

**УСЛОВИЯ ОГРАНИЧЕНИЙ И ФУНКЦИОНАЛЬНЫЕ
СООТНОШЕНИЯ МЕЖДУ ПЕРЕМЕННЫМИ ПАРАМЕТРАМИ
РЕЖИМОВ В МАТЕМАТИЧЕСКОМ ПРОГРАММИРОВАНИИ
ВЫБОРА УСТРОЙСТВ И УПРАВЛЕНИЯ РАБОТОЙ ДАЛЬНИХ
ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧ И ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СИСТЕМ**

Р. И. БОРИСОВ, С. Г. СЛЮСАРЕНКО

(Представлена научным семинаром кафедр электрических станций
и электрических систем и сетей)

Математические модели по выбору параметров элементов и управлению режимами работы объединениями энергосистем с дальними электропередачами переменного тока должны наиболее полно и точно отражать картину явлений реальной структуры, быть обозримыми, в нужной степени подробными и поддаваться исследованиям располагаемыми средствами. Детализация при этом должна быть достаточной для учета многообразия всех факторов, которые могут оказаться существенными, но не излишней, что только затруднит решение задач. Так должны выполняться определенные требования связности режимных условий, требований к параметрам оборудования, устойчивости параллельной работы по нагреву отдельных частей и т. д. Неучет этих факторов может оказаться существенным для жизнеспособности всей системы в определенных состояниях и в этом смысле такая детализация представляется совершенно необходимой.

Для решения поставленных задач по управлению и выбору параметров вводятся целевые и граничные условия. Критерии оптимальности при решении одной и той же задачи могут быть различными, тогда некоторые граничные условия могут выступать в качестве целевых функционалов. Не развивая далее вопросы о рациональных способах выбора целевых функционалов и их соотношениях [1] применительно к рассматриваемым задачам, остановимся на обоснованиях принятых форм записи уравнений граничных условий и функциональных соотношениях между основными и дополнительными переменными параметров режима.

**1. Ограничения к параметрам режима по условиям распределения
напряжения**

Распределение напряжений по длине линий для разных режимов весьма существенно влияет на технико-экономические показатели работы дальних электропередач переменного тока. По этому вопросу было выполнено большое число исследований [2, 3, 4] и сделаны важные выводы, в том числе о необходимости более глубокого регулирования напряжения для улучшения экономических показателей работы электропередач [4]. Условия безотказной работы устройств защиты от перенапряжений устанавливают допустимые верхние значения на-

пряжений в пределах (1,1±1,15) от номинального напряжения линий [5]. Нижние границы значений напряжений будут определяться регулировочными диапазонами трансформаторов и располагаемой реактивной мощностью. В силу этого нижние границы значений напряжений в работе не фиксируются, но считаются заданными.

Для решения поставленных задач оказывается необходимым определить, в каких пределах вариаций передаваемых активных и реактивных мощностей и электрических параметров электропередач принятые условия по напряжениям оказываются обеспеченными.

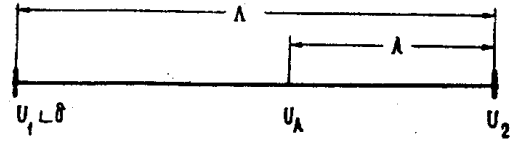


Рис. 1. К распределению напряжения по длине дальней ЛЭП

Если участок линии без потерь (рис. 1) имеет электрическую длину Λ , то распределение напряжения по длине λ , для заданных значений напряжений по концам (U_1 и U_2) записывается так:

$$|U_\lambda| = ((U_2 \cos \lambda + U_1 \sin \lambda \csc \Lambda \cos \delta - U_2 \sin \lambda \operatorname{ctg} \Lambda)^2 + (U_1 \sin \lambda \csc \Lambda \sin \delta)^2)^{1/2}, \quad (1)$$

где δ — угол сдвига векторов напряжений по концам.

Для определения местоположения и величины наибольшего значения $U_{\lambda m}$ производная $U_{(\lambda)}$ приравняется нулю:

$$\frac{dU_\lambda}{d\lambda}(\lambda, U_1, U_2, \Lambda) = 0$$

или

$$(U_2 \cos \lambda + U_1 \sin \lambda \csc \Lambda \cos \delta - U_2 \sin \lambda \operatorname{ctg} \Lambda)(-U_2 \sin \lambda + U_1 \csc \Lambda \cos \delta \cos \lambda - U_2 \cos \lambda \operatorname{ctg} \Lambda) + (U_1 \sin \lambda \csc \Lambda \sin \delta)^2 \cos \lambda = 0, \quad (2)$$

откуда

$$\operatorname{tg} 2\lambda_m = \frac{-2(U_1 U_2 \csc \Lambda \cos \delta - U_2^2 \operatorname{ctg} \Lambda)}{-U_2^2 + U_1^2 \csc^2 \Lambda - 2U_1 U_2 \csc \Lambda \operatorname{ctg} \Lambda \cos \delta + U_2^2 \operatorname{ctg}^2 \Lambda}. \quad (3)$$

Решение полученного уравнения (3) относительно λ_m производится в численном виде для электропередач разной электрической длины ($\Lambda = 15, 30, 45, 60^\circ$) и в некотором диапазоне изменения угла ($\delta = 10, 20, 30, 40, 50^\circ$). Условия по статической устойчивости при этом во внимание не принимались, поскольку они, как и все граничные условия, определяются самостоятельно и независимо. Величины $U_{\lambda m}$ получаются, если найденные значения по формуле (3) подставить в уравнение (1). Результаты расчетов позволяют судить о том, что значения напряжений экстремальной точки подвержены значительным колебаниям от изменений нагрузки и лежат в пределах (0,1—1,4) при изменении напряжений по границам в пределах (0,9—1,05). Так, для участков с электрической длиной $15^\circ \leq \Lambda \leq 30^\circ$ экстремумы находятся вне пределов участков и значение $U_{\lambda m}$ не превышает 1,411.

$$(\Lambda = 30^\circ; \quad \delta = 20^\circ; \quad \lambda_m = -38,48^\circ; \quad U_{m\lambda} = 1,333; \quad U_1 = 0,95;$$

$U_2 = 1,05$). Для участков $\Lambda = 45^\circ$ экстремумы располагаются внутри границ участка с наибольшим значением $U_{\lambda m} = 1,132$ ($U_1 = 1,05$; $U_2 = 1,05$; $\delta = 10^\circ$; $\lambda_m = 24,136$). Для участков $\Lambda = 60^\circ$ экстремальные точки располагаются снова вне границ участка, что гарантирует распределение напряжения в области граничных значений. Фиксирование различных значений напряжений по границам участков разной

длины позволяет управлять распределением напряжений электропередач для разных режимов.

2. Условия ограничений и функциональные соотношения между переменными параметрами синхронных турбогенераторов по нагреву статора и ротора для разных режимов

Для организации расчетов по управлению режимами и выбору параметров устройств дальних электропередач переменного тока с промежуточными системами требуется выразить внутренние параметры синхронных турбогенераторов (т. е. значения модуля и аргумента э. д. с. за синхронными сопротивлениями относительно напряжения на выводах) от модуля напряжения на выводах и отдаваемых мощностей. Это позволяет исключить эти переменные из уравнений малых колебаний при формировании ограничений по статической устойчивости и из уравнений функционала. По другой форме построения решений этих задач операции исключения делать не предполагается, но значения э. д. с. и внутренних углов выражаются в виде двусторонних неравенств. Поэтому верхние и нижние предельные значения э. д. с. и внутренних углов должны быть установлены.

Как известно, величины отдаваемых генераторами активных и реактивных мощностей элементарно выражаются от значения э. д. с. внутреннего угла, реактивности и напряжения на выводах. Внутренние параметры в виде значения э. д. с. и собственного угла δ не могут изменяться независимо. Они лимитируются по нагреву статора и ротора. При работе генераторов с индуктивной нагрузкой действие автоматических регуляторов возбуждения при стационарном изменении нагрузки обеспечивает поддержание напряжения на выводах генератора с некоторым значением коэффициента статизма (B_p) по мощности. Значение коэффициента (B_p) меняется в пределах от 1 до 5% и зависит от настройки и конструкции регулятора [6].

$$U = U_0(1 - B_p P), \quad (4)$$

где U_0 — напряжение холостого хода на выводах генератора.

Это соотношение позволяет определить напряжение на выводах генератора при различных значениях коэффициента (B_p) и вариациях отдаваемой активной мощности (при работе на индуктивную нагрузку), принимаемую в пределах от 1,0 до 0,3P ном. Соответствующие предельные значения реактивных мощностей при работе с индуктивной нагрузкой могут быть определены по кривым перегрузочных способностей с учетом нагрева [6]. Тогда наибольшие значения модуля э. д. с. при разных значениях предельной нагрузки и разных значениях коэффициента B_p находятся по известной формуле:

$$E = \left(\left(U + \frac{QX}{U} \right)^2 + \left(\frac{PX}{U} \right)^2 \right)^{1/2},$$

где X — синхронное сопротивление.

Зависимости $E_{г,р} = E_{г,р}(P)$ и $\delta_{г,р} = \delta_{г,р}(P)$ при разных значениях коэффициента (B_p) представлены на рис. 2. Рабочие значения мощностей и э. д. с. в эксплуатации могут быть меньше предельных, поскольку реактивная нагрузка генераторов определяется режимом потребителей и других источников реактивной мощности. Значения э. д. с. регулируемого генератора аппроксимируются линейным трехчленом

от отдаваемых мощностей и напряжений на выводах в области девяти смежных значений U, P и Q :

$$E = v_E U + \tau_E P + q_E P. \quad (5)$$

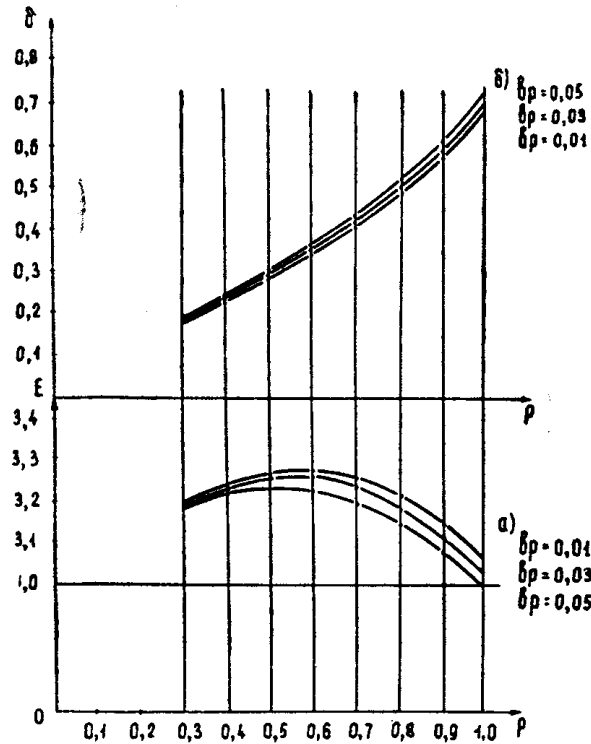


Рис. 2. Зависимости внутренних э.д.с. и углов генератора от P для различных коэффициентов по мощности

Определение коэффициентов линейной формы (5) произведено по методу наименьших квадратов [7] и выполнено по формулам:

$$\begin{aligned} v_E \sum U_i^2 + \tau_E \sum P_i U_i + q_E \sum Q_i U_i &= \sum E_i U_i, \\ v_E \sum Q_i P_i + \tau_E \sum P_i^2 + q_E \sum Q_i P_i &= \sum E_i P_i, \\ v_E \sum U_i Q_i + \tau_E \sum P_i Q_i + q_E \sum Q_i^2 &= \sum E_i Q_i. \end{aligned} \quad (6)$$

Результаты расчетов коэффициентов v_E , τ_E и q_E (для $B_p = 0,03$) представлены в табл. 1. Среднее значение ошибки приближения меньше 3%. Значения э.д.с. находятся в пределах:

$$1,66 = \underline{E} \leq E \leq \bar{E} = 3,25. \quad (7)$$

Известным образом может быть найдена совокупность значений собственных углов генераторных станций от напряжения и отдаваемых мощностей.

$$\delta = \arctg \frac{\frac{PX}{U}}{U + \frac{QX}{U}}. \quad (8)$$

Предельные значения собственных углов не зависят от коэффициента статизма регуляторов и могут изменяться в таких пределах:

$$0,18 = \underline{\delta} \leq \delta \leq \bar{\delta} = 0,92. \quad (9)$$

Для источников бесконечной мощности ограничения по нагреву снимаются и значения внутренних углов и э.д.с. могут быть больше указанных в формулах (7) и (9) предельных значений.

Таблица

P	U	Q	1,1	1,0	0,9	0,8	0,7	0,6	0,5	0,4	0,3
1,0	0,97						$V=2,97$		4,7309		
							$\pi=0,038066$		-2,314		
0,9	0,973						$q=0,0071518$		-0,0082909		
0,8	0,976										
0,7	0,97				$V=0,85638$		0,013216		-0,038489		
					$\pi=0,89464$		2,3170		2,3878		
0,6	0,982				$q=1,7609$		1,5357		1,4855		
0,5	0,985				$V=0,939955$		0,93937		0,94399		
0,4	0,988				$\pi=0,56741$		0,64516		0,79845		
0,3	0,991				$q=1,86$		1,8234		1,6798		

При работе дальних электропередач в режимах малых нагрузок может возникнуть небаланс по реактивной мощности в отдельных частях или объединении энергосистем, что приведет к повышению напряжения сверх предельно допустимых значений. Для снижения или исключения этого недопустимого явления наряду с уставкой и регулированием поперечных КУ может быть использована способность крупных турбогенераторов работать в области недовозбуждения [8]. Как известно, это вызывает опасность местных перегревов крайних пакетов лобовых частей статора и ухудшений условий статической устойчивости [9]. Однако, как указывается в [8], в течение длительного периода можно практиковать работу генераторов в зоне недовозбуждения. В таких режимах нагрев крайних пакетов лобовых частей должен находиться в допустимых пределах. Условия работы по статической устойчивости в области недовозбуждения оказываются тяжелее, поскольку это соответствует большим значениям внутренних углов, чем при работе с индуктивной нагрузкой. Приходится снижать активную нагрузку. Это однако соответствует условиям, при которых генераторы оказываются в таких режимах. Кроме того, условия по статической устойчивости для решения поставленных задач формируются независимо как по колебательной, так и апериодической формам неустойчивости искомых режимов. Поэтому предельная нагрузка генераторов по нагреву при работе в области недовозбуждения, без учета предела по статической устойчивости и самораскачивания может определяться по кажущейся мощности [9] и номинальному напряжению. Это позволяет определить предельные значения внутренней э.д.с. по модулю и аргументу и произвести аппроксимацию э.д.с., но естественно с другими

значениями коэффициентов (π) и (q). Значения коэффициентов (π) и (q) рассчитываются тоже по методу наименьших квадратов.

Предельные значения модуля и аргумента э.д.с. определяют область допустимых их рабочих значений при работе в области недо возбуждения

$$0,832 = \underline{E}' \leq E \leq \bar{E} = 2,091 \quad (10)$$

$$0,024 = \underline{\delta} \leq \delta \leq \bar{\delta} = 1,34 \quad (11)$$

3. Условия ограничений по уровню токов коротких замыканий к параметрам реактивностей связей дальних электропередач с промежуточной и приемной системами

Уравнения сетевых мощностей можно записать для состояния сети практически любой известной конфигурации и сложности, в том числе для элементов и их совокупностей в промежуточных и приемной системах. Для решения поставленных задач промежуточные и конечные энергосистемы должны замещаться не частными схемами, а достаточно обобщенной формой. Такая форма может быть получена из условий ограничений токов трехфазного к.з. в рассматриваемой системе. Требования ограничений токов коротких замыканий в конечных и промежуточных системах являются одним из требований надежности электроснабжения [10]. Они могут рассматриваться в виде дополнительной составляющей приведенных затрат, поскольку их реализация в системах означает внедрение целого ряда мероприятий, связанных с затратами материальных ценностей. Эти требования ограничений по т.к.з. могут реализоваться разными средствами и способами. Для сопоставления их эффективности и определяются приведенные затраты. С другой стороны, если задачи выбора средств ограничений т.к.з. в расчетах не ставятся, то можно не заниматься их экономическим эквивалентированием, а требования ограничений считать за технические положения в виде определенных нормативных условий. В таком виде требования ограничений по т.к.з. сводятся при заданной мощности источников к установлению определенных величин разделяющих реактивных сопротивлений между генераторами системы и точкой к.з. Так, для схемы на рис. 2 из статьи [11], помещенной в этом сборнике, при трехфазном кз в узлах 6 и 7 может быть установлено значение сверхпереходного тока и расчетной эквивалентной реактивности внешней части схемы по отношению рассматриваемой системы и собственно ее источников питания

$$I_*'' = \frac{S_{кз}^{II}}{S_{не}} \rightarrow X_{p*} (н) \text{ (по кривым изменения т.к.з. [12])},$$

$$X_{p*} (б) = X_{p*(н)}^{II} \frac{S_б}{S_{не}},$$

где $S_{не}$ — суммарная номинальная мощность всех источников,
 $S_б$ — базисная мощность.

Полагая, что относительные параметры элементов внешней и внутренней частей одинаковы, можно произвести деление результирующей реактивности $X_{p*(б)}$ обратно пропорционально мощностям внешних и собственных источников питания.

$$X_{(б)}^{II} = \frac{X_c^{II} X_{вн}^{II}}{X_c^{II} = X_{вн}^{II}}, \quad (12)$$

$$X_c^{II} = X_{c(n)}^{II} \frac{S_6}{S_{nc}}, \quad (13)$$

$$X_{вн}^{II} = X_{вн(n)}^{II} \frac{S_6}{S_{вн(n)}}. \quad (14)$$

Полагая $X_{вн(n)}^{II} = X_{c(n)}^{II}$, получим

$$S_c X_c^{II} = X_{вн}^{II} S_{вн}. \quad (15)$$

Решая уравнения (12) и (15) относительно X_c^{II} , находим реактивность, которая должна приходиться на долю данной системы:

$$X_c^{II} = X_6^{II} \left(1 + \frac{S_{вн}}{S_c} \right). \quad (16)$$

Системная реактивность X_c^* в свою очередь разделяется на две последовательные части $X_{r(n)}^*$ и $X_{c(\Delta)}$. Поскольку число генераторов в приемной системе для каждого расчетного режима предполагается известным, оказывается возможным определить результирующую реактивность, которая приходится на долю генераторов

$$X_{r(n)}^{II} = \frac{X_r^{II}}{n}.$$

Остальная реактивность $X_c(\Delta)$ находится по формуле последовательного сложения

$$X_c(\Delta) = X_c^{II} - X_{r(n)}^{II}.$$

Для расчетов нормальных режимов значение $X_{r(n)}^*$ заменяется на $X_{r(n)}$ по синхронной реактивности генераторов. Расчеты параметров $X(\Delta)$ для промежуточных и приемных систем выполняются в специальной подпрограмме.

ЛИТЕРАТУРА

1. Д. А. Арзамасцев, А. Л. Мызин, Ю. С. Скляр. Задачи оптимального развития энергосистемы. Учебное пособие. Свердловск, 1969.
2. В. А. Венников, Д. В. Холмский. О работе дальних электропередач в режиме оптимальных напряжений. НДВШ, «Энергетика», 1959, № 3.
3. В. А. Венников, И. П. Сиуда. Расчеты режимов дальних электропередач переменного тока. «Высшая школа», 1966.
4. В. А. Венников. К вопросу о влиянии глубокого регулирования напряжения дальних электропередач сверхвысокого напряжения на технико-экономические показатели их работы. НДВШ, «Энергетика», 1958, № 3.
5. Техника высоких напряжений. Под общей редакцией Д. В. Разевига. М.—Л., «Энергия», 1964.
6. И. Д. Маркович. Режимы энергетических систем. М., «Энергия», 1969.
7. Б. М. Шиггелев. Математическая обработка наблюдений. М., «Наука», 1969.
8. W. Y. Valet and R. L. Webb. Reactive Power and Its Control in a Large Metropolitan Electric Supply System. PAS-87, pp. 49—53.
9. Н. А. Поляков. Современные крупные двухполюсные турбогенераторы. М., «Энергия», 1972.
10. Р. И. Борисов, В. Д. Козырев. К оценке целесообразного значения токов короткого замыкания. «Электричество», 1968, № 8.
11. Р. И. Борисов. Управление режимами работы по реактивной мощности объединений энергосистем с дальними электропередачами переменного тока. Статья в этом сборнике.
12. С. А. Ульянов. Электрoмагнитные переходные процессы в электрических системах. М., «Энергия», 1964.