

РАСЧЕТ УСТАНОВИВШИХСЯ РЕЖИМОВ КОМПЕНСИРОВАННОЙ ДАЛЬНОЙ ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧИ С ПРОМЕЖУТОЧНЫМИ СИСТЕМАМИ

Р. И. БОРИСОВ, И. А. БЕЗЛЕР

(Представлена научным семинаром кафедры электрических систем и сетей)

Вновь вводимые и существующие дальние электропередачи переменного тока служат для межсистемных связей между передающими и приемными системами. Но такие электропередачи со временем превращаются из транзитных в электропередачи с промежуточными отборами мощностей или с присоединенными промежуточными системами (ПС). Присоединяемые к дальней электропередаче ПС и регулируемые установки поперечной компенсации (УПпК) превращают дальнюю ЛЭП из пассивной в активную. А это ведет к количественному и качественному изменению параметров режима дальней ЛЭП, изменяется статическая и динамическая устойчивость системы в целом, предел передаваемой мощности по участкам дальней ЛЭП, надежность электроснабжения потребителей, частота и уровни напряжения в системе. Но изменение параметров должно происходить таким образом, чтобы в каждом конкретном случае получать режим, близкий к оптимальному [1—4].

В предлагаемой работе рассматривается алгоритм расчета установившегося режима дальней электропередачи, имеющей установку продольной емкостной компенсации (УПК), к выводам которой подключены ПС и УПпК (под УПпК подразумеваются синхронный и статический компенсаторы, шунтирующие реакторы и статические конденсаторы).

Рассматриваемый алгоритм базируется на [5, 6] с учетом особенностей, накладываемых ПС и УПпК на режимы дальней электропередачи как в нормальном, так и в послеаварийных режимах.

При проведении расчета по определению режима собственно дальней ЛЭП и для уменьшения времени счета необходимо ПС и УПпК представить статическими характеристиками. А при внутреннем исследовании ПС необходимо использовать метод цепочечного соединения многополюсников, так как он дает возможность просто учитывать любые изменения в ПС: изменение сопротивления связи ПС с дальней ЛЭП, изменение нагрузки, изменение законов регулирования генераторов, изменение коэффициентов трансформации у трансформаторов связи и др.

В задачу расчета установившихся режимов рассматриваемой энергосистемы (рис. 1) входит определение потоков активной и реактивной мощностей по всем ветвям при известной схеме сети, модулей (векторов) напряжений контролируемых узлов сети. Кроме того, определя-

ются активная и реактивная мощности станций, нагрузки, коэффициенты трансформации. При этом на параметры режима могут быть наложены различные ограничения:

- а) по взаимному углу напряжений концов участков дальней ЛЭП;
- б) по верхнему и нижнему пределам модулей напряжений в контролируемых узлах системы;
- в) по пропускной способности трансформаторов связи между ПС и дальней ЛЭП;

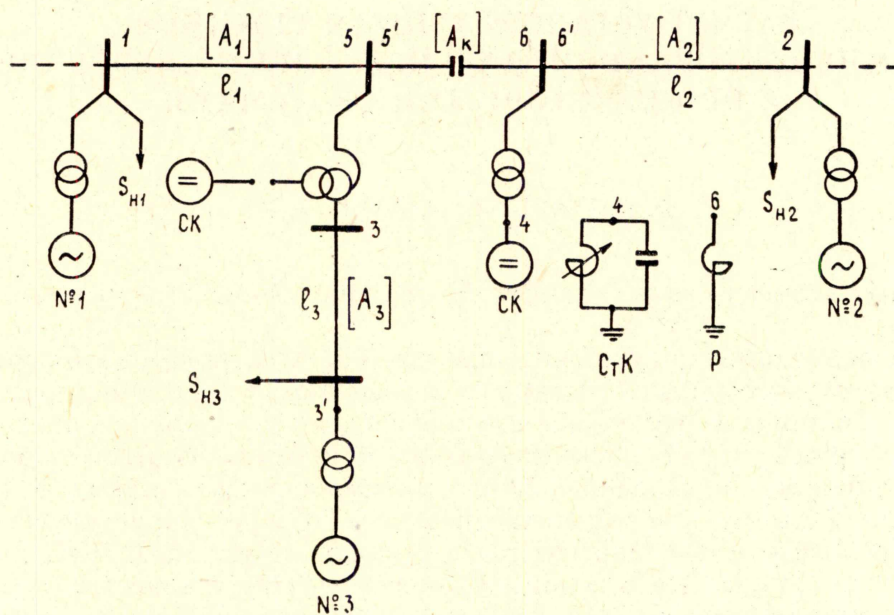


Рис. 1. Схема дальней электропередачи с промежуточной системой, установками продольной и различными видами поперечной компенсации.

и ряд других ограничений, которые зависят от конкретных условий решаемой задачи.

Поэтому на первом этапе по заданным значениям потоков активной мощности и модулей напряжений в узлах присоединения ПС и элементов системы производится расчет исходного режима, в результате которого определяется потребность в реактивной мощности во всех узлах системы, обменный поток активной мощности с балансирующей энергосистемой и все остальные режимные параметры энергосистемы. Небаланс реактивной мощности в узлах присоединения ПС и элементов системы частично или полностью покрывается за счет поперечных компенсирующих устройств, необходимых для регулирования напряжений в узлах присоединения ПС и элементов системы. Тогда заданные значения потоков активной мощности и модулей напряжений в узлах системы вместе с рассчитанными величинами небаланса реактивной мощности являются фиксированными режимными параметрами для расчета исходного режима полученной энергосистемы.

Полученные значения исходного режима должны удовлетворять параметрам режима с учетом ограничений. Ввод переменных режима в допустимую область обеспечивается за счет имеющихся степеней свободы параметров системы. Так, для ограничения верхнего или нижнего предела модуля напряжения в узле необходимо снизить или повысить реактивную мощность расположенных наиболее близко к узлу источников реактивной мощности, или уменьшить, или увеличить модуль коэффици-

ента трансформации в ветви, связанной с данным узлом. Расчет исходного режима и определение конечных параметров (которые получены с учетом установленных ограничений и режим введен в допустимую область) производится любым из применяемых в настоящее время итерационных методов [3, 7].

Для схемы (рис. 1) коэффициенты четырехполюсников имеют вид:
а) участки линий с учетом распределенности параметров

$$[\dot{A}_i] = \begin{bmatrix} \text{ch } \dot{\gamma} l_i & \frac{\dot{Z}}{n} \text{sh } \dot{\gamma} l_i \\ \frac{n}{\dot{Z}} \text{sh } \dot{\gamma} l_i & \text{sh } \dot{\gamma} l_i \end{bmatrix} \quad (1)$$

где $i = 1, 2, \dots, m$ — индекс участка линии;

n — число параллельных цепей участка линии;

$\dot{Z}, \dot{\gamma}$ — волновое сопротивление и коэффициент распространения;

б) компенсирующие устройства, представляющие УПК

$$[A_k] = \begin{bmatrix} 1 & -jX_k \\ 0 & 1 \end{bmatrix}; \quad (2)$$

в) компенсирующие устройства, представляющие УПпК

$$[\dot{A}_k] = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ \pm j \frac{1}{X_p} & 1 \end{bmatrix}, \quad (3)$$

где

$$X_p = \frac{U_i^2}{Q_p},$$

$i = 1, 2, \dots, m$ — индекс узла присоединения УПпК к компенсированной дальней электропередаче (до УПК или за УПК);

U_i — напряжение в узле присоединения УПпК;

Q_p — мощность УПпК (любого типа).

Произведение матриц элементов цепочно соединенных четырехполюсников дает матрицу эквивалентного четырехполюсника

$$[\dot{A}] = \prod_{j=1}^m [\dot{A}_j]. \quad (4)$$

При представлении промежуточных отборов мощности, а также перетоков мощности между ПС и дальней ЛЭП и нагрузок в системе статическими характеристиками, последние ограничиваются аппроксимирующими полиномами второй степени [7] вида

$$\left. \begin{aligned} P_i &= a_0 + a_1 \cdot U_i + a_2 \cdot U_i^2; \\ Q_i &= b_0 + b_1 \cdot U_i + b_2 \cdot U_i^2; \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

где a_i и b_i — коэффициенты полиномов, которые зависят от состава потребителей.

Уравнения установившегося режима эквивалентного четырехполюсника можно представить в матрично-векторной форме

$$[I_i] = [A] \cdot \begin{bmatrix} \dot{U}_j \\ \dot{I}_j \end{bmatrix}; \quad (6)$$

$$[\dot{U}_i] = [A] \cdot \begin{bmatrix} \dot{U}_j \\ \dot{I}_j \end{bmatrix}; \quad (7)$$

$$\dot{U} \hat{I}_i = P_i - jQ_i. \quad (8)$$

Нагрузки и перетоки мощности могут быть представлены и постоянными величинами.

Расчет установившегося режима начинается с определения реактивной мощности, сопровождающей активную [8], и определения балансирующих мощностей в узлах системы. После этого, начиная с шин приемной системы № 2, последовательно в соответствии с рис. 1 и с учетом выражений (6—8) определяются параметры режима во всех узлах. При этом, для определения параметров установившегося режима четырехполюсника, замещающего участок дальней ЛЭП l_2 , используются параметры режима приемной системы P_2, Q_2, U_2, φ_2 , а для остальных четырехполюсников — найденные из расчета предыдущего четырехполюсника искомые параметры режима с учетом балансирующих мощностей. После окончания первого цикла итерации производится повторный цикл, предварительно определив уточненные параметры нагрузок, перетоков мощности и балансов мощности в узлах системы, и основным условием окончания расчета может служить неравенство $\varepsilon > 10^{-2} \div 10^{-4}$ (в зависимости от точности расчета), которое учитывает разность результатов параметров режима последнего цикла с предшествующим во всех узлах системы. В зависимости от схемы может быть 3—9 циклов. Для ускорения сходимости решения нелинейных уравнений вида (6—8) после третьего цикла можно применять ускоряющий шаг. Результаты расчета представлены в табл. 1 и 2.

Анализируя полученные результаты, при расчете параметров установившегося режима можно сделать вывод, что при поддержании напряжения на выводах УПК на одном уровне необходима различная величина поперечных компенсирующих устройств. При присоединении ПС к вводам УПК требуется меньшая реактивная мощность из ПС на вводе, чем из УПпК на выводе УПК. Перемещение УПК вместе с ПС от передающей № 1 к приемной системам № 2 приводит к уменьшению реактивной мощности УПпК на выводе и в режиме $P_{\text{пс}} > 0$ на вводе УПК, а в режимах $P_{\text{пс}} \leq 0$ приводит к увеличению реактивной мощности УПпК на вводе УПК. Присоединение ПС к выводам УПК приводит к тем же результатам, что и при присоединении ПС к вводам УПК. В режиме $P_{\text{пс}} = 0$ суммарная реактивная мощность УПпК не зависит от места присоединения ПС, в режимах $P_{\text{пс}} > 0$ требуется меньше суммарной реактивной мощности УПпК при присоединении ПС к вводам УПК, а в режимах $P_{\text{пс}} < 0$ требуется меньше установленной мощности УПпК при присоединении ПС к выводам УПК (табл. 1).

В компенсированной дальней электропередаче распределение напряжения и тока значительно зависит от места присоединения ПС: во всех режимах показатели U и I лучше при присоединении ПС к выводам УПК, за исключением режима $P_{\text{пс}} < 0$, в котором при перемещении ПС с УПК от передающей к приемной системам результаты несколько ухудшаются и лучшим режимом оказывается режим присоединения ПС к вводам УПК (табл. 2). Результаты расчета показали, что более благоприятен режим распределения U и I при присоединении ПС к вводам УПК наблюдается при $l_1 \leq 0,5l$.

Таблица 1

Параметры режима ПС	ПС присоединена к выводам УПК			ПС присоединена к вводам УПК			
	$P_{\text{пс}}$	0	0,2	-0,2	0	0,2	-0,2
$Y(l)$							
$Y_5(500)$	$-j 0,39$	$-j 0,36$	$-j 0,41$	$-j 0,39$	$0,2-j 0,25$	$-0,2-j 0,52$	
$Y_6(500)$	$-j 0,73$	$0,2-j 0,84$	$-0,2-j 0,62$	$-j 0,73$	$-j 0,73$	$-j 0,73$	
$Y_5(700)$	$-j 0,43$	$-j 0,32$	$-j 0,51$	$-j 0,43$	$0,2-j 0,21$	$-0,2-j 0,61$	
$Y_6(300)$	$-j 0,677$	$0,2-j 0,787$	$-0,2-j 0,577$	$-j 0,677$	$-j 0,677$	$-j 0,677$	
$Y_5(300)$	$-j 0,38$	$-j 0,39$	$-j 0,35$	$-j 0,38$	$0,2-j 0,29$	$-0,2-j 0,45$	
$Y_6(700)$	$-j 0,769$	$0,2-j 0,669$	$-0,2-j 0,669$	$-j 0,769$	$-j 0,769$	$-j 0,769$	

Таблица 2

Параметры режима	ПС присоединена к выводам УПК			ПС присоединена к вводам УПК		
	$P_{\text{пс}}$	0	0,2	-0,2	0	0,2
P_1	2,081	2,23	1,773	2,081	2,295	1,826
Q_1	0,265	0,162	0,382	0,265	0,117	0,289
U_1	1,03	0,992	1,01	1,03	1,014	1,025
φ_1	28°55'	28°55'	28°52'	28°55'	33°05'	27°35'
P_5	1,873	2,073	1,673	1,873	2,073	1,673
Q_5	0,11	0,25	-0,02	0,11	0,25	-0,02
U_5	1,009	1,008	1,012	1,009	1,009	1,009
φ_5	-0°41'	-3°44'	3°10'	-0°41'	-0°41'	-0°41'
P_5'	1,873	2,073	1,673	1,873	1,873	1,873
Q_5'	0,5	0,61	0,39	0,5	0,5	0,5
P_6	1,873	2,073	1,673	1,873	1,873	1,873
Q_6	-0,5	-0,61	-0,39	-0,5	-0,5	-0,5
U_6	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0
φ_6	27°45'	27°45'	27°45'	27°45'	27°45'	27°45'
P_6'	1,873	1,873	1,873	1,873	1,873	1,873
Q_6'	0,23	0,23	0,23	0,23	0,23	0,23
U_3	0,877	0,858	0,897	0,944	0,967	0,922
φ_3	27°40'	25°30'	29°50'	-1°6'	-3°5'	1°24'
P_3'	0,67	0,447	0,897	0,773	0,612	0,94
Q_3'	0,205	0,321	0,064	-0,1225	-0,263	-0,0276
U_3'	0,854	0,827	0,887	0,951	0,989	0,921
φ_3'	32°	28°30'	35°10'	3°4'	0°	6°44'

Примечание. Расчеты проводились при следующих условиях:

$$P_{\text{баз}} = P_{\text{нат}} = 891 \text{ мвт}, \quad U_0 = U_{\text{н}} = 500 \text{ кв}, \quad K_c = 50\%, \quad P_2 = 1,8; \quad U_2 = 1, \quad \varphi_2 = 0, \\ Q_2 = 0,06, \quad l_1 = l_2 = 500 \text{ км}.$$

На режим распределения U и I в рассматриваемой системе большое влияние оказывают виды УПК, а также электрическая «удаленность» источников питания ПС от точки присоединения к дальней электропередаче. Изменить распределение U и I в ПС можно присоединением компенсирующих устройств к месту присоединения ПС к дальней электропередаче или к обмотке низкого напряжения трансформатора связи. При расчетах УПК (любого типа) представлялись статическими характеристиками, полученными по дополнительным подпрограммам.

Выводы

1. Рассматриваемый алгоритм расчета установившегося режима дальней линии электропередачи учитывает распределенность параметров участков линии, нагрузки — заданной постоянными сопротивления-

ми или статическими характеристиками, а также установки продольной компенсации, к выводам которой присоединены ПС и различные типы УПК.

2. По характеристикам систем автоматического регулирования и параметрам можно судить о необходимости применения синхронного или статического компенсаторов, или шунтирующих реакторов.

3. Оптимальным режимом по распределению U и I является режим присоединения ПС к выводам УПК.

ЛИТЕРАТУРА

1. В. А. Веников, Л. А. Жуков. Регулирование режима электрических систем и дальних электропередач и повышение их устойчивости при помощи управляемых статических ИРМ. «Электричество», 1967, № 6.

2. М. С. Либкинд, Г. В. Михневич. Улучшение режима и повышение пропускной способности передач переменного тока с помощью управляемых ферромагнитных устройств. «Электричество», 1969, № 3.

3. Совместная работа дальних электропередач и промежуточных систем, под ред. В. К. Щербакова. Труды НЭТИ, т. 11, Новосибирск, 1961.

4. Д. И. Азарьев и др. Дальние электропередачи с промежуточными синхронными компенсаторами. «Электричество», 1955, № 4.

5. Г. Т. Адонц. Уравнения установившегося режима линии с распределенными параметрами. Известия АН Арм. ССР. Серия технических наук, 1971, № 1.

6. Г. Т. Адонц. Алгоритм расчета установившегося режима энергосистемы с учетом нелинейных характеристик генераторов и нагрузок. «Электричество», 1970, № 2.

7. Г. Е. Пospelов, В. Г. Федин. Влияние статических характеристик нагрузки на мощность компенсирующих устройств для регулирования напряжения в электрических сетях. Сб. докладов «Регулирование напряжения в электрических сетях», М., «Энергия», 1968.

8. В. А. Веников, И. П. Сиуда. Расчеты режимов дальних электропередач переменного тока. М., «Высшая школа», 1966.