

Расчет установившихся режимов электропередачи сверхвысокого напряжения, оснащенной устройствами гибких электропередач¹

ЗРУДСКИЙ Г. К., РАДИЛОВ Т. В.

Приведена методика расчета установившихся режимов управляемой электропередачи сверхвысокого напряжения, которая содержит устройства FACTS. Представлены математические модели тиристорно-реакторной группы и тиристорно-управляемого устройства продольной емкостной компенсации для их включения в узловые уравнения установившихся режимов электропередачи. Режимы управляемой электропередачи рассчитаны итерационным методом Ньютона. Учет представленных устройств в алгоритме Ньютона основывается на идее применения угла открытия тиристоров в качестве переменной состояния.

Ключевые слова: линия электропередачи, сверхвысокое напряжение, продольная емкостная компенсация, тиристорно-управляемое устройство, угол открытия тиристоров, расчет

Решение проблем слабой управляемости ЭЭС можно осуществить за счет использования регулируемых устройств, названных в англоязычной литературе устройствами FACTS (Flexible Alternating Current Transmission Systems) или ГЭП (гибкие электропередачи).

Устройства FACTS способны гибко изменять параметры передающих линий с целью улучшения характеристик режимов энергосистемы одновременно по ряду критериев, таких как устойчивость, пропускная способность, оптимальное распределение потоков мощности, сохраняя при этом конфигурацию системы. Электропередачи, оснащенные такими устройствами, больше не являются пассивными элементами системы, а становятся активным средством транспорта электроэнергии, участвуя в управлении режимами ЭЭС.

Внедрение управляемых устройств в электрические сети разных стран мира привело к необходимости разработки комплексной математической модели ЭЭС для расчета установившихся режимов при использовании этих устройств. Применение устройств FACTS обязывает осуществить определенные изменения в используемых алгоритмах расчета установившихся режимов ЭЭС по итерационным методам Зейделя, Гаусса, Ньютона.

Разработанная математическая модель позволит определить эффект воздействия данных устройств

A procedure for calculating steady-state operating conditions of a controlled extra high-voltage power line containing FACTS devices is described. Mathematical models of a thyristor-reactor group and a thyristor-controlled device of series capacitive compensation intended for including them into the nodal equations of power line steady-state operating conditions are presented. The operating conditions of a controlled power line are calculated using the iterative Newton method. The presented devices are taken into account in the Newton algorithm based on the concept of using the thyristor opening angle as a state variable.

Key words: power line, extra high voltage, series capacitive compensation, thyristor-controlled device, thyristor opening angle, calculation

на установившийся режим электрической сети в целом благодаря их влиянию на потоки мощности в ветвях схемы сети и модули напряжений в ее узлах. Следовательно, учет компенсирующих устройств приведет к видоизменению всех форм узловых уравнений и новому составу переменных состояния, полученных методом Ньютона. Оценка эффективности их применения зависит прямым образом от дополнительных уравнений и новых переменных состояния, учитываемых в итерационном процессе.

Однако изменение существующих алгоритмов с целью учета устройств FACTS связано с рядом трудностей, которые приводят к усложнению программного обеспечения для расчета установившихся режимов ЭЭС. Из них можно выделить:

усложнение узловых уравнений установившихся режимов;

возможное увеличение числа уравнений, описывающих режим работы сложной электрической сети;

увеличение числа итераций для получения параметров режима;

возможное изменение размерности матрицы Якоби, что ведет к появлению новых блоков в ее структуре и усложняет ее геометрию; изменение размерности матрицы Якоби будет пропорциональным числу и типу установленных устройств FACTS, а ее структура будет зависеть от методов

¹ В порядке обсуждения. *Ред.*

моделирования этих устройств и способа их подключения к сети.

Исследования, проводимые на этапах планирования перспективного развития электрических систем и сетей, содержащих устройства FACTS, а также управления ими, принуждают найти новый подход к расчету их установившихся режимов. Решение и составление исходных уравнений установившегося режима таких сетей связано с учетом моделей устройств FACTS.

В статье рассмотрены математические модели тиристорно-реакторной группы (ТРГ) и тиристорно-управляемого устройства продольной емкостной компенсации (ТУПК), основанные на использовании значений угла открытия тиристоров как новой переменной состояния для введения их в алгоритм расчетов по методу Ньютона. Значения этих углов важны для инженерного персонала, обслуживающего контроллер регулируемого устройства, при поддержании фиксированного модуля напряжения в узле с ТРГ или при увеличении предела передаваемой мощности по линии с ТУПК для решения задачи регулирования потоков мощности.

Математическая модель ТРГ для расчета установившихся режимов ЭЭС. Управляемые шунтирующие реакторы, выполненные на основе тиристорно-реакторных групп, могут быть созданы на относительно низкие напряжения, вплоть до 35 кВ. Ограничением служит рабочее напряжение высоковольтных тиристорных вентилях, которые входят в состав тиристорного ключа. При применении тиристорно-реакторных групп для протяженных электропередач СВН этот недостаток может быть исключен при последовательном соединении их с понижающим силовым трансформатором в узле электрической сети.

Исходя из этих соображений была предложена комплексная математическая модель, в которой ТРГ и трансформатор связи рассматриваются как составляющие совокупного элемента, подключаемого в узле сети на стороне высокого напряжения силового трансформатора. Эквивалентная проводимость вновь введенного элемента сети будет складываться из полной проводимости трансформатора связи и индуктивной переменной проводимости ТРГ (рис. 1).

Полная проводимость эквивалентного элемента «ТРГ – трансформатор связи»

$$Y_{\text{Э}} = G_{\text{Э}} - jB_{\text{Э}}, \quad (1)$$

где $G_{\text{Э}}$ – активная проводимость эквивалентного элемента; $B_{\text{Э}}$ – его реактивная проводимость:

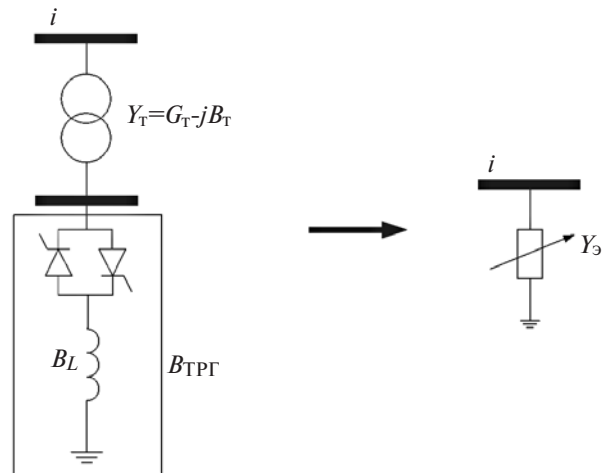


Рис. 1. Эквивалентная схема «ТРГ – трансформатор связи»

$$B_{\text{Э}} = \frac{X_{\text{Э}}}{R_{\text{T}}^2 + X_{\text{Э}}^2}; \quad (2)$$

$$X_{\text{Э}} = X_{\text{T}} + X_{\text{ТРГ}}. \quad (3)$$

Здесь R_{T} – активное сопротивление трансформатора связи; $X_{\text{Э}}$ – реактивное сопротивление эквивалентного элемента; X_{T} – реактивное сопротивление трансформатора связи; $X_{\text{ТРГ}}$ – индуктивное сопротивление ТРГ.

Индуктивное сопротивление ТРГ рассчитывалось по методике отсчета углов открытия тиристоров относительно момента перехода положительной полуволны напряжения через нуль [2], т.е. угол открытия тиристоров может изменяться в диапазоне значений от 90 до 180°:

$$X_{\text{ТРГ}} = \frac{\rho X_L}{2(\rho - a_{\text{ТРГ}}) + \sin(2a_{\text{ТРГ}})}. \quad (4)$$

Ранее отмечалось, что эффективный способ математического моделирования устройств FACTS для их учета в алгоритме Ньютона основан на идее использования угла открытия тиристоров в качестве переменной состояния [1, 7, 8]. В случае поперечных регулируемых устройств угол открытия тиристоров будет автоматически изменяться после каждой итерации для поддержания необходимого модуля напряжения в определенном узле сети. Значение индуктивного сопротивления ТРГ будет также плавно изменяться за счет автоматического подбора угла $a_{\text{ТРГ}}$.

Уравнения баланса активной и реактивной мощностей в узле i при включении эквивалентного элемента:

$$\begin{aligned} DP_i(U_i, d_i) = & -P_i + U_i^2 G_{ii} - \\ & - \sum_{j=1}^{n-1} [G_{ij} U_i U_j \cos(d_i - d_j) - B_{ij} U_i U_j \sin(d_i - d_j)] - \end{aligned}$$

$$- G_{i0}U_0U_i \cos d_i + B_{i0}U_0U_i \sin d_i; \quad (5a)$$

$$DQ_i(U_i, d_i) = -Q_i + U_i^2 B_{ii} - \sum_{j=1}^{n-1} [G_{ij}U_iU_j \sin(d_i - d_j) + B_{ij}U_iU_j \cos(d_i - d_j)] - G_{i0}U_0U_i \sin d_i - B_{i0}U_0U_i \cos d_i, \quad (5b)$$

где P_i, Q_i – генерируемые или потребляемые активная и реактивная мощности в узле i ; G_{ii}, B_{ii} – собственные активная и реактивная проводимости узла i :

$$G_{ii} = \sum_{j=1}^{n-1} G_{ij} + G_{\Sigma}; \quad B_{ii} = \sum_{j=1}^{n-1} B_{ij} + B_{\Sigma}; \quad (6)$$

G_{ii}, B_{ij} – активная и реактивная проводимости ветви, связывающей узлы i и j ; G_{i0}, B_{i0} – то же ветви, связывающей базисный и i -й узлы.

При использовании угла $\alpha_{\text{ТРГ}}$ в качестве переменной состояния система узловых уравнений в форме баланса мощностей для узла i , линеаризованная по методу Ньютона, представлена далее для k -го шага итерационного процесса.

$$\begin{pmatrix} \hat{e} DP_i \\ \hat{e} DQ_i \end{pmatrix} \dot{u}^{(k)} = \begin{pmatrix} \hat{e} \frac{\partial P_i}{\partial q_i} & \frac{\partial P_i}{\partial \alpha_{\text{ТРГ}}} \\ \hat{e} \frac{\partial Q_i}{\partial q_i} & \frac{\partial Q_i}{\partial \alpha_{\text{ТРГ}}} \end{pmatrix} \dot{u}^{(k)} = \begin{pmatrix} \hat{e} Dq_i \\ \hat{e} Da_{\text{ТРГ}} \end{pmatrix} \dot{u}^{(k)}. \quad (7)$$

В уравнениях (5)–(7) использовалась полярная система координат для представления вектора напряжения в узле i . Поэтому модуль напряжения был задан и заменен на угол $\alpha_{\text{ТРГ}}$ в матрице переменных состояния. Такой подход позволит фиксировать необходимое значение для напряжения в узле электрической сети и не приведет к изменению размерности матрицы Якоби.

В конце каждой итерации вычисляется новое значение угла открытия тиристор:

$$\alpha_{\text{ТРГ}}^{(k)} = \alpha_{\text{ТРГ}}^{(k-1)} + Da_{\text{ТРГ}}^{(k)}. \quad (8)$$

Индуктивная проводимость ТРГ рассчитывается при использовании полученного значения угла $\alpha_{\text{ТРГ}}$:

$$B_{\text{ТРГ}} = \frac{2(p - \alpha_{\text{ТРГ}}) + \sin(2\alpha_{\text{ТРГ}})}{pX_L}. \quad (9)$$

Задачу можно решить и другим способом: в качестве переменной состояния выбирается сопротивление ТРГ, а потом рассчитывается значение угла управления, необходимое для настройки само-

го устройства при фиксированном значении напряжения в узле с компенсатором. Однако индуктивное сопротивление ТРГ и угол открытия тиристоров связаны нелинейной зависимостью, что повлечет за собой новый итерационный процесс для расчета этого угла. Поэтому модель ТРГ, представленная в статье, является наиболее оптимальной, свободной от дополнительных расчетов.

На основе (9) можно вывести уравнение для расчета реактивной мощности, потребляемой ТРГ [1]:

$$Q_{\text{ТРГ}} = \frac{U_L^2}{X_L} \frac{2(p - \alpha_{\text{ТРГ}}) + \sin(2\alpha_{\text{ТРГ}})}{p}. \quad (10)$$

С использованием представленного алгоритма исследовались установившиеся режимы работы протяженной воздушной линии (ВЛ) напряжением 500 кВ, длиной 800 км с проводами 3' АС-400/51, в середине которой расположена неуправляемая УПК с фиксированной степенью компенсации $k = 49\%$ (рис. 2).

УПК способно генерировать реактивную мощность, значение которой зависит от передаваемой по линии активной мощности. Для протяженных линий электропередачи СВН это может приводить к повышению напряжений на выводах компенсирующего устройства сверх допустимых значений. Однако установка управляемых и неуправляемых шунтирующих реакторов на выводах УПК способствует устранению указанного недостатка. В ряде работ было показано, что существует определенное сочетание проводимости УПК и шунтирующих реакторов в случае П-образной схемы компенсации, для которого напряжения на ее выводах не превышают допустимых значений в разных режимах [4, 5].

При включении УПК в реальную линию ($r_{\text{л}} \neq 0$) значения напряжений на его выводах будут разными ($U_{\text{к1}} > U_{\text{к2}}$) за счет сквозного перетока реактивной мощности через батарею конденсаторов УПК (рис. 2). Этот «скачок» напряжения также зависит от значения передаваемой активной мощности и может быть устранен при регулировании мощности шунтирующих реакторов при неизменных номинальных значениях напряжения по концам линии. В таком случае мощность шунтирующих реакторов, установленных в конце УПК, должна быть на 50% больше мощности реакторов, установленных в ее начале [5]. Исходя из этого на выводах УПК исследуемой линии была установлена трехфазная группа неуправляемых однофазных реакторов типа РОМБСМ с номинальным напряжением $U_{\text{ном}} = 535 / \sqrt{3}$ кВ и мощностью $S_{\text{ном}} = 3 \cdot 60$ МВА в группе, а также группа однофазных реакторов типа РОМ с номинальным напряжением

$U_{\text{ном}} = 38,5 / \sqrt{3}$ кВ и мощностью $S_{\text{ном}} = 3 \cdot 30$ МВА, управляемых тиристорными вентилями, – за УПК. Управляемые реакторы подключены к выводам устройства продольной компенсации через автотрансформатор типа АТДЦН 250000/500/110. Напряжения по концам линии принимались неизменными, равными 520 кВ. Расчет был проведен для трех разных режимов работы линии при использовании метода Ньютона: $P_{\text{пер}} < P_{\text{нат}}$, $P_{\text{пер}} = P_{\text{нат}}$ и $P_{\text{пер}} > P_{\text{нат}}$ (натуральная мощность $P_{\text{нат}} = 930$ МВт).

Результат выполненных расчетов – параметры

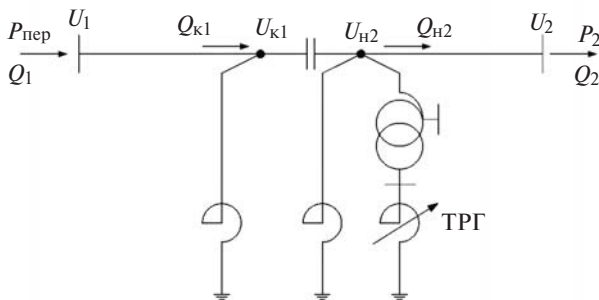


Рис. 2. Схема компенсированной линии: $P_{\text{пер}}$ – передаваемая по линии активная мощность; $Q_{к1}$, $Q_{н2}$ – реактивная мощность в конце первого участка линии и в начале второго ее участка

режима линии при поддержании наибольшего рабочего напряжения ($U_{\text{нб.раб}} = 525$ кВ) в узле $U_{к1}$ регулированием ТРГ. Параметры режима линии при использовании П-образной схемы компенсации, а также параметры ТРГ, включая значения углов $\alpha_{\text{ТРГ}}$, представлены в табл. 1.

Из полученных результатов видно, что наибольшая передаваемая активная мощность, при которой можно удержать значение наибольшего рабочего напряжения на выводах УПК, составляет 1192 МВт. Мощность, потребляемая управляемыми реакторами, зависит от приложенного напряжения в узле их включения. В режиме $P_{\text{пер}} > P_{\text{нат}}$ проводимость ТРГ достигает максимального значения, равного номинальному, которое соответствует $\alpha_{\text{ТРГ}} = 90^\circ$, а потребляемая им мощность больше номинальной, что связано с допустимой перегрузкой устройства. Это объясняется повышенным значением напряжения $U_{н2}$ относительно номиналь-

ного, при котором рассчитывалась проводимость реактора. Для всех рассмотренных режимов разница между реактивными мощностями, потребляемыми эквивалентным элементом (Q_3) и ТРГ ($Q_{\text{ТРГ}}$), будет равна потерям реактивной мощности в автотрансформаторе. Для режима наибольших нагрузок потери в автотрансформаторе составили 9,775 Мвар.

Математическая модель ТУПК для расчета установившихся режимов ЭЭС. Модель ТУПК, предложенная для расчета установившихся режимов, основана на концепции регулируемого сопротивления. Значение его сопротивления плавно изменяется путем изменения угла открытия тиристорных вентилях с целью увеличения передела активной мощности, которая может быть передана по ветви электрической сети с ТУПК. Если углы открытия тиристорных отсчитываются относительно момента перехода положительной полуволны напряжения через нуль, тогда можно рассчитать переменное сопротивление ТУПК согласно [1]:

$$X_{\text{ТУПК}} = -X_C + C_1 \{2(\rho - \alpha_{\text{ТУПК}}) + \sin[2(\rho - \alpha_{\text{ТУПК}})] - C_2 \cos^2(\rho - \alpha_{\text{ТУПК}}) \cdot \{K \operatorname{tg}[K(\rho - \alpha_{\text{ТУПК}})] - \operatorname{tg}(\rho - \alpha_{\text{ТУПК}})\}, \quad (11)$$

где $C_1 = (X_C + X_{LC}) / \rho$; $X_{LC} = (X_C X_L) / (X_C - X_L)$; $C_2 = 4X_{LC}^2 / \rho X_L$; $K = \sqrt{X_C / X_L}$; X_C – неизменное сопротивление конденсаторной батареи (КБ) ТУПК; X_L – сопротивление реактора, включенного последовательно в цепь тиристорного ключа Т, шунтирующую КБ.

Схема замещения ТУПК, используемая при моделировании компенсирующего устройства в установившихся режимах, представлена на рис. 3.

Уравнения баланса активной и реактивной мощностей в узлах, соответствующих выводам ТУПК:

$$DP_i(U_i, d_i) = -P_i + U_i U_j B_{ij} \sin(d_i - d_j); \quad (12)$$

$$DQ_i(U_i, d_i) = -Q_i + U_i^2 B_{ii} - B_{ij} U_i U_j \cos(d_i - d_j),$$

где i и j – узлы, соответствующие выводам ТУПК.

Таблица 1

Передаваемая мощность $P_{\text{пер}}$, МВт	Параметр линии и ТРГ									
	Напряжение, кВ		Реактивная мощность, Мвар					Угол $\alpha_{\text{ТРГ}}$, эл. град.	$B_3/B_{\text{ТРГ}}$, См $\cdot 10^{-6}$	$Q_3/Q_{\text{ТРГ}}$, Мвар
	$U_{к1}$	$U_{н2}$	$Q_{к1}$	$Q_{н2}$	начала линии Q_1	конца линии Q_2	генерируемая УПК $DQ_{\text{упк}}$			
400	525,0	520,45	127,0	-202,8	-228,2	150,5	61,2	121,646	125,9/131,4	34,10/35,59
930	525,0	511,77	-52,6	-134,1	-122,9	-65,6	336,1	100,487	254,2/277,4	66,578/72,654
1192	525,0	507,17	-187,0	-56,0	-24,5	-216,7	557,0	90,010	322,0/360,0	82,825/92,6

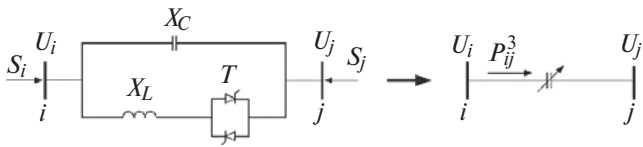


Рис. 3. Схема замещения ТУПК

В случае уравнений баланса мощностей для узла j индексы меняются местами.

Новый подход к анализу и расчету установившихся режимов ЭЭС при учете ТУПК сводится к объединению переменных состояния, описывающих компенсирующее устройство, и переменных состояния, описывающих другие элементы сети, в единую матрицу [1, 8]. В качестве дополнительной переменной состояния выступает угол открытия управляемых вентилей $a_{\text{ТУПК}}$, используемый для учета ТУПК в алгоритме Ньютона.

Таким образом, число переменных состояния становится больше числа узловых уравнений, что обязывает ввести новое уравнение:

$$DP_{ij}^{\text{ТУПК}} = P_{ij}^3 - P_{ij}^{\text{рас}}, \quad (13)$$

где P_{ij}^3 – заданный поток активной мощности, передаваемой через ТУПК; $P_{ij}^{\text{рас}}$ – расчетное значение потока активной мощности в той же линии.

В зависимости от значения P_{ij}^3 угол управления ТУПК будет плавно изменяться с целью обеспечения нужной степени компенсации для передачи этого потока мощности.

Система узловых уравнений в форме баланса мощностей для узлов $i-j$, линеаризованная по методу Ньютона для шага k итерационного процесса, имеет вид:

$$\begin{pmatrix} \frac{\partial DP_i}{\partial d_i} \\ \frac{\partial DP_j}{\partial d_j} \\ \frac{\partial DQ_i}{\partial d_i} \\ \frac{\partial DQ_j}{\partial d_j} \\ \frac{\partial DP_{ij}^{\text{ТУПК}}}{\partial d_i} \\ \frac{\partial DP_{ij}^{\text{ТУПК}}}{\partial d_j} \\ \frac{\partial DP_{ij}^{\text{ТУПК}}}{\partial U_i} \\ \frac{\partial DP_{ij}^{\text{ТУПК}}}{\partial U_j} \\ \frac{\partial DP_{ij}^{\text{ТУПК}}}{\partial a_{\text{ТУПК}}} \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} \dot{d}_i^{(k)} \\ \dot{d}_j^{(k)} \\ \dot{U}_i^{(k)} \\ \dot{U}_j^{(k)} \\ \dot{a}_{\text{ТУПК}}^{(k)} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \frac{\partial P_i}{\partial d_i} & \frac{\partial P_i}{\partial d_j} & \frac{\partial P_i}{\partial U_i} & \frac{\partial P_i}{\partial U_j} & \frac{\partial P_i}{\partial a_{\text{ТУПК}}} \\ \frac{\partial P_j}{\partial d_i} & \frac{\partial P_j}{\partial d_j} & \frac{\partial P_j}{\partial U_i} & \frac{\partial P_j}{\partial U_j} & \frac{\partial P_j}{\partial a_{\text{ТУПК}}} \\ \frac{\partial Q_i}{\partial d_i} & \frac{\partial Q_i}{\partial d_j} & \frac{\partial Q_i}{\partial U_i} & \frac{\partial Q_i}{\partial U_j} & \frac{\partial Q_i}{\partial a_{\text{ТУПК}}} \\ \frac{\partial Q_j}{\partial d_i} & \frac{\partial Q_j}{\partial d_j} & \frac{\partial Q_j}{\partial U_i} & \frac{\partial Q_j}{\partial U_j} & \frac{\partial Q_j}{\partial a_{\text{ТУПК}}} \\ \frac{\partial DP_{ij}^{\text{ТУПК}}}{\partial d_i} & \frac{\partial DP_{ij}^{\text{ТУПК}}}{\partial d_j} & \frac{\partial DP_{ij}^{\text{ТУПК}}}{\partial U_i} & \frac{\partial DP_{ij}^{\text{ТУПК}}}{\partial U_j} & \frac{\partial DP_{ij}^{\text{ТУПК}}}{\partial a_{\text{ТУПК}}} \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} \dot{d}_i^{(k)} \\ \dot{d}_j^{(k)} \\ \dot{U}_i^{(k)} \\ \dot{U}_j^{(k)} \\ \dot{a}_{\text{ТУПК}}^{(k)} \end{pmatrix}$$

$$\begin{pmatrix} \frac{\partial DP_i}{\partial d_i} \\ \frac{\partial DP_j}{\partial d_j} \\ \frac{\partial DQ_i}{\partial d_i} \\ \frac{\partial DQ_j}{\partial d_j} \\ \frac{\partial DP_{ij}^{\text{ТУПК}}}{\partial d_i} \\ \frac{\partial DP_{ij}^{\text{ТУПК}}}{\partial d_j} \\ \frac{\partial DP_{ij}^{\text{ТУПК}}}{\partial U_i} \\ \frac{\partial DP_{ij}^{\text{ТУПК}}}{\partial U_j} \\ \frac{\partial DP_{ij}^{\text{ТУПК}}}{\partial a_{\text{ТУПК}}} \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} \dot{d}_i^{(k)} \\ \dot{d}_j^{(k)} \\ \dot{U}_i^{(k)} \\ \dot{U}_j^{(k)} \\ \dot{a}_{\text{ТУПК}}^{(k)} \end{pmatrix} \quad (14)$$

В конце каждой итерации вычисляется новое значение угла открытия тиристор:

$$a_{\text{ТУПК}}^{(k)} = a_{\text{ТУПК}}^{(k-1)} + Da_{\text{ТУПК}}^{(k)} \quad (15)$$

Нетрудно заметить, что применение ТУПК приводит к изменению размерности матрицы Якоби.

Использование ТУПК с целью регулирования потоков мощности в параллельно работающих воздушных линиях СВН большой протяженности требует применения управляемых шунтирующих реакторов для ограничения напряжений на его выводах. Линеаризованная система узловых уравнений для П-образной схемы компенсации, в которую вошли ТУПК и два ТРГ:

$$\begin{pmatrix} \frac{\partial DP_i}{\partial d_i} \\ \frac{\partial DP_j}{\partial d_j} \\ \frac{\partial DQ_i}{\partial d_i} \\ \frac{\partial DQ_j}{\partial d_j} \\ \frac{\partial DP_{ij}^{\text{ТУПК}}}{\partial d_i} \\ \frac{\partial DP_{ij}^{\text{ТУПК}}}{\partial d_j} \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} \dot{d}_i^{(k)} \\ \dot{d}_j^{(k)} \\ \dot{U}_i^{(k)} \\ \dot{U}_j^{(k)} \\ \dot{a}_{\text{ТУПК}}^{(k)} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \frac{\partial P_i}{\partial d_i} & \frac{\partial P_i}{\partial d_j} & \frac{\partial P_i}{\partial a_{\text{ТРГ1}}} \\ \frac{\partial P_j}{\partial d_i} & \frac{\partial P_j}{\partial d_j} & \frac{\partial P_j}{\partial a_{\text{ТРГ1}}} \\ \frac{\partial Q_i}{\partial d_i} & \frac{\partial Q_i}{\partial d_j} & \frac{\partial Q_i}{\partial a_{\text{ТРГ1}}} \\ \frac{\partial Q_j}{\partial d_i} & \frac{\partial Q_j}{\partial d_j} & \frac{\partial Q_j}{\partial a_{\text{ТРГ1}}} \\ \frac{\partial DP_{ij}^{\text{ТУПК}}}{\partial d_i} & \frac{\partial DP_{ij}^{\text{ТУПК}}}{\partial d_j} & \frac{\partial DP_{ij}^{\text{ТУПК}}}{\partial a_{\text{ТРГ1}}} \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} \dot{d}_i^{(k)} \\ \dot{d}_j^{(k)} \\ \dot{a}_{\text{ТРГ1}}^{(k)} \end{pmatrix} \oplus \begin{pmatrix} \frac{\partial P_i}{\partial a_{\text{ТРГ2}}} & \frac{\partial P_i}{\partial a_{\text{ТУПК}}} \\ \frac{\partial P_j}{\partial a_{\text{ТРГ2}}} & \frac{\partial P_j}{\partial a_{\text{ТУПК}}} \\ \frac{\partial Q_i}{\partial a_{\text{ТРГ2}}} & \frac{\partial Q_i}{\partial a_{\text{ТУПК}}} \\ \frac{\partial Q_j}{\partial a_{\text{ТРГ2}}} & \frac{\partial Q_j}{\partial a_{\text{ТУПК}}} \\ \frac{\partial DP_{ij}^{\text{ТУПК}}}{\partial a_{\text{ТРГ2}}} & \frac{\partial DP_{ij}^{\text{ТУПК}}}{\partial a_{\text{ТУПК}}} \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} \dot{a}_{\text{ТРГ2}}^{(k)} \\ \dot{a}_{\text{ТУПК}}^{(k)} \end{pmatrix} \oplus \begin{pmatrix} \frac{\partial P_i}{\partial d_i} & \frac{\partial P_i}{\partial d_j} \\ \frac{\partial P_j}{\partial d_i} & \frac{\partial P_j}{\partial d_j} \\ \frac{\partial Q_i}{\partial d_i} & \frac{\partial Q_i}{\partial d_j} \\ \frac{\partial Q_j}{\partial d_i} & \frac{\partial Q_j}{\partial d_j} \\ \frac{\partial DP_{ij}^{\text{ТУПК}}}{\partial d_i} & \frac{\partial DP_{ij}^{\text{ТУПК}}}{\partial d_j} \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} \dot{d}_i^{(k)} \\ \dot{d}_j^{(k)} \\ \dot{U}_i^{(k)} \\ \dot{U}_j^{(k)} \\ \dot{a}_{\text{ТРГ1}}^{(k)} \\ \dot{a}_{\text{ТРГ2}}^{(k)} \\ \dot{a}_{\text{ТУПК}}^{(k)} \end{pmatrix} \quad (16)$$

Для использования описанного алгоритма в работе были исследованы режимы работы неоднородной электропередачи (рис. 4). Напряжения по концам электропередачи были приняты неиз-

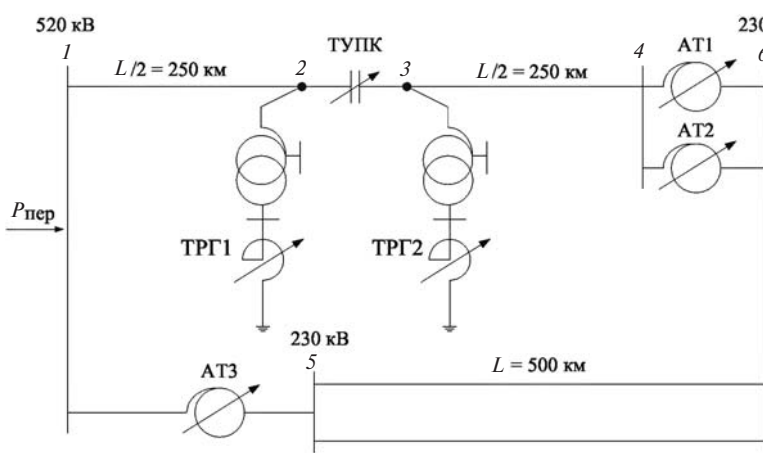


Рис. 4. Схема компенсированной неоднородной электропередачи

менными, равными $U_1 = 520$ кВ, $U_6 = 230$ кВ; ВЛ 500 кВ с проводами марки АС 3' 400/51, протяженностью 500 км присоединена к шинам 230 кВ через два автотрансформатора типа АДЦТН 500000/500/220, а двухцепная ВЛ 220 кВ длиной 500 км с проводами марки АС 300/39 связана с шинами высшего напряжения через трехфазную группу однофазных автотрансформаторов АОДЦТН 3' 167000/500/220. В середине ВЛ 500 кВ расположено ТУПК, на выводах которого установлены трехфазные группы однофазных управляемых реакторов, рассмотренных ранее для П-образной схемы компенсации. Эти реакторы действуют по принципу перекрестного регулирования для поддержания напряжения на выводах ТУПК в допустимых пределах.

Важным этапом расчета режимов управляемой электропередачи является выбор параметров ТУПК. Анализ выражения (11) приводит к выводу, что ТУПК может работать в емкостном и индуктивном режимах, разделенных точкой резонанса. Однако рабочая область компенсирующего устройства, в принципе, соответствует лишь емкостному диапазону изменения его сопротивления $X_{\max}^3 \geq X_{\text{ТУПК}} \geq X_{\min}$, который задан рабочим диапазоном изменения угла открытия тиристоров $\alpha_{\min} \leq \alpha_{\text{ТУПК}} \leq \alpha_{\max}$. В емкостном режиме его сопротивление будет равным неизменному сопротивлению КБ для $\alpha_{\text{ТУПК}} = 180^\circ$ и будет увеличиваться по мере уменьшения угла открытия тиристоров. Таким образом, минимальная степень компенсации будет зависеть от значения сопротивления КБ. В [1, 6] показано, что число точек резонанса зависит от значения $K = \sqrt{X_C / X_L}$. Если $1 \leq K < 3$, то будет существовать только одна точка резонанса. Исходя из этих соображений важен выбор индуктивности тиристорно-реакторной группы для заданного значения X_C .

Минимальная степень продольной емкостной компенсации, принятая для ТУПК в данном слу-

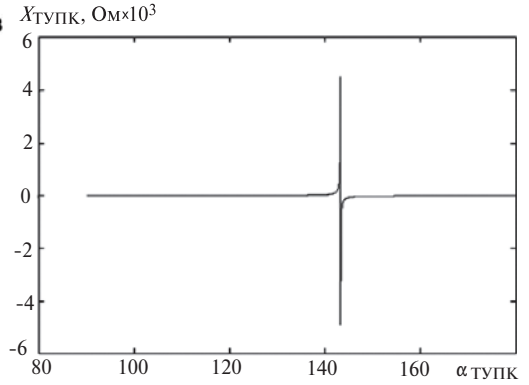


Рис. 5. Зависимость сопротивления ТУПК от угла управления

чае, составила 8,23% ($X_C = -12$ Ом), а максимальная степень компенсации — 41,28% ($X_{\text{ТУПК}} = -60,15$ Ом), которая соответствует определенному отдалению от границы резонанса. Значение сопротивления реактора, шунтирующего КБ, выбиралось равным $X_L = 2$ Ом, что соответствует $K = 2,45$. Точка резонанса связана с единственным значением угла управления $\alpha_{\text{ТУПК}} = 143,4^\circ$. Чем больше значение K будет приближаться к единице, тем шире емкостный диапазон работы ТУПК. Целесообразное значение X_L было рассчитано согласно заданному диапазону значений $\alpha_{\text{ТУПК}}$ в емкостном режиме работы компенсирующего устройства и результирующему значению $X_{\text{ТУПК}}$ ($X_{\text{ТУПК}} = -60,15$ Ом) при учете ограничений, накладываемых на K . Существует бесконечное число комбинаций для значений X_C , X_L и $\alpha_{\text{ТУПК}}$, удовлетворяющих условию $1 \leq K < 3$, для расчета желаемого значения $X_{\text{ТУПК}}$. Принятый в данном случае емкостный диапазон изменения сопротивления ТУПК $X_{\text{ТУПК}} \in [-60,15, -12]$ Ом соответствует диапазону изменения угла открытия тиристоров $\alpha_{\text{ТУПК}} \in [145,739, 180]$ эл. град.

Зависимость сопротивления ТУПК от угла управления его тиристорных вентилей представлена на рис. 5.

Таблица 2

Передаваемая мощность $P_{\text{пер}}$, МВт	Режимный параметр некомпенсированной электропередачи				
	Напряжение, кВ		Активная мощность, МВт		Плотность тока j_{56} , А/мм ²
	U_4	U_5	P_{14}	P_{56}	
700	510,31	215,0	549	150	0,804
930	505,56	214,47	727	203	0,998
1050	502,49	214,06	819	231	1,105

Анализ полученной зависимости показывает, что незначительное изменение угла управления вблизи точки резонанса приводит к существенному увеличению значения $X_{\text{ТУПК}}$.

Таблица 3

Передаваемая мощность $P_{пер}$, МВт	Режимный параметр компенсированной линии и устройств FACTS													
	Напряжение, кВ				Активная мощность, МВт			Плотность тока j_{56} , А/мм ²	Угол открытия α , эл. град.			Сопротивление $X_{ТУПК}$, Ом	Проводимость, См $\times 10^{-6}$	
	U_2	U_3	U_4	U_5	P_{23} (заданная)	DP_{23}^{**}	DP_{56}^{***}		$\alpha_{ТУПК}$	$\alpha_{ТРГ1}$	$\alpha_{ТРГ2}$		$B_{\varepsilon 1}$	$B_{\varepsilon 2}$
700	525	525	509,0	215,22	585	43	43	0,664	145,739	121,028	112,354	-60,15	129,3	179,1
930	525	525	506,22	215,03	771	57	57	0,792	145,739	139,388	119,762	-60,15	48,64	136,2
1050	525	525	504,494	214,891	868	66	66	0,861	145,739	163,105	126,086	-60,15	3,9	103,8
930*	525	525	506,39	214,96	761	47	47	0,827	146,273	153,851	126,972	-50	13,99	98,98

* Режим, в котором степень компенсации была принята меньше максимальной за счет регулирования угла открытия тиристоров.

** DP_{23} – увеличение потока активной мощности в цепи с ТУПК за счет разгрузки параллельной связи 220 кВ.

*** DP_{56} – уменьшение потока мощности в ВЛ 220 кВ относительно исходного режима без продольной емкостной компенсации.

Режимные параметры неоднородной некомпенсированной электропередачи (рис. 4), а также плотность тока в двухцепной ВЛ 220 кВ представлены в табл. 2.

Управление потоками мощности в неоднородной электропередаче (рис. 4) за счет регулирования ТУПК позволит разгрузить двухцепную ВЛ 220 кВ и уменьшить суммарные потери активной мощности. В связи с этим возникает проблема уменьшения плотности тока в ВЛ 220 кВ до его экономического значения, равного $J_H = 0,9$ А/мм² при числе использования максимума нагрузки $T_{max} = 3000, 5000$ ч/год. Результаты расчетов, проведенных для неоднородной электропередачи с ТУПК (рис. 4), представлены в табл. 3.

Выводы. 1. Математические модели ТРГ и ТУПК, предлагаемые для расчетов установившихся режимов электропередач СВН методом Ньютона, показали высокую эффективность для вычисления необходимых значений углов открытия тиристоров для поддержания необходимых модулей напряжения в определенных узлах электропередачи и управления потоком активной мощности в воздушной линии.

2. Измененный метод Ньютона и узловые уравнения в форме баланса мощностей для учета устройств FACTS применимы для расчета установившихся режимов электрических сетей любой конфигурации.

3. П-образная схема компенсации, содержащая три устройства FACTS–ТУПК и два ТРГ с перекрестным регулированием, дает возможность увеличивать передаваемую по линии СВН активную мощность, удерживая при этом напряжения на выводах ТУПК в допустимых пределах.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Acha E., Fuerte-Escquivel C.R., Ambriz-Perez H., Angeles-Camacho C. FACTS Modelling and Simulation in Power Networks. – John Wiley & Sons Ltd. The Atrium, Southern Gate, Chichester, West Sussex, PO19 8SQ, England, 2004.
2. Erinmez I.A. Static var compensators. CIGRE working group 38-01. Task force № 2 on SVC. – International conference on large high voltage electric systems, Paris, 1986.
3. Hingorani N.G., Gyugyi L. Understanding FACTS: concepts and technology of flexible ac transmission systems. – IEEE Press, 2000.
4. Зарудский Г.К. О результатах исследований по применению продольной емкостной компенсации в электропередачах СВН. – Электричество, 2007, № 9.
5. Зарудский Г.К. Исследования электропередач сверхвысокого напряжения при глубокой компенсации параметров: Автореферат дис. ... канд. техн. наук. – МЭИ, 1970.
6. Ивакин В.Н. Исследование характеристик управляемой продольной компенсации как устройства для регулирования потоков мощности гибких линий электропередачи переменного тока. – Электротехника, 2003, № 6.
7. Hassan M.O., Cheng S.J., Zakaria Z.A. Steady-state modeling of SVC and TCSC for power flow analysis. – IMECS, 2009, vol. II.
8. Sahoo A.K., Dash S.S., Thyagarajan T. Power flow study including FACTS devices. – Journal of applied sciences, 2010, № 10(15).

[17.09.13]

А в т о р ы : Зарудский Георгий Константинович окончил электроэнергетический факультет Московского энергетического института (МЭИ) в 1961 г. В 1971 г. в МЭИ защитил кандидатскую диссертацию «Исследование протяженных электропередач сверхвысокого напряжения при глубокой компенсации параметров». Профессор кафедры ЭЭС НИУ «МЭИ».

Радилов Тудор Владимирович окончил Технический Университет Молдовы по специальности «Электроэнергетика» в 2011 г. Аспирант кафедры ЭЭС НИУ «МЭИ».