

ОБ УСТОЙЧИВОСТИ РАБОТЫ ЛИНИИ ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧИ¹

Канд. техн. наук, проф. РАХИМОВ К. Р.

Кыргызский технический университет

В статье проанализирована существующая теория устойчивости работы линий электропередачи, под которой понимается способность сохранять работу ее частей и элементов при различного рода возмущениях.

Нам представляется, что имеется ряд неверных допущений и предположений в изложении теории устойчивости.

В качестве формулы расчета устойчивости линии электропередачи использована формула, выведенная из векторной диаграммы напряжений генератора.

Векторная диаграмма напряжений генератора дана на рис. 1. Здесь U — напряжение на выводах; IX_d — падение напряжения на индуктивном сопротивлении; U_p , U_a — реактивная и активная составляющие напряжения на выводах; E — геометрическая сумма напряжений на выводах и внутри генератора, которую называют ЭДС генератора; φ — угол сдвига векторов между током и напряжением на выводах; δ — угол между напряжением U и E .

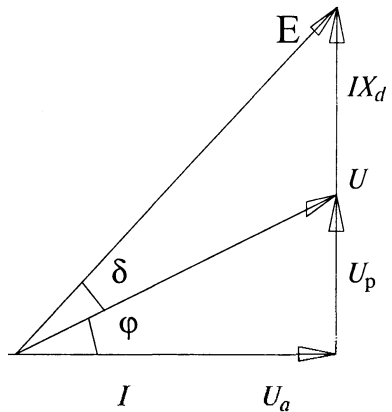


Рис. 1

На рис. 2 представлена векторная диаграмма мощностей, где S_r — полная мощность, выдаваемая генератором; P_r и Q_r — ее активная и реактивная составляющие; ΔQ_L — реактивная мощность, потребляемая самим генератором; S'_r — сумма полной мощности, выдаваемой генератором, и потребляемой реактивной мощности. Падением напряжения и потерей мощности на активном сопротивлении генератора пренебрегают.

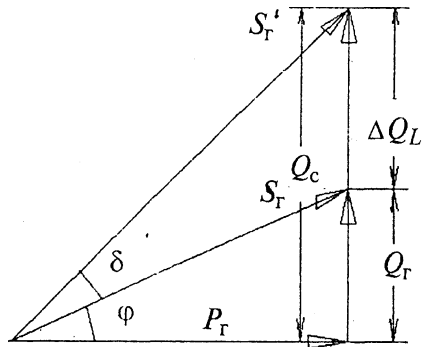


Рис. 2

Согласно векторной диаграмме мощностей вырабатываемая генератором реактивная мощность является емкостной, часть ее идет на компенсацию индуктивности генератора ΔQ_L , а другая часть Q_r — в сеть.

В векторных диаграммах углы сдвига между векторами напряжений и мощностей φ и δ при неизменных соотношениях мощностей не из-

¹ Публикуется в порядке обсуждения. — *Ред.*

меняются. На рис. 3 они показаны на временной диаграмме. В генераторах при номинальных параметрах угол φ находится в пределах $25-37^\circ$, а угол δ — в пределах $25-40^\circ$.

В зависимости от режима работы генератора угол φ может меняться от 0 до 90° , а угол δ — от 0 (при холостом ходе) до значений, которые получаются при допустимых перегрузках генератора (до $1,05 P_H$).

Из векторной диаграммы напряжений и мощностей генератора можно найти различные соотношения между параметрами. Так найдено [1] соотношение между активной мощностью, напряжением, ЭДС E и индуктивным сопротивлением генератора (рис. 4)

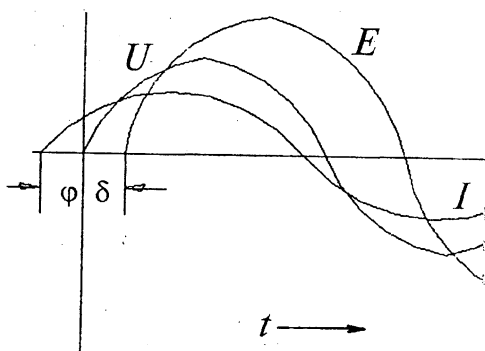


Рис. 3

$$CD = AB = E \sin \delta = IX_d \cos \varphi. \quad (1)$$

Умножая левую и правую части уравнения на U/X_d , получают

$$\frac{UE}{Xd} \sin \delta = IU \cos \varphi = P. \quad (2)$$

Эту формулу необоснованно используют для анализа устойчивости работы генератора или линии электропередачи. Считается, что при постоянстве ЭДС E и напряжения U изменение передаваемой мощности P может быть обусловлено лишь соответствующим изменением угла δ [1]. Более того утверждается, что величиной, непосредственно определяющей значение активной мощности, отдаваемой генератором приемнику, является угол δ [2], а также, что, согласно уравнению (2), зависимость мощности от угла δ имеет синусоидальный характер.

Главной ошибкой в таких суждениях является то, что угол δ в диаграмме напряжения (или мощностей) так же, как и угол φ , является тригонометрическим, он принят пространственным (временным).

Мощность имеет синусоидальный характер в зависимости от пространственного (временного) угла, и согласно законам электротехники изменение мощности во времени изображают в виде положительных полуволн (рис. 5).

Для трехфазного генератора мощность каждой фазы изменяется со сдвигом в 60° относительно друг друга (рис. 6). Согласно рис. 6 прямая P_T (мощность турбины) пересекает 12 раз $P_{эф}$ в течение одного оборота

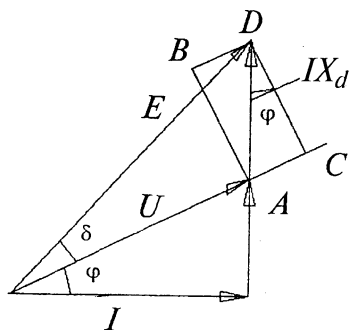


Рис. 4

ротора. Сумма векторов мощностей трех фаз, или нагрузка на валу турбины, изменяется с периодичностью в 60° , т. е. механическая нагрузка на турбину меняется с частотой 300 Гц.

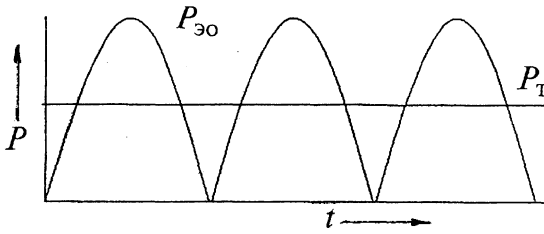


Рис. 5

В теории устойчивости при сравнении мощности трехфазного генератора с мощностью турбины рассматривают только одну фазу. Такой подход является неверным, так как механические усилия на турбину оказывает одновременно сумма мгновенных значений мощностей всех трех фаз.

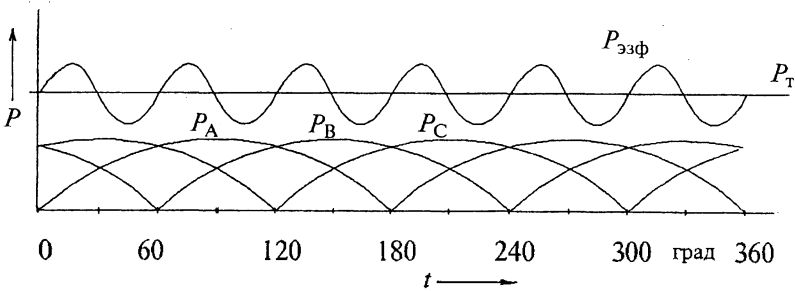


Рис. 6

Предположим, что по общепринятой методике сравнение мощностей турбины и генератора можно производить только для однофазного генератора. Точка пересечения кривой изменения мощности генератора с мощностью турбины должна быть всегда определенной. Без учета КПД мощность турбины равна действующему значению мощности генератора

$$P_T \approx P_{\text{э дейст}} = P_{\text{э макс}} / \sqrt{2}. \quad (3)$$

Углы, при которых пересекаются синусоида электрической мощности генератора P_3 с мощностью турбины P_T (рис. 7), всегда равны 45° и 35° , при этом энергии турбины и генератора будут равны $A_T = A_3$.

При оценке устойчивости по (2) считается, что первый угол есть угол δ (точка 1 рис. 7), т. е. полагается, что угол между векторами E и U и угол пересечения кривой P_3 — одно и то же. Такое предположение в корне неверно, так как всегда точка пересечения 1 должна быть при угле 45° и этот угол при возмущениях должен восстанавливаться.

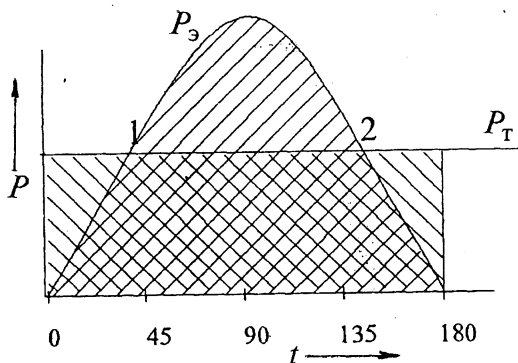


Рис. 7

При изменении электрической или механической мощности точки пересечения будут смещаться в ту или иную сторону до установления равновесия между ними, углы пересечения восстановятся при первоначальном значении в 45° (рис. 8).

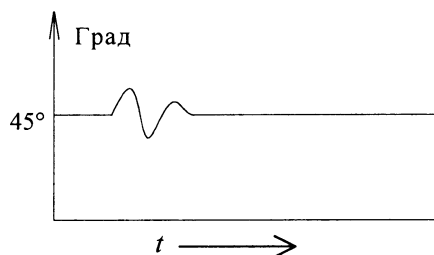


Рис. 8

В трехфазном генераторе действующая мощность равна

$$P_{\text{дейст}} = \sqrt{3}IU \cos \varphi . \quad (4)$$

Согласно рис. 5 сумма мгновенных значений мощностей трех фаз меняется между значениями 1,732 и 2; среднее значение равно 1,866, следовательно, соотношение мощности турбины и трехфазного генератора равно

$$P_T = 1,866P_{\text{дейст}} . \quad (5)$$

Нельзя рассматривать устойчивость работы трехфазного генератора, сопоставляя мощность турбины и синусоиду мощности одной фазы, как это обычно делается.

Еще более не подходит применение (2) для оценки устойчивости линии электропередачи. Искусственный перенос (2) для расчетов устойчивости линии электропередачи ошибочен и необоснован. В (2) X_d суммируют с суммой сопротивлений трансформаторов и линии электропередачи, и расчет ведут по видоизмененной формуле

$$P = \frac{U_1 U_2}{X} \sin \delta , \quad (6)$$

где U_1, U_2 — напряжение в начале и конце линии электропередачи; x — сумма сопротивлений генератора, трансформатора и линии электропередачи.

Угол δ имеет отношение только к генератору, и закономерности его изменения зависят от соотношения активных и реактивных мощностей генератора. Напряжение на конце передачи изменяется относительно напряжения в начале передачи в зависимости от параметров линии, напряжения, загрузки линии (рис. 9).

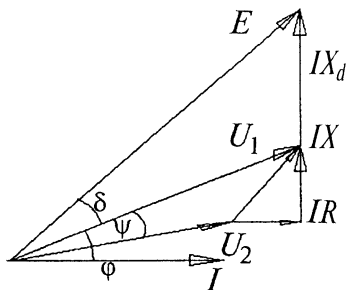


Рис. 9

Абсолютно нет оснований для того, чтобы рассматривать устойчивость линий электропередачи по (6).

Ненормальными режимами работы линии электропередачи могут быть только перегрузка, протекание токов качания и короткого замыкания и превышение напряжения.

Одной из причин неустойчивости генератора является недостаточная скорость форсировки тока возбуждения при возмущениях напряжения, например при КЗ, резких набросах нагрузки при отключении одной из параллельных линий, при которых могут снижаться напряжение в системе и частота генератора.

При сбросах нагрузки или отключении линии будут иметь место повышение напряжения в системе и увеличение частоты генератора.

Причинами неустойчивости генератора могут быть и повреждения в механической части системы турбина-генератор (отказ пускорегулирующих аппаратов, автоматики регулирования числа оборотов турбины).

Все виды автоматики действуют на поддержание напряжения и частоты генератора: быстрое отключение точки КЗ, быстрая разгрузка паровых турбин с помощью ЭГП (электрогидравлических преобразователей), автоматическое ограничение мощности (АОМ), автоматическая частотная разгрузка (АЧР) системы, делительная автоматика и т. д.

Обеспечение надлежащей устойчивой работы энергосистем, их частей и основных элементов перечисленными выше видами автоматики указывает на то, что причинами неустойчивости являются только нарушения условий параллельной работы генераторов (станций) и системы, т. е. неравенство частот или напряжений.

Таким образом, на устойчивость работы генератора не влияют углы ни между E и U генератора, ни между напряжениями начала и конца линии U_1 и U_2 .

При рассмотрении отдельно линии для нее не существует понятие устойчивости. Линии, связывающие два узла энергосистемы или две отдельные энергосистемы, работающие синхронно, имеют на концах примерно равные напряжения и небольшие углы сдвига. Так как частота системы при нормальной работе одинакова во всех узлах, говорить о большом угловом сдвиге между векторами напряжений начала и конца линий и о сильном изменении ее величины не приходится.

ЛИТЕРАТУРА

1. Жданов П. С., Лебедев С. А. Устойчивость параллельной работы электрических систем. — М.: Энергоиздат, 1934. — 388 с.
2. Идельчик В. И. Электрические системы и сети. — М.: Энергоатомиздат, 1989. — 592 с.

Представлена кафедрой
электроэнергетики

Поступила 6.12.2000