ՀԱՅԿԱԿԱՆ ՍՍՀ ԳԻՏՈՒԹՅՈՒՆՆԵՐԻ ԱԿԱԴԵՄԻԱՅԻ ՏԵՂԵԿԱԳԻՐ
ИЗВЕСТИЯ АКАДЕМИИ НАУК АРМЯНСКОЙ ССР

Տեխնիկական գիտութ. սերիա XXXI, № 4, 1978 Серия технических наук

ЭНЕРГЕТИКА

М. А. БАЛАБЕКЯН, Г. С. ХАЧАТРЯН

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ СХОДИМОСТИ МОДИФИЦИРОВАННОГО МЕТОДА НЬЮТОНА ПРИ РЕШЕНИИ УРАВНЕНИЙ УСТАНОВИВШИХСЯ РЕЖИМОВ МЕТОДОМ ДЕКОМПОЗИЦИИ

Управление режимами энергосистем невозможно без получения необходимых исходных параметров, что связано с расчетами их установившихся режимов. При решении уравнений установившихся режимов (УУР) электроэнергетических систем важное место занимает обеспечение их надежной сходимости. В последнее время при расчете установившегося режима на ЦВМ (при Y или Z форме задания состояния сети) широко применяется метод Ньютона-Рафсона, важнейшим преимуществом которого является быстрая сходимость.

Приложение метода Ньютона-Рафсона применительно к системам нелинейных уравнений приводит к итеративной схеме, вычисленной по рекуррентной формуле

$$X^{(k+1)} = X^{(k)} - W^{-1}(X^{(k)}) \cdot \Phi(X^{(k)}), \qquad (1$$

где W—квадратичная матрица Якобсона с соответствующими элементами $W_{ij} = \partial\Phi_i/\partial X_j$, представляющими тангенсы углов наклона касательных гиперплоскости в n-мерном пространстве.

Отмеченный метод свободен от недостатков, присущих другим, а именно, выбора места балансирующего узла, трудности сходимости режимов, близких к пределу статистической устойчивости. Кроме этого, учет ветвей с отрицательными сопротивлениями не вызывает затруднения.

Существенное влияние на поведение сходимости итерационного расчета оказывает характер функции $\Phi(X)$. Близость функции $\Phi(X)$ к линейной обеспечивает быструю и надежную сходимость итераций.

Затраты машинного времени на одну итерацию методом Ньютона-Рафсона находятся в линейной зависимости от числа узлов рассматриваемой системы. В то же время, как показали экспериментальные исследования, количество итераций, необходимых для получения решения задачи расчета установившихся режимов, не зависит от размерности системы. Из этого следует, что расчет УУР больших электроэнергетических систем целесообразно осуществить методом Ньютона-Рафсона. Однако, одним из основных причин, ограничивающих применение отмеченного метода при Z-форме задания состояния сети, являет-ся требование большого объема памяти ЦВМ.

Представление больших электроэнергетических систем, как совокупности радиально связанных подсистем, обеспечивает значительное уменьшение количества вычислительных операций и занимаемого объема памяти ЦВМ, поэтому указанный принцип открывает широкие перспективы применения метода Ньютона-Рафсона для решения УУР больших электрических систем. Такой подход позволяет задачу расчета установившихся режимов рассмотреть как совокупность решений соответствующих задач для отдельных подсистем. При этом, предварительное определение установившегося режима каждой предыдущей подсистемы рассматривается как исходное для предварительного расчета установившегося режима каждой последующей подсистемы [1]

$$\begin{bmatrix} I_{a_{i_1}} \\ \hline I_{p_{i_1}} \end{bmatrix}^{k+1} = \begin{bmatrix} I_{a_{i_1}} \\ \hline I_{p_{i_1}} \end{bmatrix}^{k} - \left[\begin{array}{c|c} \partial\Phi^{(k)}_{p_{i_1}}/\partial I^{(k)}_{a_{i_1}} & \partial\Phi^{(k)}_{p_{i_1}}/\partial I^{(k)}_{p_{i_1}} \\ \hline \partial\Phi^{(k)}_{q_{i_1}}/\partial I^{(k)}_{a_{i_1}} & \partial\Phi^{(k)}_{q_{i_1}}/\partial I^{(k)}_{p_{i_1}} \end{array}\right]^{-1} \times$$

$$\times \begin{bmatrix} \Phi^{(k)}_{p_{i_1}}(I_{a_{i_1}}, I_{p_{i_1}}) \\ \hline \Phi^{(k)}_{q_{i_1}}(I_{a_{i_1}}, I_{p_{i_1}}) \end{bmatrix}, \tag{2}$$

— — — — — — — — — — — — — — — — — — — —

$$\begin{bmatrix} I_{a_{i_N}} \\ \hline I_{p_{i_N}} \end{bmatrix}^{k+1} = \begin{bmatrix} I_{a_{i_N}} \\ \hline I_{p_{i_N}} \end{bmatrix}^{k} - \left[\begin{array}{c|c} \partial\Phi^{(k)}_{p_{i_N}}/\partial I_{a_{i_N}} & \partial\Phi^{(k)}_{p_{i_N}}/\partial I^{(k)}_{p_{i_N}} \\ \hline \partial\Phi^{(k)}_{q_{i_N}}/\partial I_{a_{i_N}} & \partial\Phi^{(k)}_{q_{i_N}}/\partial I^{(k)}_{p_{i_N}} \end{array}\right]^{-1} \times$$

$$\times \begin{bmatrix} \Phi^{(k)}_{p_{i_N}}(I_{a_{i_N}}, I_{p_{i_N}}) \\ \hline \Phi^{(k)}_{q_{i_N}}(I_{a_{i_N}}, I_{p_{i_N}}) \end{bmatrix}.$$

Здесь $I_{a_{i_1}}, \cdots, I_{a_{i_N}}$ и $I_{p_{i_1}}, \cdots, I_{p_{i_N}}$ — активные и мнимые составляющие узловых токов, соответственно, 1-ой и N-ой подсистем.

При построении процесса Ньютона-Рафсона, когда энергосистема представляется в виде совокупности радиально связанных подсистем, обращаются матрицы сравнительно мелких порядков. Однако, с точки зрения затрат машинного времени вычисления, существенным неудобством остается необходимость для каждой итерации заново вычислить обратную матрицу Якобсона.

Известно, что если обратная матрица Якобсона непрерывна в окрестности искомого решения и начальное приближение достаточно близко к искомому, то приближенно можно получить [2]:

$$W^{-1}(X^{(k)}) = W^{-1}(X^{(0)}). \tag{3}$$

Следовательно, модифицированный метод Ньютона (метод Ньютона-Канторовича) можно представить в следующем виде:

$$X^{(k+1)} = X^{(k)} - W^{-1}(X^{(0)})\,\Phi(X^{(k)}). \tag{4}$$

Распространяя этот метод в уравнениях установившихся режимов больших электрических систем, когда последние представляются в виде совокупности радиально связанных подсистем, получим:

$$\begin{bmatrix} I_{a_{i_1}} \\ \hline I_{p_{i_1}} \end{bmatrix}^{k+1} = \begin{bmatrix} I_{a_{i_1}} \\ \hline I_{p_{i_1}} \end{bmatrix}^{k} - \left[\begin{array}{c|c} \partial\Phi^{(0)}_{p_{i_1}}/\partial I^{(0)}_{a_{i_1}} & \partial\Phi^{(0)}_{p_{i_1}}/\partial I^{(0)}_{p_{i_1}} \\ \hline \partial\Phi^{(0)}_{a_{i_1}}/\partial I^{(0)}_{a_{i_1}} & \partial\Phi^{(0)}_{a_{i_1}}/\partial I^{(0)}_{p_{i_1}} \end{array}\right]^{-1} \times \begin{bmatrix} \Phi^{(k)}_{p_{i_1}}(I_{a_{i_1}}, I_{p_{i_1}}) \\ \hline \Phi^{(k)}_{a_{i_1}}(I_{a_{i_1}}, I_{p_{i_1}}) \end{bmatrix}, \tag{5}$$

$$\begin{bmatrix} I_{a_{i_N}} \\ \hline I_{p_{i_N}} \end{bmatrix}^{k+1} = \begin{bmatrix} I_{a_{i_N}} \\ \hline I_{p_{i_N}} \end{bmatrix}^{k} - \left[\begin{array}{c|c} \partial\Phi^{(0)}_{p_{i_N}}/\partial I^{(0)}_{a_{i_N}} & \partial\Phi^{(0)}_{p_{i_N}}/\partial I^{(0)}_{p_{i_N}} \\ \hline \partial\Phi^{(0)}_{a_{i_N}}/\partial I^{(0)}_{a_{i_N}} & \partial\Phi^{(0)}_{a_{i_N}}/\partial I^{(0)}_{p_{i_N}} \end{array}\right]^{-1} \times \begin{bmatrix} \Phi^{(k)}_{p_{i_N}}(I_{a_{i_N}}, I_{p_{i_N}}) \\ \hline \Phi^{(k)}_{a_{i_N}}(I_{a_{i_N}}, I_{p_{i_N}}) \end{bmatrix}.$$

При расчетах УУР электрических систем начальные приближения неизвестных всегда можно принять достаточно близко к искомому, в

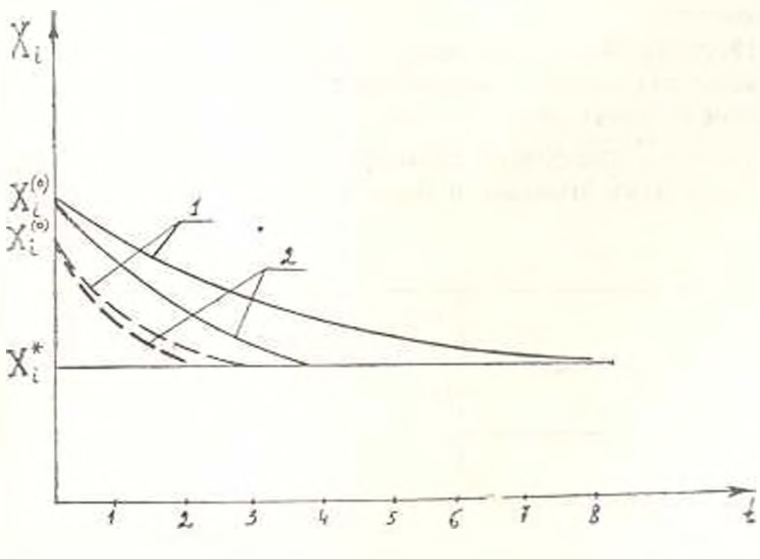

Рис. 1. Зависимость сходимости решения от времени для схем из 25 узлов (пунктирные кривые) и 51 узла (сплошные кривые) по методам: 1 — Ньютона–Рафсона; 2 — Ньютона–Канторовича.

связи с чем практически всегда можно гарантировать его сходимость. Поэтому целесообразно задачу установившихся режимов больших электрических систем решать по модифицированному методу Ньютона, сэкономив при этом машинное время вычисления.

По методу Ньютона-Канторовича для ЦВМ ЕС-1020 разработано «Фортран»-программа и проведены исследования сходимости на раз-

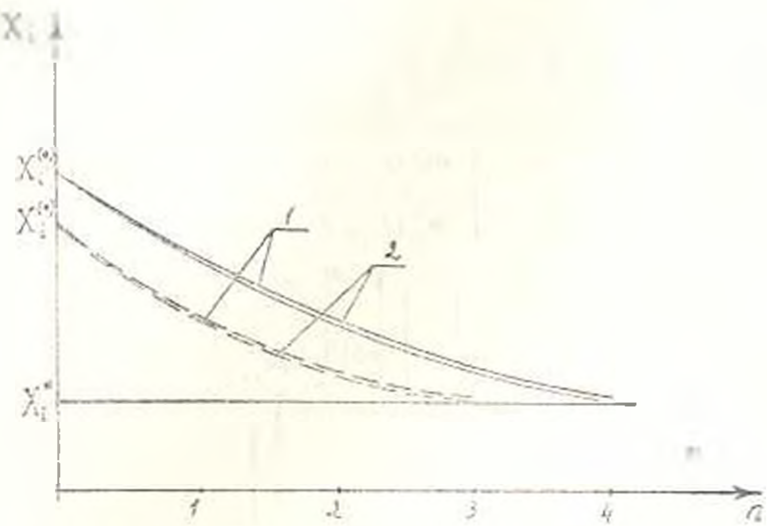

Рис. 2. Зависимость сходимости решения от числа итераций. Обозначения аналогичны рис. 1.

личных системах. Результаты исследований утвердили вышесказанное предположение. Отметим, что во всех расчетах модифицированный метод Ньютона обеспечивал устойчивую и быструю сходимость и по сравнению с методом Ньютона-Рафсона машинное время вычислений сократилось в (2—4) раза.

В таблице 1 приводится сравнение машинного времени при решении УУР методами Ньютона и Ньютона-Канторовича.

Таблица 1

Число узлов	Требуемое машинное время в мин.	
	Метод Ньютона-Рафсона	Метод Ньютона-Канторовича
25	3	2
51	8	3,5
75	12	4,5
101	15	5

Процесс сходимости в зависимости от времени и количества итераций для ряда энергосистем, представлен на рис. 1, 2.

АрмНИИЭ

Поступило 22.IX.1977 г.

Մ. Ա. ԲԱԼԱԲԵԿՅԱՆ, Գ. Ս. ԽԱՉԱՏՐՅԱՆ

ԴԵԿՈՄՊՈԶԻՑԻԱՅԻ ՄԵԹՈԴՈՎ ԿԱՅՈՒՆԱՑՎԱԾ ՌԵԺԻՄՆԵՐԻ ՀԱՎԱՍԱՐՈՒՄՆԵՐԻ ՆՅՈՒՏՈՆԻ ՁԵՎԱՓՈԽՎԱԾ ԵՂԱՆԱԿՈՎ ԼՈՒԾՄԱՆ ԴԵՊՔՈՒՄ ԶՈՒԳԱՄԻՏՄԱՆ ՓՈՐՁՆԱԿԱՆ ՀԵՏԱԶՈՏՈՒՄԸ

Ա մ փ ո փ ո ւ մ

Հոդվածում տրվում է Նյուտոնի ձևափոխված եղանակով մեծ էլեկտրական համակարգի կայունացված ռեժիմների հավասարումների լուծման զուգամիտման փորձնական հետազոտումը, երբ վերջինս ներկայացվում է որպես շառավղորեն կապված ենթահամակարգերի համախումբ։

Մշակված է «Ֆորտրան» ծրագիր Նյուտոն-Կանտորովիչի մեթոդով մեծ էլեկտրական համակարգի կայունացված ռեժիմների հաշվման համար։ Կատարված բազմաթիվ հետազոտությունները ցույց են տալիս, որ Նյուտոնի ձևափոխված մեթոդը բոլոր դեպքերում ապահովում է կայունացված ռեժիմների հավասարումների լուծման կայուն և արագ զուգամիտում։ Այդ մեթոդի գործնական կիրառությունը տալիս է մեծ էֆեկտիվություն խնդրի հաշվման ժամանակը արագացնելու տեսակետից։

ЛИТЕРАТУРА

1. *Хачатрян В. С.* Определение установившихся режимов больших электроэнергетических систем с применением метода Ньютона-Рафсона. «Изв. АН СССР. Энергетика и транспорт», 1974. № 4. с. 38—43.
2. *Демидович Б. П., Марон И. А.* Основы вычислительной математики. М., «Наука», 1970.
3. *Хачатрян В. С., Балабекян М. А., Хачатрян Г. С.* Исследование процесса сходимости решения нелинейных алгебраических уравнений установившихся режимов методом Ньютона-Канторовича. Всесоюзн. н.-т. совещ. «Исследование решения на ЦВМ уравнений установившегося режима электрических систем» (тезисы докладов). Ереван, 1976. с. 280—288.