

Р. А. АМИРИКЯН

ОБ ОДНОМ МЕТОДЕ МИНИМИЗАЦИИ ПОТЕРЬ АКТИВНОЙ МОЩНОСТИ В ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СЕТЯХ

Постановка задачи. Принимаются заданными: параметры l и x элементов сети и коэффициенты трансформации ветвей, содержащих элемент трансформации; величины активных и реактивных мощностей нагрузочных узлов; ограничения по активным мощностям генерирующих узлов, включая и балансирующий, в виде неравенств $P_{k \min} < P_k \leq P_{k \max}$, где $k = 1 \dots n$ (n — число генераторов); начальный стационарный режим (P_k, Q_k) и соответствующие потери активной мощности (π). Требуется минимизировать величину потерь активной мощности путем перераспределения активных мощностей генерирующих узлов.

Алгоритм расчета. Сначала определяется вектор-градиент $\nabla = \left| \frac{\Delta \pi}{\Delta P_k} \right|$. Для этого k -ому генераторному узлу дается приращение мощности ΔP_k и производится расчет стационарного режима и потерь активной мощности ($\Delta \pi$) при условии постоянства активных мощностей в остальных генерирующих узлах, кроме балансирующего [1]. Очевидно, что приращение ΔP_k вызывает изменение всех зависящих параметров уравнений рассматриваемой системы, которые в свою очередь соответствующим образом влияют на величину потерь. Следовательно, отношение $\Delta \pi / \Delta P_k$, т. е. приближенное значение частной производной потерь активной мощности по изменению активной мощности k -го генерирующего узла, определяется с учетом влияний всех переменных величин уравнений системы. Точность определения на ЭВМ частных производных потерь от активной мощности указанным способом зависит от величины приращения активной мощности ΔP_k . Исследования показали, что величина приращения аргумента (ΔP_k), обеспечивающая наиболее точное определение частной производной в зависимости от самого аргумента, зависит от формы минимизируемой функции. Зависимость величины потерь от мощности отдельных генерирующих узлов при фиксации величин мощностей во всех остальных узлах имеет вид, близкий к параболической функции. В частности, для таких функций, как показали исследования и анализ проведенных расчетов, частная производная от потерь активной мощности наиболее точно может быть

определена на ЦВМ при выборе приращения мощности по формуле $\Delta P_k = |c| P_k$. Относительно хорошие результаты получились при $c = 0,4$. Таким образом, для выбора величины приращения мощности при расчете частных производных на ЦВМ рекомендуется формула

$$\Delta P_k = 0,63 |P_k|, \quad (1)$$

обеспечивающая нахождение частных производных, величины которых практически совпадают с величинами частных производных, определенных точными формулами [2]. В отличие от обыкновенного градиентного метода частная производная $\Delta \pi / \Delta P_k$ определяется только для тех случаев, когда приращение потерь от положительного или отрицательного приращения мощности ΔP_k получается отрицательным (т. е. $\Delta \pi < 0$). В противном случае рассматриваемый генерирующий узел исключается от участия в перераспределении мощностей на данном этапе минимизации потерь.

Описанный выше анализ производится для всех генерирующих узлов. На данном этапе минимизации потерь в перераспределении мощностей не участвуют также те генерирующие узлы, для которых $\left| \frac{\Delta \pi}{\Delta P_k} \right| < \varepsilon$, ибо считается, что при этом рассматриваемый генератор работает в относительно оптимальном режиме. Здесь ε — заранее выбранное маленькое число, определяющее точность расчета. В наших расчетах принято $\varepsilon = 0,003$.

Прежде чем дать положительное или отрицательное приращение мощности k -го генерирующего узла, проверяется условие:

- а) при положительном приращении $P_k < P_{k \max}$,
- б) при отрицательном приращении $P_k > P_{k \min}$.

Если условия (2) не выполняются, то мощности рассматриваемого генерирующего узла соответствующее приращение не дается, и этот генератор на данном этапе минимизации потерь так же не участвует в перераспределении активных мощностей. Заметим, что частные производные от потерь активной мощности для всех генерирующих узлов определяются для одного и того же исходного режима. Предполагая, что генераторы, участвующие в перераспределении активных мощностей на данном этапе минимизации потерь, заменяются одним эквивалентным генератором, можно писать следующее равенство относительно средних значений градиентов

$$\frac{\sum_{i=1}^r |\Delta \pi|}{\sum_{k=1}^r |\Delta P_k|} = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^r \left| \frac{\Delta \pi}{\Delta P_k} \right|, \quad (3)$$

Здесь $k \neq j$ и $k \neq l$, где j — номер балансирующего узла; l — номера тех генерирующих узлов, которые на данном этапе минимизации потерь

ие участвуют в перераспределении активных мощностей, а n — число генераторов, участвующих на данном этапе в перераспределении мощностей. Равенство (3) будет правильным лишь тогда, когда отношения $\Delta\pi/\Delta P_k$ приведены к общему знаменателю. Из равенства (3) определяется приращение мощности $\sum_{k=1}^r |\Delta P_k|$, которое необходимо дать рассматриваемой системе (эквивалентному генератору), чтобы получить тот эффект минимизации потерь активной мощности, который получится, если каждому генератору дать приращения ΔP_k , определенные по формуле (1), т. е.

$$\sum_{k=1}^r |\Delta P_k| = \frac{\sum_{i=1}^r |\Delta\pi|}{\frac{1}{n} \sum_{k=1}^r \left| \frac{\Delta\pi}{\Delta P_k} \right|}, \quad (k \neq i; k \neq l) \quad (4)$$

Отсюда определяется величина градиентного шага. Для получения большего эффекта необходимо величину градиентного шага взять большей, но чрезмерное увеличение этого шага может привести к отрицательному эффекту. На основе проведенных исследований для выбора величины градиентного шага рекомендуется следующая формула:

$$|\Delta P| = n \sum_{k=1}^r |\Delta P_k| \quad \text{или} \quad \Delta P = \frac{\sum_{i=1}^r \Delta\pi}{\frac{1}{n} \sum_{k=1}^r \left| \frac{\Delta\pi}{\Delta P_k} \right|}, \quad (5)$$

где $k \neq i; k \neq l$.

Доля приращения мощности каждого генераторного узла определяется так:

$$\begin{aligned} \Delta P_k &= \Delta P \cdot \frac{\frac{\Delta\pi}{\Delta P_k}}{\sum_{k=1}^r \left| \frac{\Delta\pi}{\Delta P_k} \right|} = \\ &= \frac{\sum_{i=1}^r \Delta\pi}{\left(\frac{1}{n} \sum_{k=1}^r \left| \frac{\Delta\pi}{\Delta P_k} \right| \right)^2} \cdot \frac{\Delta\pi}{\Delta P_k}, \quad (k \neq i; k \neq l) \end{aligned} \quad (6)$$

Таким образом, мощность каждого генерирующего узла на $i+1$ шаге итерации определяется как

$$P_k^{i+1} = P_k^i + \Delta P_k^i \quad (7)$$

с обязательным соблюдением условий ограничения по мощности как для каждого k , так и для балансирующего узла, т. е.

$$P_{k\min} \leq P_k^i \leq P_{k\max} \quad (8)$$

$$\left| \sum_{k=1}^r \Delta P_k \right|_{\Delta P_k < 0} \leq P_{\Delta\max} - \left(P_b^i - \sum_{k=1}^r \Delta P_k \right)_{\Delta P_k > 0} + |\Delta\pi|_{\text{ок}} = A; \quad (9)$$

($k \neq b; k \neq l$)

$$\left| \sum_{k=1}^r \Delta P_k \right|_{\Delta P_k > 0} \leq \left(P_b^i - \sum_{k=1}^r \Delta P_k \right)_{\Delta P_k < 0} - P_{\min} - |\Delta\pi|_{\text{ок}} = B, \quad (10)$$

($k \neq b; k \neq l$)

где $\Delta\pi_{\text{ок}}$ — ожидаемое снижение потерь в результате минимизации. Так как заранее невозможно определить величину $\Delta\pi_{\text{ок}}$, то рекомендуется брать $\Delta\pi_{\text{ок}} \approx 0,1$. Это практически выполняется уменьшением $P_{\max}$ и увеличением $P_{\min}$ на величину 10% от π . В случае несоблюдения условия (8) взамен P_k^i , подсчитанной по формуле (7), берется граничное значение ($P_{k\min}$ или $P_{k\max}$). В случае несоблюдения условия (9) или (10) производится коррекция приращений мощностей ΔP , соответственно по формулам:

а) Для отрицательных приращений мощностей

$$\Delta P_{k\text{кор}} = \frac{\Delta P_k}{\left| \sum_{k=1}^r \Delta P_k \right|} A, \quad (11)$$

где $k \neq b; k \neq l$ и k не равняется номером тех узлов, для которых $\Delta P_k > 0$;

б) Для положительных приращений мощностей

$$\Delta P_{k\text{кор}} = - \frac{\Delta P_k}{\sum_{k=1}^r \Delta P_k} B, \quad (12)$$

где $k \neq b; k \neq l$ и k не равняется номером тех узлов, для которых $\Delta P_k < 0$.

После определения величин новых значений мощностей отдельных генерирующих узлов производится расчет стационарного режима и потерь активной мощности. Расчет считается законченным, когда для всех генерирующих узлов частные производные потерь от активной мощности получаются меньшими или равными заранее заданному числу, или же когда балансирующий или все остальные генераторы работают предельными ($P_{\max}$ или $P_{\min}$) мощностями.

Результаты расчетов, выводы. В табл. 1 иллюстрирован начальный стационарный режим и результаты расчетов минимизации потерь

Таблица 1

Варианты, режимы			Узлы (k)									
			Генераторы				Нагрузки				Потери	
			1	2	3	4	5	6	7	8	актив- ные (МВт)	реак- тивное (Мвар)
0	Начальный режим	$\angle$ рад	-0,522	-0,754	0	0,027	-0,635	-0,694	-0,300	-0,208	45,8	279,6
		$E, U_{кв}$	251,0	256,5	259,0	227,0	220,0	220,0	223,1	211,0		
		P МВт	157,8	-54,6	259,9	418,0	-229,9	-116,9	64,7	-322,8		
		Q Мвар	138,1	137,4	177,6	87,3	-79,5	-57,7	-32,4	-81,2		
1	Ограничения	P_{max}	180	-10	355	450	—	—	—	—		
		P_{min}	130	-70	195	360	—	—	—	—		
	Результаты решения	$\angle$ рад	-0,347	-0,555	0	-0,024	-0,492	-0,51	-0,251	-0,224	37,2	141,9
		$E, U_{кв}$	251,0	266,5	259,0	227,0	226,7	229,3	231,4	215,6		
		P МВт	180,0	-10,0	234,5	360,0	-229,9	-116,9	-64,7	-322,8		
		Q Мвар	108,0	107,9	135,6	50,2	-79,5	-57,7	-33,4	-81,2		
II	Ограничения	P_{max}	250	-10	355	460	—	—	—	—		
		P_{min}	130	-70	145	259	—	—	—	—		
	Результаты решения	$\angle$ рад	0,238	-0,528	0	-0,240	-0,440	-0,514	-0,305	-0,371	21,4	129,8
		$E, U_{кв}$	251,0	266,5	259,0	227,0	227,7	231,1	234,2	218,1		
		P МВт	238,3	-10,0	277,4	250,0	-229,9	-116,9	-64,7	-322,8		
		Q Мвар	108,1	102,7	137,9	35,4	-79,5	-67,7	-32,4	-81,2		

активной мощности для одной объединенной энергосистемы, эквивалентированной до восьмилюлосника. Пример расчета выполнен для двух вариантов ограничения активных мощностей генерирующих узлов, включая и балансирующий узел. В качестве балансирующего принят третий узел. Заметим, что в этом примере ограничения по реактивным мощностям генерирующих узлов и по напряжениям нагрузочных узлов не ставились. Напряжения генерирующих узлов считались строго заданными. Расчеты выполнены на ЦВМ „УРАЛ-3“ программой, реализующей предлагаемый алгоритм. Анализируя результаты расчетов, приведенные в табл. 1, можно сделать следующие выводы.

1. В первом варианте расчетной потери активной мощности уменьшаются до 30,2 МВт. Дальнейшее уменьшение потерь активной мощности прекращается из-за ограничений, наложенных на мощности генераторов 1, 2 и 4.

2. Во втором варианте расчетной из-за увеличения пределов мощностей, развиваемых генераторами 1 и 4, потери активной мощности уменьшаются до 21,4 МВт, т. е. уменьшается более, чем на 50% от первоначальных потерь. Дальнейшее уменьшение потерь активной мощности прекращается, так как генераторы 2 и 4 работают предельными мощностями, а генератор 1 работает в режиме, когда приращение его мощности (независимо от знака приращения) приводит к увеличению потерь активной мощности.

3. С уменьшением потерь активной мощности как и следовало ожидать, уменьшаются также потери реактивной мощности и улучшаются условия работы системы по напряжению.

Время решения задачи на ЦВМ „УРАЛ-3“ рассмотренного примера составило 3 мин 24 сек при I варианте и 10 мин 30 сек — при II варианте. В составленной программе использована программа расчета стационарных режимов, разработанная в АрмНИИЭ [3].

АрмНИИЭ

Поступило 12.XI.1970

Ռ. Ա. ԱՄԻՐՅԱՆ

ԷԼԵԿՏՐԱԿԱՆ ՑԱՆՑԵՐՈՒՄ ԱԿՏԻՎ ԿՈՐՐԵԿՏՆԵՐԻ ՄԵԽԱՆԻԿԱԿԱՆ ԵՎ ՄԵԹՈԴԻ ԳԵՐԱՔԵՐՅԱԼ

Ա Վ Փ Ո Փ Ո Ւ Մ

Դիտվում է աղտիվ հզորության կորուստների մինիմիզացիայի խնդիրը գեներացնող հանգույցների աղտիվ հզորությունների վերաբաշխման ուղիով հաշվի առնելով սահմանափակումներն ըստ աղտիվ հզորությունների խնդիրը լուծվում է գրադիենտների և աֆենարադ իջեցման մեթոդների հիման վրա: Առաջարկված է ալգորիթմ, որի հիմնական առանձնահատկություններից մեկն այն է, որ հնարավոր է նրա օգտագործումը (ու մեծ փոփոխություններ

մացնելուց հետո) էներգահամակարգի սեփական կոմպլեքսային օպտիմիզացիան խնդրում հաշվի առնելով տեղիվ հզորության կորուստները նրա ցանցերում: Տրված է խնդրի լուծման օրինակ մի միավորված էներգահամակարգի համար, որը բերված է $n=8$ համարժեք բաղադրիչների տեսքի:

Л И Т Е Р А Т У Р А

1. Шахноян В. С. Метод и алгоритм вычисления частных производных электрических потерь в сложных сетях энергосистем на электронных цифровых машинах. „Электричество“, № 12, 1960.
2. Аюцу Г. Т. Исследование двух алгоритмов расчета частных производных от потерь активной и реактивной мощности по параметрам режима энергосистемы. „Известия АН Арм. ССР (серия Т. Н.)“, т. XXII, № 6, 1969.
3. Аюцу Г. Т. Алгоритм расчета установившегося режима энергосистемы с учетом нелинейных характеристик генераторов и нагрузок. „Электричество“, № 3, 1970.