

ПРОПОРЦИОНАЛЬНОЕ РЕГУЛИРОВАНИЕ ВОЗБУЖДЕНИЯ ГЕНЕРАТОРОВ ПРОМЕЖУТОЧНЫХ СИСТЕМ ПО РЕЖИМНЫМ ПАРАМЕТРАМ ДАЛЬНИХ ПЕРЕДАЧ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА

Р. И. БОРИСОВ, Ю. В. ХРУЩЕВ

(Представлена научным семинаром кафедры электрических систем и сетей)

Промежуточные энергосистемы (ПЭС), расположенные по трассе дальних ЛЭП переменного тока, могут выступать в качестве основных или дополнительных регулируемых источников реактивной мощности (ИРМ). Важным условием повышения эффективности этих функций является правильный выбор законов регулирования по отклонениям режимных параметров, или основного регулирования, генераторов ПЭС и определение долевого их участия в регулировании напряжений на линии в составе других ИРМ.

Рассматриваются общие закономерности и ограничения, обуславливающие решение этих вопросов. В основу методики положено замещение всех элементов, подключенных в промежуточных точках ЛЭП, статическими характеристиками реакции на внешние возмущения.

Существующие рекомендации по выбору законов основного регулирования промежуточных ИРМ касаются синхронных и статических компенсаторов [1, 2]. Они сводятся к тому, что в качестве параметров регулирования по отклонению должны выбираться напряжения на выводах ИРМ или в узле подключения трансформатора связи к линии. Мнения этих авторов относительно эффективности регулирования по другим режимным параметрам расходятся.

Известно, что действие основного регулирования направлено на поддержание напряжений и повышение пределов передачи мощности по условиям апериодической устойчивости. В работах [3, 4] показано, что соответствующим подбором законов регулирования ИРМ в промежуточных точках ЛЭП можно добиться неограниченного повышения нагрузки линии с сохранением апериодической устойчивости при достаточной мощности ИРМ. При этом во всех точках линии с равномерно распределенной компенсацией может быть достигнуто равенство напряжений. Максимальная мощность линий с конечным числом промежуточных ИРМ ограничивается обеспеченностью реактивной мощности, перенапряжениями и условиями колебательной неустойчивости.

Очевидно, что из множества возможных зависимостей $P(\delta, U)$ и, соответственно, множества законов основного регулирования генераторов ПЭС следует осуществлять такие, которые удовлетворяли бы требованиям экономического распределения напряжений по линии, устойчивости работы электропередачи и целого ряда условий и ограничений, в том числе и внутри ПЭС.

Требования к распределению напряжений вдоль компенсированных длинных линий по условиям максимального к. п. д. изложены в [5, 6].

Если ввести требование максимального увеличения статического предела мощности по линии при ограниченных ресурсах реактивных мощностей ПЭС, то жесткое регулирование напряжений в узлах их присоединения может оказаться не наилучшим решением. Реализацией определенных законов основного регулирования генераторов ПЭС можно добиться большего возрастания транзитной мощности при отсутствии самораскачивания. Однако вместе с мощностью будут возрастать напряжения в узлах примыкания ПЭС. Так, сбалансированная по активной и реактивной мощностям ПЭС, примыкающая к середине идеализированной линии $\lambda = 120^\circ$ при постоянных напряжениях по концам, позволяет осуществить передачу натуральной мощности по линии с запасом 11% по условиям статической устойчивости, если напряжение в узле примыкания поддерживается постоянным ($U=1=\text{пост.}$). Величина регулировочного потока реактивной мощности от ПЭС, обеспечивающая этот запас, составляет $0,5 P$ нат. Такой же регулировочный поток дает возможность увеличить запас до 32,5%, если поддерживать угол по линии постоянным ($\delta=\lambda=\text{пост.}$). При этом зависимость напряжения в узле примыкания от передаваемой по линии мощности аналогична полуволновому режиму линии до полного расхода регулировочного потока реактивной мощности (рис. 1).

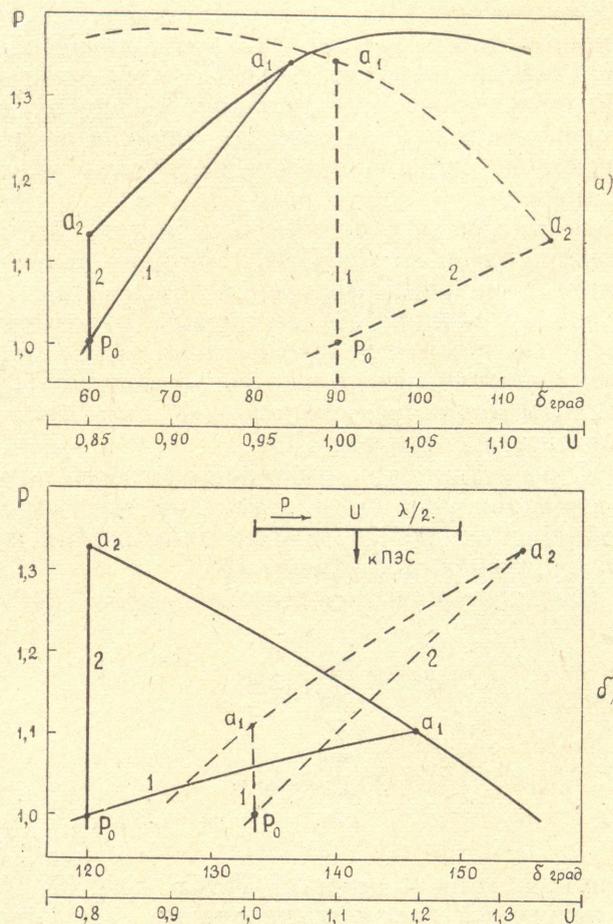


Рис. 1. Зависимости $P(\delta)$ и $P(U)$ (показано штрихом) при $Q_{\text{пэс макс.}} = 0,5 P$ нат. а) $\lambda = 60^\circ$; 1.— $U=1=\text{пост.}$, 2.— $\delta=\lambda=\text{пост.}$; б) то же при $\lambda = 120^\circ$

По мере ослабления жесткости поддержания угла передачи запас статической устойчивости уменьшается. В линиях с волновой длиной до 90° запас статической устойчивости одинаков при выполнении обоих условий, если величина регулировочного потока реактивной мощности ПЭС ограничена. Однако при выполнении условия $\delta = \lambda = \text{пост.}$ регулировочный поток расходуется полностью при меньших значениях передаваемой по линии мощности, чем при условии $U = 1 = \text{пост.}$ (точки a_1 и a_2 на рис. 1, а).

Дальнейшее увеличение транзита мощности по линии до предела происходит за счет возрастания угла при постоянной величине реактивной мощности ПЭС. В таблице представлены граничные значения волновых длин ЛЭП, при которых полный расход регулировочного потока ПЭС соответствует одинаковым значениям активной мощности линии. Последние для граничных волновых длин являются одновременно аperiodическими пределами передаваемой мощности.

Таблица 1

Максимальная величина регулировочного потока от ПЭС	0,0	0,5	1,0	1,5	2,0
Граничная волновая длина линии	90,0	88,5	86,0	83,0	80,0
Аperiodический предел передачи мощности	1,00	1,22	1,34	1,46	1,54

В связи с этими особенностями может оказаться целесообразным введение комбинированного (ступенчатого и непрерывного) регулирования потока реактивной мощности от ПЭС. В пределах эксплуатационных ограничений ступенчатое регулирование будет осуществлять экономическое распределение напряжения по линии, а непрерывное — действовать на повышение запасов статической устойчивости в пределах технических ограничений.

Все режимные параметры, по которым может осуществляться основное регулирование генераторов ПЭС, условно разделяются на две группы: внутренние и внешние. Внутренние параметры (модули напряжений и токов, потоки мощностей, внутренние относительные углы, а также модуль напряжения в узле примыкания ПЭС) представляют собой совокупность, относящуюся только к элементам ПЭС. Остальные режимные параметры являются внешними. К ним же относятся фазы напряжений, токов и э. д. с. внутри ПЭС.

Реакцию ПЭС на стационарное приращение того или иного режимного параметра передачи удобно характеризовать отклонениями активной и реактивной мощностей ПЭС в узле примыкания и обобщенными коэффициентами влияния или крутизны [8].

Для схемы (рис. 2) уравнения регулирования ПЭС можно записать так:

$$\Delta P_4 = \sum_{\Pi} \rho_{\Pi} \Delta \Pi; \quad (1)$$

$$\Delta Q_4 = \sum_{\Pi} q_{\Pi} \Delta \Pi,$$

где

$\Delta P_4, \Delta Q_4$ — приращения мощностей ПЭС;
 Π — режимный параметр передачи;
 ρ_{Π}, q_{Π} — коэффициенты крутизны активной и реактивной мощностей ПЭС по соответствующему параметру Π .

Коэффициенты ρ_{Π}, q_{Π} ($\Pi \neq U_4$) обусловлены основным регулированием генераторов ПЭС по внешним параметрам и, если последнего нет,

равны нулю. Коэффициенты ρ_{u4} , q_{u4} при любых законах регулирования отличаются от нуля, если не поставлено специальное условие, приводящее их к нулю.

Построение функций $P(\delta_1)$ и $P(U_4)$ путем последовательного утяжеления режима передачи при разных законах регулирования возбуждения генераторов ПЭС требует большой вычислительной работы даже для простейшей схемы, показанной на рис. 2. Можно ограничиться выяснением направлений и значений линейных приращений этих функций, которые определяются знаком и величиной полных производных исходного режима $\frac{dP}{d\delta_1}$ и $\frac{dP}{dU_4}$. При этом одновременно контролируется аperiodическая устойчивость исходного режима по знаку свободного члена характеристического уравнения.

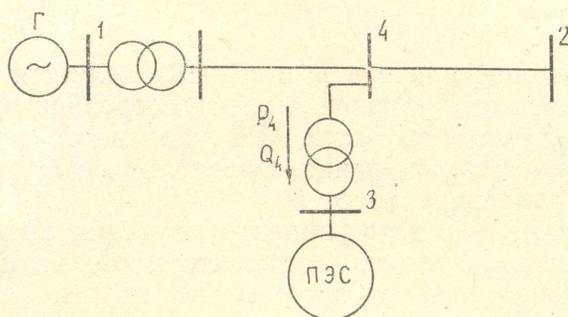


Рис. 2

Для определения производных $\frac{dP}{d\delta_1}$ и $\frac{dP}{dU_4}$ приложим небольшое стационарное возмущение ΔP к валу ротора удаленного генератора. В силу равенства механического и электромагнитного моментов на валу генератора в стационарных режимах приращение ΔP можно выразить через режимные параметры передачи следующим образом:

$$\frac{\partial P_{14}}{\partial \delta_1} \Delta \delta_1 + \frac{\partial P_{14}}{\partial \delta_4} \Delta \delta_4 + \frac{\partial P}{\partial U_4} \Delta U_4 = \Delta P. \quad (2)$$

Уравнения балансов активной и реактивной мощностей в узле присоединения ПЭС после линеаризации приобретают следующий вид:

$$\Delta P_{41} + \Delta P_{42} + \Delta P_4 = 0, \quad (3)$$

$$\Delta Q_{41} + \Delta Q_{42} + \Delta Q_4 = 0. \quad (4)$$

Выразим приращения мощностей в уравнениях (3), (4) через те же параметры, что и в (2). В результате получим:

$$\begin{aligned} & \left(\frac{\partial P_{41}}{\partial \delta_1} + \sum_{\Pi} \rho_{\Pi} \frac{\partial \Pi}{\partial \delta_1} \right) \Delta \delta_1 + \left(\frac{\partial P_{41}}{\partial \delta_4} + \frac{\partial P_{42}}{\partial \delta_4} + \sum_{\Pi} \rho_{\Pi} \frac{\partial \Pi}{\partial \delta_4} \right) \Delta \delta_4 + \\ & + \left(\frac{\partial P_{41}}{\partial U_4} + \frac{\partial P_{42}}{\partial U_4} + \sum_{\Pi} \rho_{\Pi} \frac{\partial \Pi}{\partial U_4} \right) \Delta U_4 = 0, \end{aligned} \quad (5)$$

$$\begin{aligned} & \left(\frac{\partial Q_{41}}{\partial \delta_1} + \sum_{\Pi} q_{\Pi} \frac{\partial \Pi}{\partial \delta_1} \right) \Delta \delta_1 + \left(\frac{\partial Q_{41}}{\partial \delta_4} + \frac{\partial Q_{42}}{\partial \delta_4} + \sum_{\Pi} q_{\Pi} \frac{\partial \Pi}{\partial \delta_4} \right) \Delta \delta_4 + \\ & + \left(\frac{\partial Q_{41}}{\partial U_4} + \frac{\partial Q_{42}}{\partial U_4} + \sum_{\Pi} q_{\Pi} \frac{\partial \Pi}{\partial U_4} \right) \Delta U_4 = 0. \end{aligned} \quad (6)$$

Правая часть системы уравнений (2, 5, 6) не равна нулю, так как приложено возмущение ΔP . Решив эту систему относительно $\Delta\delta_1$ и ΔU_4 , получим:

$$\Delta\delta_1 = \frac{D'}{D} \Delta P, \quad (7)$$

$$\Delta U_4 = \frac{D''}{D} \Delta P. \quad (8)$$

Переходя к бесконечно малым приращениям, преобразуем (7) и (8) к следующему виду:

$$\frac{dP}{d\delta_1} = \frac{D'}{D}, \quad (9)$$

$$\frac{dP}{dU_4} = \frac{D''}{D}. \quad (10)$$

Очевидно, что определитель D в (7—10) является свободным членом характеристического уравнения электропередачи при ее работе на шины бесконечной мощности, если АРВ удаленного генератора отсутствует или учитывается упрощенно. Определители D' и D'' являются алгебраическими дополнениями от D .

Следует отметить, что коэффициенты крутизны активной мощности ПЭС ρ_n обусловлены статическими характеристиками активной мощности нагрузок и, как правило, значительно меньше соответствующих коэффициентов q_n .

$$\rho_n \ll q_n.$$

Рассмотрим влияние законов основного регулирования генераторов ПЭС по внутренним и внешним (P_{41} , δ_1 , δ_4) режимным параметрам на аperiodическую устойчивость электропередачи и на взаимосвязь между приращениями передаваемой по линии мощности ΔP , угла $\Delta\delta_1$ и напряжения ΔU_4 (рис. 2).

Принимая $\Delta P_4 = \rho_n = 0$, преобразуем производные (9, 10) к следующему виду:

$$\frac{dP}{d\delta_1} = \frac{D}{D'} = \frac{D_0 + q_{u4}D_1 + q_{\delta_1}D_2 + q_{\delta_4}D_3 + q_{P41}D_4}{D'_0 + q_{u4}D'_1 + q_{\delta_1}D'_2 + q_{\delta_4}D'_3 + q_{P41}D'_4}, \quad (11)$$

$$\frac{dP}{dU_4} = \frac{D}{D''} = \frac{D_0 + q_{u4}D_1 + q_{\delta_1}D_2 + q_{\delta_4}D_3 + q_{P41}D_4}{D''_0 + q_{u4}D''_1 + q_{\delta_1}D''_2 + q_{\delta_4}D''_3 + q_{P41}D''_4}, \quad (12)$$

где

D_i, D'_i, D''_i ($i = 0, 1, 2, 3, 4$) — коэффициенты исходного режима.

При отсутствии основного регулирования генераторов ПЭС по внешним параметрам выражения (11, 12) приобретают более простой вид:

$$\frac{dP}{d\delta_1} = \frac{D}{D'} = \frac{D_0 + q_{u4}D_1}{D'_0 + q_{u4}D'_1}, \quad (13)$$

$$\frac{dP}{dU_4} = \frac{D}{D''} = \frac{D_0 + q_{u4}D_1}{D''_0 + q_{u4}D''_1}, \quad (14)$$

Поскольку $D''_1 = 0$, производная $\frac{dP}{dU_4}$ линейно зависит от q_{u4}

$$\frac{dP}{dU_4} = \frac{1}{D''_0} (D_0 + q_{u4}D_1). \quad (15)$$

Если коэффициент крутизны реактивной мощности ПЭС по напряжению стремится к предельным значениям ($\pm \infty$), то будем иметь

$$\left. \frac{dP}{d\delta_1} \right|_{qU_4 \rightarrow \mp \infty} = \frac{D_1}{D_1'} \quad (16)$$

В зависимости от знаков коэффициентов D_1 и D_0'' , производная $\frac{dP}{dU_4}$ стремится либо к ($\mp \infty$), либо к ($\pm \infty$). В обоих случаях условие $qU_4 \rightarrow \mp \infty$ соответствует результату $U_4 \rightarrow \text{пост.}$

Как показали выполненные расчеты, отношение $\frac{D_1}{D_1'}$ равно частной производной $\frac{\partial P}{\partial \delta}$ наиболее слабого участка ЛЭП. Если эквивалентная волновая длина хотя бы одного участка находится во второй четверти ($90^\circ < \lambda_3 < 180^\circ$), то во всех режимах

$$\frac{D_1}{D_1'} < 0; D_1 < 0; D_1' > 0,$$

что служит признаком неустойчивости.

Из (16) следует, что критерий статической устойчивости вида $\frac{dP}{d\delta_1}$ может принимать положительные значения и при положительных, и при отрицательных коэффициентах крутизны qU_4 . В условиях, когда на каждом из участков $\lambda_3 < 90^\circ$, имеется лишь небольшой отрезок оси qU_4 , где свободный член D и алгебраическое дополнение D' не совпадают по знаку и $\frac{dP}{d\delta_1} < 0$.

Однако, как видно из (13) и (14), свободный член характеристического уравнения положителен только при

$$qU_4 \cdot D_1 > -D_0. \quad (17)$$

Диапазон значений qU_4 , при которых $\frac{dP}{d\delta_1} > 0$, но $D < 0$, расположен на отрицательной полуоси qU_4 во всех режимах от $P=0$ до предельной загрузки наиболее слабого участка, если с помощью ступенчатого регулирования напряжение поддерживается на уровне номинального. Специальная проверка характеристического уравнения показала, что в этом диапазоне значений qU_4 электропередача может работать устойчиво только при безынерционном промежуточном присоединении. В частности, если вместо ПЭС подключена батарея статических конденсаторов, настраивающая электропередачу на полуволновой режим и обладающая, как известно, отрицательным коэффициентом крутизны, то вместе со свободным членом все коэффициенты характеристического уравнения приобретают отрицательный знак. В зависимости от режима передачи и настройки регуляторов удаленной станции корни такого уравнения могут не иметь положительных вещественных частей. При подключении инерционного присоединения старший коэффициент характеристического уравнения не зависит от коэффициентов крутизны и, если он имеет положительный знак, то условие $D < 0$ служит признаком неустойчивости даже при $\frac{dP}{d\delta_1} > 0$.

Нетрудно проверить, что при условии $D < 0$ приращения активной мощности ΔP и напряжения ΔU_4 совпадают по знаку. Поэтому с помощью инерционного присоединения с основным регулированием только по внутренним параметрам невозможно получить устойчиво работающую электропередачу, у которой с увеличением передаваемой активной мощности возрастало бы напряжение в узле примыкания и, следовательно,

невозможно реализовать такие решения, как настройка на полуволну, компенсация режима и им подобные. Этот вывод справедлив для передач с одним промежуточным присоединением, у которых волновая длина каждого участка не превышает 90° и согласуется с аналогичным выводом в [7].

Таким образом, из условий статической устойчивости при основном регулировании генераторов по внутренним параметрам от одной ПЭС можно требовать только увеличения положительных значений коэффициента крутизны q_{U4} , что равносильно требованию наиболее жесткого регулирования напряжения в узле примыкания.

Следует отметить, что возможности ПЭС по увеличению коэффициента крутизны q_{U4} весьма ограничены. Если не проводить специальных мероприятий (например, компенсацию сопротивления связи между ПЭС и ЛЭП), то «приблизить» точку постоянного напряжения внутри ПЭС к узлу примыкания можно только с помощью АРВ генераторов. Однако с «удалением» точки постоянного напряжения от выводов выделенных для этой цели генераторов увеличивается зависимость генераторных напряжений от режима передачи, которая в основном и ограничивает возможности жесткого регулирования в узле примыкания. Так, изменение потока реактивной мощности присоединения в обоих направлениях в пределах номинальной мощности трансформатора связи обеспечивается за счет отклонений напряжения на выводах со стороны ПЭС в пределах $\Delta U_3 = \pm u_k \%$, если при этом $U_4 = \text{пост.} = 1$, $P_4 = 0$ (рис. 2).

Участие ПЭС в регулировании напряжения на линии существенно увеличивается при введении РПН у трансформатора связи, позволяющего дискретно изменять поток реактивной мощности. Если допустить зависимость напряжений на выводах генераторов ПЭС от коэффициента трансформации трансформатора связи, то можно значительно увеличить жесткость регулирования напряжения в узле примыкания, выбрав его в качестве параметра основного регулирования выделенных генераторов. Если $u_k = 12\%$, то изменением коэффициента трансформации в пределах $k_T = 0,86 - 1,18$ можно добиться $U_3 = \text{пост.} = 1$ при таких же условиях, что и выше.

Дальнейшее исследование показало, что законы основного регулирования по углам δ_1 и δ_4 идентичны по воздействию на статическую устойчивость и напряжение в узле примыкания. Оба закона с разной степенью воздействия позволяют получить устойчивую ($D > 0$) передачу, у которой увеличение транзитной активной мощности сопровождается подъемом напряжения в узле примыкания. При этом возникают более сложные затруднения с регулированием напряжений на выводах генераторов ПЭС и в узле примыкания. Величина потока реактивной мощности от ПЭС и напряжение в узле примыкания определяется углом передачи, и поэтому применение РПН трансформатора связи малоэффективно для их регулирования. Эффект от переключения ответвлений трансформатора проявляется в виде некоторого изменения коэффициентов крутизны реактивной мощности ПЭС по углам δ_1 и δ_4 и, соответственно, жесткости регулирования этих углов, а также в виде изменения напряжения на выводах трансформатора связи со стороны ПЭС.

Каскадное подключение нерегулируемых компенсирующих устройств с целью регулирования напряжения в узле примыкания также не дает желаемого эффекта, так как такое подключение приводит к изменению угла передачи, а ПЭС, восстанавливая угол, восстанавливает суммарный поток реактивной мощности присоединения и напряжение в узле примыкания. Поэтому при широких пределах изменения активной мощности линии требуются нелинейные зависимости реактивной мощности ПЭС от углов передачи. Такие зависимости могут быть осу-

ществлены с помощью переключения установок измерительных элементов АРВ генераторов ПЭС, регулирующих угол передачи, в зависимости от передаваемой по линии активной мощности.

Интересные свойства приобретает электропередача при основном регулировании генераторов ПЭС по активной мощности линии. Свободный член характеристического уравнения не зависит от действия пропорциональных АРВ по внешним возмущениям, так как при его определении последние не принимаются во внимание. В силу этого коэффициент крутизны q_{p41} не оказывает какого-либо влияния на величину свободного члена, если не учитываются потери активной мощности в электропередаче, так как при этом $\Delta P_{41} = -\Delta P$. При учете потерь свободный член слабо зависит от q_{p41} .

Полные производные $\frac{dP}{d\delta_1}$ и $\frac{dP}{dU_4}$ связывают приложенное возмущение с приращениями режимных параметров передачи и поэтому в значительной степени зависят от q_{p41} . Основное регулирование генераторов ПЭС по отклонению активной мощности линии дает возможность получить переход от одного установившегося режима передачи к другому при положительных значениях производных $\frac{dP}{d\delta_1}$ и $\frac{dP}{dU_4}$. Вполне возможно, что свободный член характеристического уравнения станет отрицательным не доходя до нового установившегося режима.

Выводы

1. В линиях с волновой длиной до $90^\circ \div 80^\circ$ регулирование угла передачи и регулирование напряжения в узле примыкания с помощью ПЭС, подключенной в середине линии, дают одинаковый эффект по улучшению статической устойчивости передачи, если ресурсы ПЭС ограничены пределами $0 \div 2 P_{\text{нат}}$. Жесткость регулирования угла таких передач не должна быть большой, с тем чтобы уменьшить зависимость напряжения в узле примыкания от передаваемой по линии мощности.

2. В линиях с волновой длиной от $90^\circ \div 80^\circ$ до 180° при таких же условиях регулирования угла передачи с помощью ПЭС дает возможность увеличить запас статической устойчивости. При одинаковых ресурсах реактивной мощности ПЭС запас увеличивается с возрастанием идеализированной линии и усилением жесткости регулирования угла передачи.

3. Основное регулирование генераторов ПЭС по активной мощности линии малоэффективно для повышения уровня статической устойчивости передачи несмотря на то, что позволяет в принципе получить любые зависимости угла и напряжения в узле примыкания от передаваемой по линии мощности.

4. Отклонения напряжения на выводах трансформатора связи со стороны ПЭС, обусловленные изменением потока реактивной мощности, регулирующего напряжение в узле примыкания могут быть скомпенсированы с помощью РПН. Отклонения напряжений на обеих сторонах трансформатора связи, имеющие место при регулировании угла передачи, могут быть скомпенсированы в результате совместного применения РПН трансформатора связи и переключения уставок измерительных элементов АРВ генераторов ПЭС, регулирующих угол.

5. При отсутствии основного регулирования генераторов по внешним параметрам невозможно получить с помощью одной ПЭС устойчиво работающую электропередачу, у которой приращения активной мощности линии и напряжения в узле примыкания имеют одинаковый знак.

ЛИТЕРАТУРА

1. В. С. Пучков. О выборе режимных параметров для регулирования возбуждения подпорных синхронных компенсаторов. Сб. Материалы по вопросам совместной работы дальних электропередач и промежуточных систем. Новосибирск, 1963.
2. Г. В. Михневич, В. М. Фиалков. Система автоматического регулирования управляемых реакторов. «Электричество», 1965, № 3.
3. М. С. Либкинд. Управляемый реактор для линий передачи переменного тока. Изд. АН СССР, 1961.
4. И. С. Брук, П. И. Зубков, А. А. Крюков, М. С. Либкинд, И. М. Маркович, С. А. Совалов. Дальние передачи переменного тока. Изд. АН СССР, 1958.
5. В. А. Веников, И. П. Сиуда. Расчеты режимов дальних электропередач переменного тока. «Высшая школа», М., 1966.
6. Н. Д. Анисимова, В. А. Веников, В. В. Ежков, Л. А. Жуков, Г. Е. Поспелов, И. П. Сиуда, Д. А. Федоров. Примеры анализа и расчетов режимов электропередач имеющих автоматическое регулирование и управление. «Высшая школа», М., 1967.
7. Э. С. Лукашов. К исследованию свойств дальней электропередачи с промежуточными синхронными компенсаторами. Труды СибНИИЭ, вып. I (20). Изд. СО АН СССР, 1964.
8. Л. М. Зисман. Расчет изменений установившегося режима электрической системы с учетом статических характеристик элементов. Изв. АН СССР. «Энергетика и транспорт», 1969, № 3.