость реактивной мощности генератора с синхронным реактансом  $x_d = 1,1 \cos \varphi = 0,85$  от напряжения. Кривая построена на основании круговой диаграммы в предположении, что при номи-

нальном напряжении инвертор отдает номинальную реактивную мощность. Как видно, генератор обычной конструкции без регулирования возбуждения и предварительно работавший с номинальным коэффициентом мощности, при понижении и повышении напряжения на шинах, на которые он работает, уменьшает отдачу реактивной мощности. Синхронный генератор увеличивает отдачу реактивной мощности при понижении напряжения на шинах только в случае, когда генератор предварительно работал недогруженным по реактивной мощности, но и тогда положительный регулирующий эффект очень мал.

### Синхронные компенсаторы

Зависимость отдаваемой реактивной мощности от напряжения на шинах представлена на рис. 3. Кривая получена из круговой диаграммы для компенсатора с синхронным реактанцем  $x_d = 1,8$  для возбуждения соответствующего номинальной реактивной мощности компенсатора.

Поведение синхронного компенсатора при колебаниях напряжения на шинах зависит от степени предварительной загрузки его. Синхронный компенсатор, нагруженный номинальной реактивной мощностью, имеет соответственно высокое возбуждение и при понижениях напряжения снижает отдаваемую реактивную мощность и не способствует поддержанию напряжения на прежнем уровне.

На рис. 4 приведены кривые реактивной мощности синхронного компенсатора при различном возбуждении. Кривая 2 соответствует работе компенсатора с половинной нагрузкой. Как показывает кривая, синхронный компенсатор увеличивает отдаваемую реактивную мощность при понижениях напряжения на шинах, но даже в этом случае мало способствует поддержанию напряжения на прежнем уровне без вмешательства регулирующих устройств.

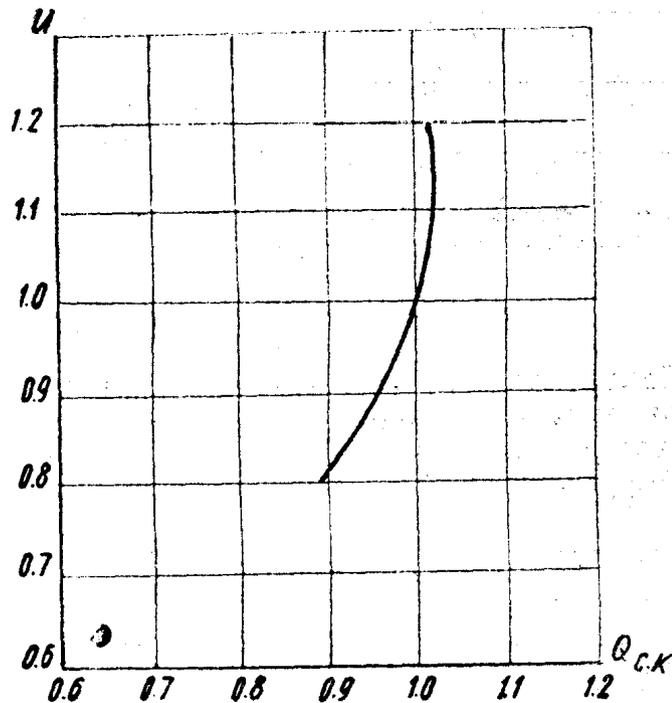


Рис. 3. Кривая реактивной мощности синхронного компенсатора

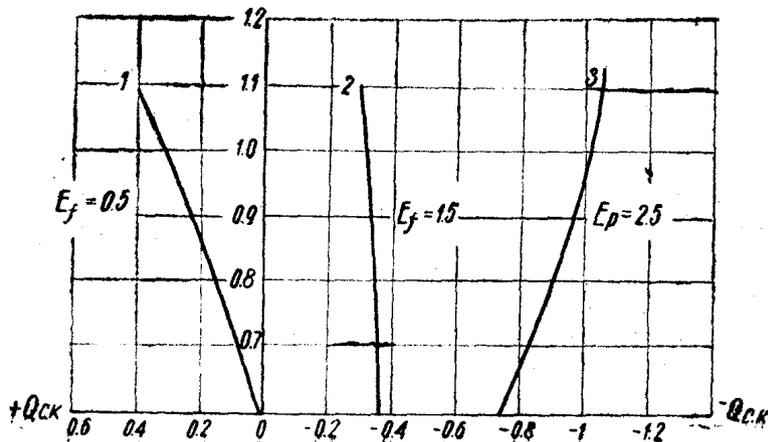


Рис. 4. Кривые реактивной мощности синхронного компенсатора при различном возбуждении.

## Нагрузка

Обычный состав нагрузки: асинхронные и синхронные двигатели, печи, ртутные выпрямители, освещение и бытовая нагрузка. Асинхронные двигатели являются основной частью нагрузки, составляют более 50% ее. Поэтому они определяют ход изменения активной и особенно реактивной мощностей всей нагрузки с изменением напряжения на шинах нагрузки.

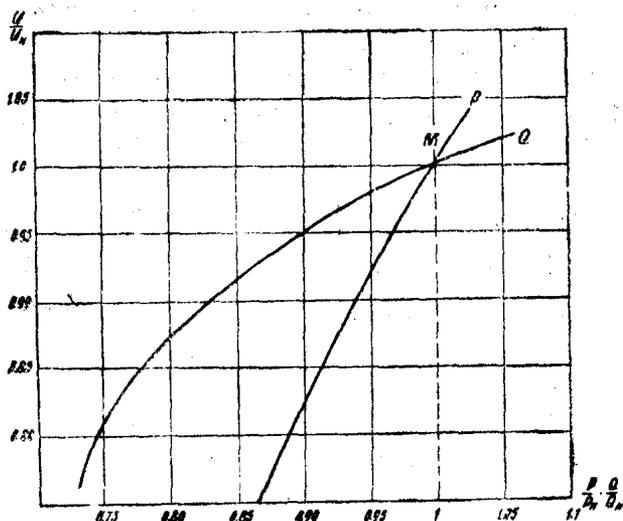


Рис. 5. Кривые активной и реактивной мощностей комплексной нагрузки

На рис. 5 приводятся кривые активной и реактивной мощностей комплексной нагрузки, составленные Теплоэлектропроектом. Кривые показывают, что смешанная нагрузка при понижении напряжения на шинах благоприятствует поддержанию напряжения на прежнем уровне, значительно уменьшая потребляемую реактивную мощность.

На рис. 5 приводятся кривые активной и реактивной мощностей комплексной нагрузки, составленные Теплоэлектропроектом. Кривые показывают, что смешанная нагрузка при понижении напряжения на шинах благоприятствует поддержанию напряжения на прежнем уровне, значительно уменьшая потребляемую реактивную мощность.

## Инвертор

Предположено, что мощность инвертора равна мощности других источников активной мощности в узле и что ртутные вентили инверторной установки соединены по дважды трехфазной мостовой схеме, наиболее приемлемой в высоковольтных и мощных установках.

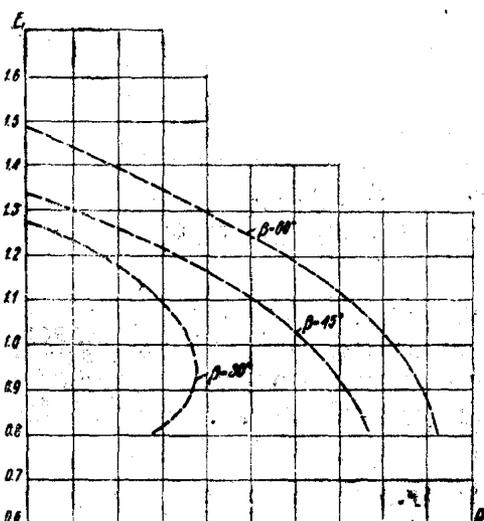


Рис. 6. Кривые реактивной мощности инвертора

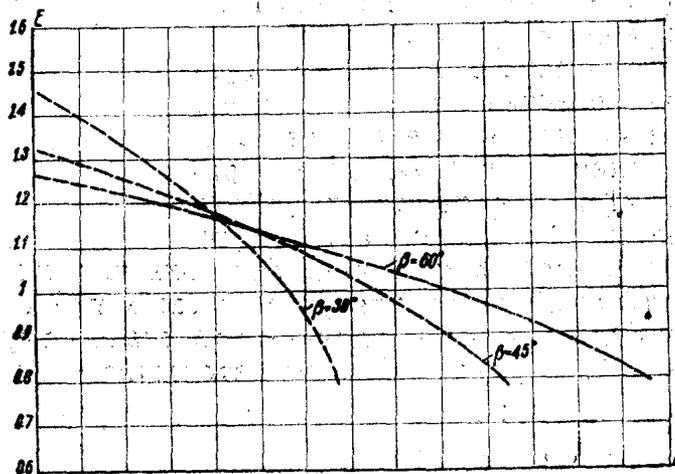


Рис. 7. Кривые активной мощности инвертора

На основе внешней характеристики инвертора получены кривые активной и реактивной мощностей инвертора для трех значений угла опережения зажигания и постоянства напряжения в начале линии, рис. 6 и 7.

Увеличение угла опережения инвертора ведет к увеличению отдаваемой активной и потребляемой реактивной мощностей инвертора. При  $\beta = 60^\circ$  абсолютная величина реактивной и активной мощностей почти в два раза больше, чем при  $\beta = 30^\circ$ .

С изменением угла опережения инвертора меняется соотношение активной и реактивной мощностей. При  $\beta = 60^\circ$  реактивная мощность, потребляемая инвертором, гораздо больше активной мощности, отдаваемой им в сеть. Рабочие углы опережения инвертора лежат между углами  $30^\circ$  и  $60^\circ$ .

### III

#### Баланс реактивной мощности в сети приемного конца

Источниками реактивной мощности в узле являются синхронные генераторы и синхронные компенсаторы. Графическое сложение кривых реактивной мощности синхронных машин дает кривую изменения всей производимой реактивной мощности в узле с изменением напряжения на шинах, рис. 8, кривая 1.

Потребителями реактивной мощности в узле являются комплексная нагрузка и инвертор. Графическое сложение кривых реактивной мощности инвертора и нагрузки дает суммарную кривую изменения реактивной мощности, потребляемой всеми элементами узла, с изменением напряжения на общих шинах, рис. 8, кривая 2.

Элементы узла подобраны так, что при номинальном напряжении на шинах имеется равновесие мощностей, поэтому кривые реактивной мощности источников и потребителей пересекаются в точке М. Точка М является точкой нормальной работы элементов узла. Как показывает ход кривых 1 и 2, при отклонении напряжения от номинального значения в ту или другую сторону, соотношение реактивной мощности потребителей и источников изменяется. При снижении напряжения на шинах примерно на 10% сохраняется избыток реактивной мощности; при повышении напряжения, наоборот, возникает недостаток реактивной мощности. Эти два условия вполне определяют устойчивую работу системы в точке М при возможных статических отклонениях напряжения от номинального значения его.

При снижении напряжения более, чем на 10%, реактивная мощность, нужная потребителям, оказывается больше мощности, которую могут дать источники. Реактивной мощности в узле нехватает. Последствием этого явится дальнейшее снижение напряжения на шинах и распад системы.

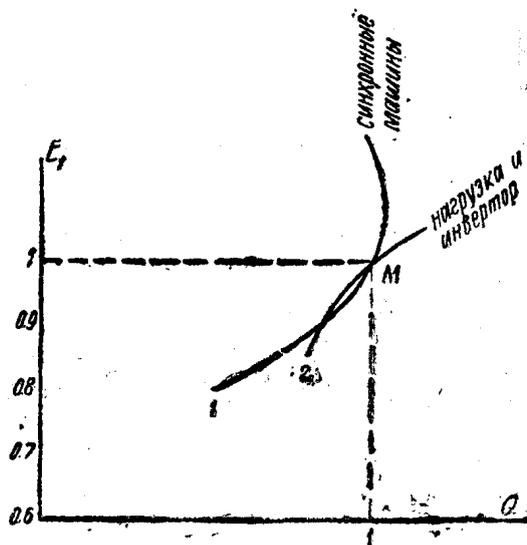


Рис. 8. Суммарные кривые реактивной мощности источников и потребителей

### IV

#### Баланс активной мощности в сети приемного конца

При отсутствии регулирующих устройств у элементов узла с изменением напряжения на общих шинах равновесие активной мощности нарушается также.

Если у двух элементов сети—нагрузки и генераторов—активная мощность мало изменяется с изменением напряжения, то отдаваемая инвертором в сеть активная мощность изменяется довольно резко. Источниками активной мощности в узле являются синхронные генераторы и инвертор.

Характеристики активной мощности инвертора и генераторов представлены на рис. 9, кривая 2.

Прямая 1, рис. 9, изображает изменение активной мощности, потребляемой смешанной нагрузкой. В рассматриваемых пределах изменения напряжения активная мощность нагрузки изменяется очень мало. Суммарные кривые активной мощности источников и потребителей пересекаются

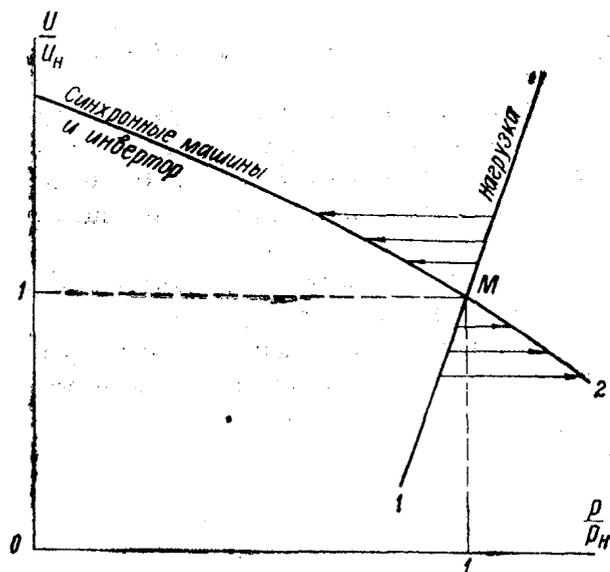


Рис. 9. Суммарные кривые активной мощности источников и потребителей

в точке М, соответствующей номинальному напряжению на шинах и являющейся нормальной рабочей точкой. В этой точке имеется равновесие активной мощности.

Из рис. 9 видно, что при снижении напряжения на 1—5% равновесие нарушается: активная мощность, которую могут отдавать источники, оказывается больше, чем активная мощность, необходимая потребителю. Вследствие понижения напряжения инвертор берет на себя дополнительную активную нагрузку, генераторы разгружаются. При повышении напряжения, наоборот, вследствие сокращения отдачи инвертором активной мощности в сеть, генераторы сильно

нагружаются. Если нагрузка генераторов будет в допустимых пределах, они останутся в работе. Если же нет, то они будут отключены защитой от перегрузки. В результате распадается система.

## V

### Заключение

1. Выше дана общая методика исследования условий совместной работы элементов системы, подключенной к электропередаче постоянного тока.

2. Вместе с тем исследование, проведенное применительно к некоторым частным, но достаточно типичным значениям параметров элементов сети, показало, что, очевидно, в большинстве случаев устойчивая работа системы невозможна без вмешательства соответствующих регулирующих устройств.

3. Однако важно отметить, что при статических изменениях напряжения, допустимых в нормальном режиме ( $\pm 5\%$ ) в разобранным случае равновесие реактивной мощности сохраняется без вмешательства регулирующих устройств.

4. Результаты подобного исследования поведения инвертора, синхронных машин и нагрузки применительно к конкретному случаю позволяют поставить совершенно определенные требования к регулирующим устройствам всех элементов узла.

5. Исследование, проведенное выше, должно быть дополнено рассмотрением поведения системы при изменении нагрузки приемного конца,