

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ КОНЦЕВЫХ УСТРОЙСТВ ПРИ НАСТРОЙКЕ ЛИНИЙ НА ПОЛУВОЛНУ

В. Т. Агафонов

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

Одним из способов обеспечения статической устойчивости сверхдальних передач переменного тока является настройка на полуволну. Возможность использования данного способа для сверхдальних электропередач становится все более очевидной при длинах линий больше 1 500 км. Применение компенсации в том виде, как она осуществляется теперь (последовательным включением емкостей и параллельным включением реакторов) встречает при таких линиях серьезные затруднения [1, 2, 3], так как: а) велика потребная мощность компенсирующих устройств; б) значительно возрастают токи короткого замыкания и потребная мощность аппаратуры; в) возникают явления самовозбуждения, самораскачивания, субгармонических колебаний.

Электропередача с промежуточными синхронными компенсаторами, реактивность которых компенсирована продольной емкостью, представляет собой второе решение данной проблемы. Но для окончательного выяснения возможности применения такой электропередачи для сверхдальних линий переменного тока требуется большая научно-исследовательская работа. Имеется очень много вопросов, слабо изученных или не изученных совсем. Такие вопросы, как параметрический резонанс, динамические перенапряжения, наиболее целесообразная степень и схема продольной компенсации, самовозбуждение, самораскачивание при параллельной работе нескольких компенсаторов, неустойчивость двух машин, связанная емкостным сопротивлением, требуют своего разрешения. Не исследованы также переходные процессы, поведение защит и другие режимы всей системы. Возможно, что для устранения всех этих явлений придется значительно уменьшить степень компенсации реактивности компенсаторов, а это может намного повысить потребную их мощность [4, 5, 6]. Нужно отметить, что само применение промежуточных синхронных компенсаторов незначительно улучшает динамическую устойчивость электропередачи, и для ее улучшения нужны специальные мероприятия [7].

Настройка линий на полуволну имеет также свои недостатки, одним из которых является сравнительно большая мощность компенсирующих устройств, особенно при длине линии 1 500 км и при необходимости настройки в режим, больший полуволны ($Q_p > 2$, $Q_{ск} > 2$).

Мощность компенсирующих устройств можно уменьшить, используя в качестве компенсирующих устройств генераторы и трансформаторы отправного и приемного концов электропередачи, как это предложено впервые в [8]. Но в этой работе рассматривался только простой случай, а именно возможность настройки при помощи индуктивных сопротивлений постоянной величины, к которым, без сомнения, могут быть отнесены только трансформаторы и реакторы. Вопрос о том, может ли быть использован генератор как компенсирующее устройство,

не рассматривался. Например, неизвестно, каков должен быть реактанс генератора в этом случае, неизвестна величина реактанса генератора, которая должна быть введена в схему замещения электропередачи при различных случаях регулирования напряжения. Так как угол сдвига между E и U_n генератора зависит от нагрузки, то и эффективность генератора как компенсирующего устройства зависит от нагрузки и, следовательно, режимов работы самой линии с концевыми компенсирующими устройствами. Вследствие этого возможность использования генераторов как компенсирующего устройства должна решаться как комплексная задача.

Далее, случай настройки только при помощи одних индуктивных устройств по концам линии характеризуется малой пропускной способностью, плохим использованием изоляции линии и поэтому имеет малую практическую ценность. Это заставляет применять дополнительно к продольно-индуктивной компенсации поперечно-емкостную компенсацию.

Как указывалось выше, мощность статических конденсаторов или синхронных компенсаторов при полной настройке линии в режим полуволны как по току, так и по напряжению будет довольно большой. Но, применяя неполную настройку по току, можно уменьшить потребную мощность статических конденсаторов примерно вдвое. Размещение элементов поперечно-емкостного компенсирующего устройства вдоль линии должно быть выяснено с точки зрения приемлемости режима напряжения и максимального к. п. д. Без детального рассмотрения всех этих вопросов нельзя говорить об использовании синхронного генератора как компенсирующего устройства. Прежде чем приступить к изложению способа настройки с идеей использования синхронного генератора в качестве компенсирующего устройства (имеется в виду эквивалентный генератор станции), необходимо уточнить вопрос о том, что будет браться в качестве реактанса генератора.

Известно что синхронный реактанс представляет собой отношение напряжения при холостом ходе к силе тока при трехфазном коротком замыкании при одних и тех же ампер-витках возбуждения. Если машина будет ненасыщенной, то данное отношение будет постоянно при всех стационарных режимах работы генератора. Поэтому для исследования стационарных режимов может быть взят синхронный реактанс. Цель же настройки — обеспечить устойчивую работу электропередачи и главным образом статическую устойчивость. Если бы электропередача настраивалась в режим точной полуволны (сдвиг фазы между E и U_n равнялся точно 180°), то E было бы постоянно при любой передаваемой мощности и при любом малом ее изменении. Напряжение же на выводах генератора (как промежуточной точки электропередачи, настроенной на полуволну) изменялось бы в определенных пределах. При анализе статической устойчивости генератор в этом случае замещается синхронным реактансом. Но такая настройка в режим точной полуволны с изменяющимся напряжением на шинах станции не имеет практического значения. Работа настроенной электропередачи должна проходить с углом между E и U_n , большим 180° , по соображениям динамической устойчивости и явлений, связанных с уходом волн (изменение частоты, параметров линии). Необходимо также стремиться к обеспечению постоянства напряжения на шинах станции. Это в условиях настройки больше 180° (примерно — $\pi + \frac{\pi}{6}$) требует регулировки E при изменении передаваемой мощности. В зависимости от способов такого регулирования, как известно [5], в расчетах статической устойчивости электропередачи вводится синхронный реактанс, если регулирование будет проводиться очень медленно (ручное регулирование); переходный реактанс, если применяются электронные регуляторы напряжения или схемы компаундирования, или, наконец, реактанс генератора вообще выбрасывается при

регулировании по производным регулируемых параметров (сильное регулирование).

Два последних метода регулирования порождены всецело статической устойчивостью и имеют целью увеличить предел передаваемой мощности электропередачи и, следовательно, запас статической устойчивости. В электропередачах, настроенных в режим, несколько больший полуволны, предел передаваемой мощности получается настолько высоким [9], что пропускная способность определяется не статической устойчивостью, а режимом напряжений в линии. Поэтому применять эти методы регулирования на электропередачах, настроенных на полуволну, не следует. Требованиям регулирования напряжения при стационарных режимах работы системы (имеется в виду регулирование напряжения в определенных точках электропередачи при изменении передаваемой мощности, которое может проводиться с некоторым запаздыванием) может удовлетворить даже ручное регулирование. Это дает право вводить в схему электропередачи синхронный реактанс, что и будет сделано в дальнейшем. От величины синхронного реактанта зависит сдвиг фазы E и U_c , т. е. чем больше x_d , тем больше ψ_c . Поэтому первым вопросом, который необходимо рассмотреть, будет вопрос о возможном пределе увеличения реактанта генератора.

Предел увеличения x_d генератора

По сути дела этот вопрос нужно было бы детально рассмотреть с трех сторон: а) со стороны конструктивных возможностей выполнения генераторов с увеличенным реактивным сопротивлением; б) со стороны приемлемости режимов работы генераторов: устойчивости, коротких замыканий, регулирования напряжения, самовозбуждения и т. д.; в) а также со стороны экономики. Не имея возможности рассматривать первую и третью стороны, можно отметить только, что в литературе [8, 10] имеются высказывания о том, что реактивность трансформаторов можно довести сравнительно просто до $e_k [\%] = 30\%$, а x_d синхронных генераторов может быть значительно увеличен, причем стоимость таких генераторов будет даже ниже обычных, не говоря уже о генераторах с уменьшенным реактивным сопротивлением. В практике имеются синхронные машины, выполненные с $x_d = 2 \div 2,5$. Увеличение реактанта происходит в основном за счет уменьшения воздушного зазора.

На второй стороне вопроса необходимо остановиться несколько подробнее. Известно, что от x_d зависит устойчивость самого генератора. При очень большой величине x_d перегрузочная способность синхронного генератора может оказаться очень малой, и сам генератор как элемент электропередачи будет неустойчив. Поэтому желательно выяснить ту величину синхронного реактанта, выше которой идти не следует. Электромагнитная мощность генератора (явнополюсного) при пренебрежении активным сопротивлением обмотки статора равна электрической мощности и выражается формулой

$$P_\psi = P_\varphi = m \left[\frac{u_n^2 \cos \theta \sin \theta}{x_q} + \frac{u_n e_0 \sin \theta}{(x_d - x_q)} - \frac{u_n^2}{x_d} \cos \theta \sin \theta - \frac{u_n e_0 \sin \theta \cdot x_q}{x_d (x_d - x_q)} \right], \quad (1)$$

где m — число фаз:

u_n — номинальное напряжение.

Таким образом, электрическая мощность генератора

$$P_\varphi = f(u_n, \theta, x_d, x_q, e_0) \quad (2)$$

есть функция многих величин. Исследовать данную функцию на экстремум можно методом неопределенных множителей Лагранжа.

В данном случае, зная дополнительные зависимости между переменными $x_d = 1,5 x_q$, а также задаваясь приемлемым отношением $\frac{e_0}{u_n}$ и считая его неизменяющимся, это можно сделать проще, беря частные производные по различным параметрам. Оказывается, что если задаться допустимой перегрузкой в 20%, то синхронный реактанс генератора может быть увеличен до $x_d = 2$ (рис. 1).

Вызывают опасение режим внезапной разгрузки такого генератора и режим работы на емкостную нагрузку. При внезапной разгрузке повышение напряжения на его выводах, определяемое как

$$\Delta u [\%] = \frac{e_0 - u}{u} 100,$$

будет значительным. Поэтому на генераторах должно быть предусмотрено быстрействующее гашение поля. Емкостная нагрузка при существующих длинах линий получается в режиме холостого хода электропередачи или в режиме работы с $P < P_{нат}$. В электропередачах, настроенных на полуволну, этого опасаться не следует. В самом деле, эквивалентные постоянные электропередачи, настроенной на полуволну, будут:

$A = D = -1$, $B = C = 0$. Волновое сопротивление ($z_c = V \frac{L}{C} = V \frac{0}{0}$) равно неопределенности, т. е. любая мощность будет натуральной, что обеспечивает совпадение векторов напряжения и тока по фазе по концам электропередачи. С учетом потерь входное сопротивление будет активным. В случае неполной настройки по току, когда сдвиг фазы токов по концам меньше 180° , входное сопротивление будет комплексной величиной с индуктивной составляющей. Это практически исключает работу генератора на емкостную нагрузку. Наиболее благоприятным для такого генератора является режим короткого замыкания. Установившийся ток короткого замыкания

$$I_{кз*} = \frac{E_{0*}}{x_d}, \quad (3)$$

т. е. с увеличением x_d будет уменьшаться, хотя и не обратно пропорционально x_d , так как увеличивается E_{0*} .

Таким образом, по режимам работы генератора синхронный реактанс может быть взят равным $x_d = 2$. Реактивность трансформаторов принимаем равной $e_k [0/0] = 30\%$.

Выбор схемы электропередачи

Будем считать, что в начале линии роль компенсирующего устройства будут выполнять только генераторы и трансформаторы. В конце линии (если приемная система считается шинами бесконечной мощности) будут только трансформаторы. Величина реактивности их будет недостаточной для настройки. Поэтому необходимо включение дополнительной реактивности в конце линии. Величину этой реактивности нельзя определить без знания места включения и величины элементов поперечной емкостной компенсации. Как уже указывалось, место включения и величина элементов поперечной емкостной компенсации опреде-

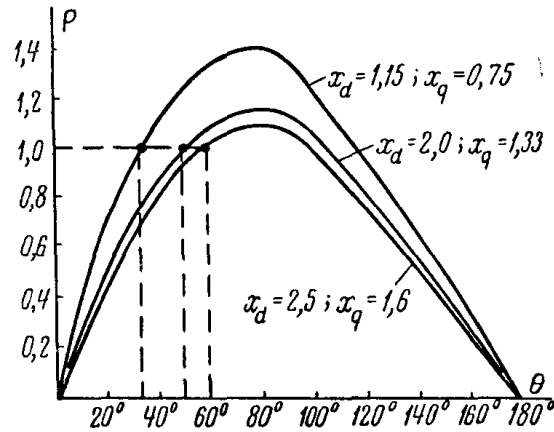


Рис. 1.

ляется не только статической устойчивостью, но и условиями обеспечения приемлемых режимов работы электропередачи (режим напряжений, к. п. д., коэффициент мощности генератора и т. д.). Рассмотрение режимов работы электропередачи с размещенными в различных точках линии элементами поперечной компенсации показывает, что включение элементов поперечной компенсации в промежуточных точках линий длиной 1 500—2 000 км нежелательно главным образом с точки

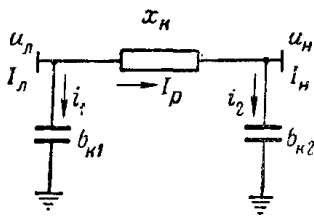


Рис. 2.

зрения режима напряжений в линии и к. п. д. Поэтому считаем, что элементы поперечной компенсации включаются только по концам линии. Если бы линия настраивалась в режим полуволны без учета реактивности генератора, то требовалось бы обязательное включение емкостной проводимости в начале линии. Но в случае использования в качестве элемента продольной индуктивной компенсации реактивности генератора от включения емкостной проводимости в начале линии можно отказаться.

В этих условиях основная задача заключается в том, что требуется выбрать такую схему соединения компенсирующего устройства в конце линии и определить величины ее элементов (продольной реактивности и поперечной емкости), чтобы обеспечивались приемлемые режимы работы электропередачи. Рассматривая возможные варианты выполнения схемы концевого компенсирующего устройства и получающиеся режимы работы электропередачи, была выбрана его схема, указанная на рис. 2. В качестве поперечного емкостного элемента b_{k1} могут быть взяты статические конденсаторы, включаемые на высокой стороне, а в качестве b_{k2} —как статические конденсаторы, так и синхронные компенсаторы. В качестве b_{k2} также с успехом могут быть использованы синхронные компенсаторы приемной системы, обеспечивая на шинах электропередачи небольшой упреждающий $\cos \varphi$.

Определить величины отдельных элементов концевого компенсирующего устройства можно, исходя из следующих условий: а) $\cos \varphi = 1$ в конце линии при передаче натуральной мощности линии; б) напряжение в конце линии при этом равнялось бы по модулю напряжению приемных шин, т. е. $|u_n| = |u_n|$; в) сдвиг векторов напряжений в компенсирующем устройстве был бы равен любой величине, необходимой по условиям настройки, например, $\theta_{кн}$. Не имея возможности аналитически вычислить $\theta_{кн}$, его приходится просто подбирать. Выберем его, например, так. При передаче натуральной мощности линии $\theta_c + \theta_m$ от правого конца равняется примерно 70° , а в линии $\theta_c = 90^\circ$ ($l = 1\,500$ км). При постройке с углом $\theta_c = 210^\circ$ на конечное компенсирующее устройство приходится около 50° , т. е. $\theta_{кн} = 50^\circ$. Пренебрегая потерями и решая уравнения, связывающие напряжение и ток на входе и выходе компенсирующего устройства, относительно x_k , b_{k1} и b_{k2} , получим:

$$x_k = \frac{u_n \sin \theta_{кн}}{I_n \cos \varphi_n}; \quad (4)$$

$$b_{k1} = \frac{I_n \cos \varphi_n \operatorname{tg} \frac{\theta_{кн}}{2}}{\cos \frac{\theta_{кн}}{2} u_n}; \quad (5)$$

$$b_{k2} = \frac{I_n (\sin \varphi_n + \cos \varphi_n \operatorname{tg} \frac{\theta_{кн}}{2})}{u_n}. \quad (6)$$

Эти зависимости представлены на рис. 3. Нетрудно видеть, что потребная величина элементов концевого компенсирующего устройства зависит от передаваемой мощности, если стараться при всех нагрузках соблюдать условия: $|u_n| = |u_n|$, $\cos \varphi_n = 1$ и $u_n^* u_n = \theta_{ny}$. Но в этом нет никакой необходимости. Наоборот, если напряжение в конце линии при изменении нагрузки будет поддерживаться постоянным, то будет изменяться напряжение в начале линии, т. е. на выводах генератора, и получится режим работы генератора с изменяющимся напряжением и с фиксированным углом θ_2 .

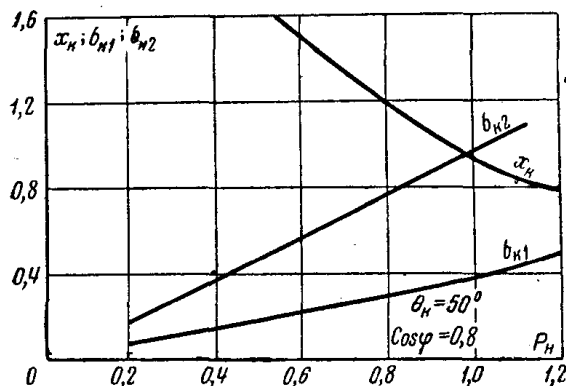


Рис. 3.

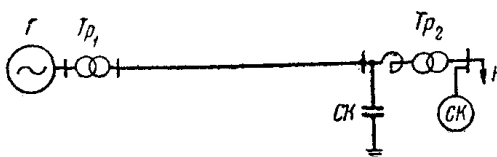


Рис. 4.

ной и поперечной осях ротора [11]. Эффективность генератора с точки зрения статической устойчивости здесь может быть значительно повышена. Отрицательной стороной такого режима работы является то, что работа происходит с изменяющимся напряжением на шинах станции. Для того чтобы напряжение на шинах станции было постоянно, необходимо обеспечить условия изменения напряжения в конце линии (при $l = 1500 - 2000 \text{ км}$). При таком режиме с уменьшением передаваемой мощности уменьшается угол θ_2 . Чтобы скомпенсировать это уменьшение, необходимо нагружать линию упреждающей реактивной мощностью в конце. Для этого надо величины поперечных элементов концевого компенсирующего устройства при малых нагрузках брать больше, чем это обуславливается зависимостями (4) — (6). Считаем, что x_k и b_{k1} не регулируются, а b_{k2} регулируется в зависимости от передаваемой мощности. Беря их величины, равные величинам, требующимся в условиях передачи натуральной мощности линии, получим следующую схему электропередачи (рис. 4).

Проведены расчеты нормального режима работы электропередачи как в случае постоянной величины реактивной мощности, выдаваемой синхронными компенсаторами, так и в случае изменяющейся величины в зависимости от передаваемой мощности, как это дается зависимостью (6). Характеристики работы концевого компенсирующего устройства, режима распределения напряжения, характеристики отправного конца электропередачи для этих двух случаев показаны соответственно на рис. 5 — 10.

Режим работы электропередачи в случае постоянной величины реактивной мощности, выдаваемой синхронными компенсаторами, мало отличается от режима работы электропередачи с короткой линией. Напряжение на шинах станции изменяется очень мало. Небольшим регулированием, осуществляемым в конце линии синхронными компенсаторами, повышение напряжения при $P < 0,4 P_{\text{нат}}$ можно устранить. Благоприятным является и режим распределения напряжения вдоль линии: при передаче мощности $P = P_{\text{нат}}$ ни в одной точке линии оно не превышает 5% номинального. Суммарный сдвиг фазы э. д. с. отправной станции и напряжения шин приемника, равный при холостом ходе 183° , с ростом передаваемой мощности увеличивается до 204° .

Работа передающей станции во втором случае происходит в условиях изменяющегося напряжения. Электропередача не обладает статической устойчивостью при передаче мощности ниже $0,5P_{\text{нат}}$, что требует большей мощности синхронных компенсаторов, чем это дается

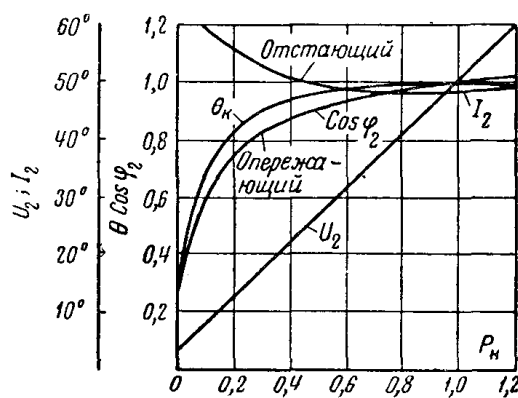


Рис. 5.

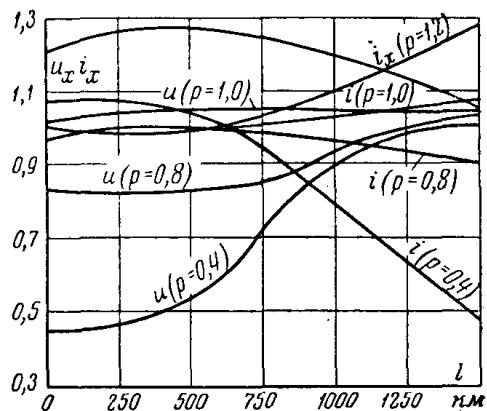


Рис. 6.

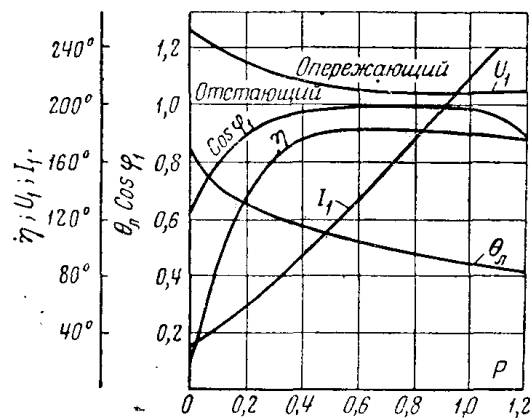


Рис. 7.

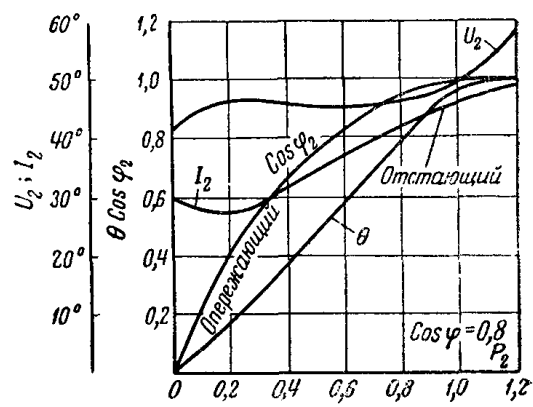


Рис. 8.

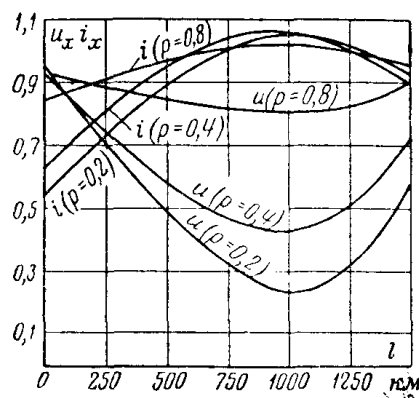


Рис. 9.

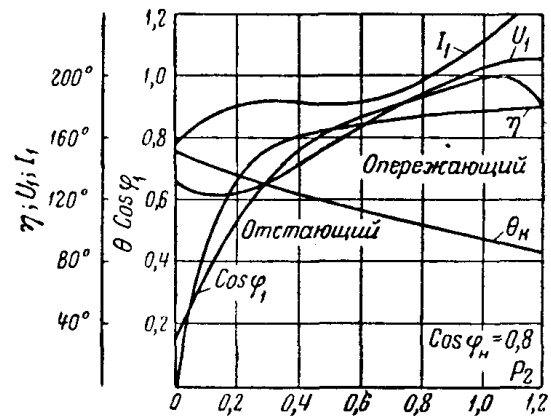


Рис. 10.

зависимостью (6). Таким образом, по условиям обеспечения статической устойчивости регулировки поперечного элемента $b_{\kappa 2}$ конечного компенсирующего устройства не требуется. Но, с другой стороны, его величина определяется также и $\cos \varphi_{\kappa}$, что может потребовать регулировки в условиях меняющегося $\cos \varphi_{\kappa}$.

Выводы

1. Схемы полной настройки линий в режим полуволны требуют значительной мощности компенсирующих устройств (при $l = 1500$ км $Q_p = 2$; $Q_{ск} = 2$).

2. Мощность компенсирующих устройств применением в качестве компенсирующих устройств генераторов и трансформаторов, а также применением случая неполной настройки может быть значительно сокращена.

3. Синхронный реактанс генератора (x_d) может быть увеличен до $x_d = 2$, а реактивность трансформаторов до $e_k [\%] = 30\%$.

4. Выбранная схема электропередачи, настроена в режим, несколько больший полуволны, статически устойчива и наиболее экономична по сравнению с другими возможными схемами настройки. Для линии длиной 1500 км потребная мощность компенсирующих устройств будет равна: $Q_p = 0,5$; $Q_{ск} = 1$ (при $\cos \varphi_k = 1$).

5. Пропускная способность электропередачи определяется не статической устойчивостью, а режимом напряжений в линии. При 5% повышении напряжения сверх номинального, передаваемая мощность равна натуральной мощности линии.

6. Допуская подъем напряжения (усилением изоляции в определенных местах линии), пропускную способность электропередачи можно значительно увеличить.

7. Коэффициент полезного действия предлагаемой электропередачи будет выше, чем электропередач, содержащих полностью настроенные линии, так как при нагрузке электропередачи мощностью, близкой к натуральной мощности линии, отсутствует передача реактивной мощности по линии. Кроме того, использованием в качестве компенсирующих устройств генераторов и трансформаторов вместе с неполной настройкой значительно сокращены величина суммарной мощности компенсирующих устройств и величина теряемой в них энергии.

Литература

1. Поспелов Г. Е., Основные технические и экономические вопросы применения последовательной статической компенсации в системах передачи энергии на большие расстояния, АН УзССР, Ташкент, 1950.

2. Продольная емкостная компенсация линий электропередачи (обзор), «Электричество», 1952, № 8.

3. Веников В. А., Передача электроэнергии переменным током на большие расстояния, «Электричество», 1954, № 5.

4. Азарьев Д. И., Соколов Н. Н., Веников В. А., Дальние электропередачи с промежуточными синхронными компенсаторами, «Электричество», 1955, № 4.

5. Жданов П. С., Устойчивость электрических систем, Госэнергоиздат, 1948.

6. Груздев И. А. и Левинштейн М. Л., Режимы работы дальних электропередач с промежуточными синхронными компенсаторами, Межвузовская научно-техническая конференция по дальним электропередачам, Тезисы докладов МВО СССР, ЛПИ, Ленинград, 1956.

7. Розовский Ю. А. и Андреюк В. А., Подпорные компенсированные синхронные компенсаторы дальних электропередач, Межвузовская научно-техническая конференция по дальним электропередачам, Тезисы докладов МВО СССР, ЛПИ, Ленинград, 1956.

8. Чернышева Е., Пропускная способность линии передачи с трансформаторами по концам и настройка линий на полволны, «Электричество», 1933, № 6--7.

9. Вульф А. А., Проблема передачи энергии на сверхдальние расстояния по компенсированным линиям, Госэнергоиздат, 1941.

10. Бергер А. Я., Синхронные машины, ГОНТИ, 1938.

11. Ботвинник М. М., Регулирование возбуждения синхронной машины в продольной и поперечной осях ротора, Межвузовская научно-техническая конференция по дальним электропередачам. Тезисы докладов МВО СССР, ЛПИ, Ленинград, 1956.