

05.14.01.

Т - 179 ՀԱՅԱՍՏԱՆԻ ՀԱՆՐԱՊԵՏՈՒԹՅԱՆ ԿՐԹՈՒԹՅԱՆ և
ԳԻՏՈՒԹՅԱՆ ՆԱԽԱՐԱՐՈՒԹՅՈՒՆ

ՀԱՅԱՍՏԱՆԻ ՊԵՏԱԿԱՆ ԵՄՍԱՐԱԳԻՏԱԿԱՆ ՀԱՄԱԼՍԱՐԱՆ

Թամրազյան Սելանիյա Գեորգի

**էլեկտրատեղակայման համակարգի կայունացված ռեժիմի և կորուստների
մասնակի և ծանցյալների հաշվում**

**Ե.14.01-“Էներգետիկ համակարգեր, համալիրներ և դրանց կառավարումը”
մասնագիտությամբ տեխնիկական գիտությունների թեկնածուի
գիտական աստիճանի հայցման ատենախոսության**

Մ Ե Դ Ս Ա Գ Ի Ր

ԵՐԵՎԱՆ - 1998

**МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РЕСПУБЛИКИ
АРМЕНИЯ**

ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ИНЖЕНЕРНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ АРМЕНИИ

Тамразян Мелания Георгиевна

**Методы расчета установившихся режимов и частных производных от
потерь мощностей электроэнергетической системы**

АВТОРЕФЕРАТ

**диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук,
по специальности 05.14.01-“Энергетические системы, комплексы и их управление”**

ЕРЕВАН - 1998



Ատենախոսության բեման հաստատվել է Հայաստանի Պետական
ճարտարագիտական Համալսարանում

Գիտական ղեկավար - Տեխնիկական գիտությունների դոկտոր,
պրոֆեսոր Խաչատրյան Վ.Ա.

Պաշտոնական
Ընդդիմախոսներ - Տեխնիկական գիտությունների դոկտոր,
պրոֆեսոր Մաթևոսյան Պ.Ա.

-Տեխնիկական գիտությունների թեկնածու,
ավագ գիտաշխատող Բալարբեկյան Մ.Ա.

Առաջատար ձեռնարկություն - Հայաստանի Հանրապետության
Էներգետիկայի ինստիտուտ

Պաշտպանությունը կայանալու է « 11 » դեկտեմբերի 1998թ.
ժամը 14⁰⁰-ին ՀՊԵՀ-ի 044 Մասնագիտական խորհրդում:

Հասցեն.375009 Երևան-9, Տերյան 105..

Ատենախոսությանը կարելի է ծանոթանալ ՀՊԵՀ-ի գրադարանում

Սերձագիրը առաքված է «11» նոյեմբերի 1998թ.

044 Մասնագիտական խորհրդի գիտ. քարտուղար
-տեխնիկական գիտությունների թեկնածու, դոցենտ *Ռ. Էսիմյան* Ծամամյան Ռ.Ե.

Тема диссертации утверждена в Государственном Инженерном
Университете Армении

Научный руководитель -Доктор технических наук,
профессор Хачатрян В.С.

Официальные

Оппоненты:

-Доктор технических наук,
профессор Матевосян П.А.

-Кандидат технических наук, старший научный
сотрудник Балабекян М.А.

Ведущая организация. Научно-исследовательский институт
Энергетики Республики Армения

Защита диссертации состоится " 11 " декабря 1998г.
в 14⁰⁰ ч. в акт. зале, на заседании специализированного совета 044
в Государственном Инженерном Университете Армении

по адресу: 375009 Ереван -9, ул. Терьяна 105 ГИУ

Автореферат разослан "11" ноября 1998г.

Ученый секретарь специализированного совета 044 кандидат
технических наук, доцент *Ռ. Էսիմյան* Шамамян Р.Е.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность. Задача расчета установившегося режима имея самостоятельный интерес, сочетая с задачей определения относительных приростов потерь мощностей, становится также одним из решающих этапов при оптимизации режима электроэнергетической системы (ЭЭС).

Весьма большое значение приобретает решение указанных задач в темпе процесса с обеспечением высокой маневренности при изменении режимов ЭЭС. Успешное решение указанных задач в основном зависит от успешного решения задачи расчета установившегося режима ЭЭС.

Существует огромное количество работ, которые посвящены расчету установившихся режимов и относительных приростов потерь мощностей или частных производных от потерь мощностей по активным и реактивным мощностям электрических станций. Несмотря на это, отсутствует многостороннее исследование по применению методов Ньютона-Рафсона и Ньютона-Канторовича при различных формах представления рекуррентных выражений для решения систем нелинейных алгебраических уравнений установившегося режима ЭЭС.

Цель работы. Разработка методов, вычислительных алгоритмов и программ (на языке ПАСКАЛЬ) для расчета установившихся режимов, потерь мощностей и их относительных приростов, как определенный этап расчета установившегося режима ЭЭС.

Методика исследования. Для решения рассмотренных задач используются: теория математических моделей, матриц и алгоритмов, численные методы решения систем линейных и нелинейных алгебраических уравнений, рекуррентные выражения, вытекающие из методов Ньютона-Рафсона и Ньютона-Канторовича, теории определения частных производных неявных функций, математическое обеспечение ЭВМ.

Научная новизна.

1. Создана Y-Z математическая модель установившегося режима ЭЭС при ее реализации методом Ньютона-Канторовича или слабым методом Ньютона.

3000-98

2. Предложен блочно-диагональный метод обращения матрицы Якоби, который обеспечивает сходимость решения уравнения установившегося режима, что приводит к уменьшению объема вычислительных работ.
3. Предлагаются диагональные элементы матрицы Якоби в их обращенных формах, в качестве ускоряющих коэффициентов при численном решении задач.
4. Предложено четырех блочно-диагональное представление матрицы Якоби, при обращении которой обеспечивается экономия большого объема вычислительных работ.
5. Построена математическая модель установившегося режима эквивалентированной ЭЭС и предложен метод ее реализации также с помощью метода Ньютона-Рафсона и Ньютона-Канторовича. Здесь порядок матрицы Якоби определяется удвоенным числом независимых станционных узлов.
6. Предложен метод определения относительных приростов потерь мощностей как определенный этап расчета установившегося режима ЭЭС методом Ньютона-Рафсона.

Практическая ценность. На основании предложенных методов и соответствующих вычислительных алгоритмов разработаны программы на языке ПАСКАЛЬ, гарантирующие надежное решение рассмотренных задач в настоящей работе и позволяют:

1. Решить задачу оперативного управления и проектирования развития ЭЭС,
2. Установить возможность передачи вырабатываемых мощностей электрическими станциями к потребителям;
3. Установить уровни напряжений как на узлах потребителей так и на станционных узлах;
4. Обеспечить необходимые уровни напряжений в узлах ЭЭС;
5. Установить величины потерь мощностей в сетях ЭЭС.

Апробация работы. Полученные научные результаты по диссертационной работе были доложены на научных семинарах сектора "Электроэнергетики", на научно-технических конференциях Государственного Инженерного Университета Армении и на первой международной конференции энергетиков в Армении.

Публикация. По полученным результатам опубликованы 6 научные статьи, списки которых приведены в конце автореферата.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, четырех глав, списка литературы (122 наименования), приложения, изложенного на 160 страницах машинописного текста, иллюстрирована 3 рисунками и 80 таблицами.

ОСНОВНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ, ВЫНОСИМЫЕ НА ЗАЩИТУ

1. Метод расчета установившегося режима ЭЭС при $Y-Z$ форме задания состояния сети с применением метода Ньютона-Канторовича и модифицированных методов Ньютона-Рафсона и Ньютона-Канторовича.
2. Математическая модель установившегося режима эквивалентированной ЭЭС и ее реализация методом Ньютона-Рафсона и Ньютона-Канторовича.
3. Использование диагональных элементов матрицы Якоби как коэффициентов ускорения при решении нелинейных алгебраических уравнений установившегося режима.
4. Математическая модель относительных приростов потерь мощностей по активным и реактивным мощностям станционных узлов.
5. Рассмотрение задачи расчета относительных приростов потерь как определенный этап расчета установившегося режима методом Ньютона-Рафсона.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность рассматриваемой проблемы, сформулированы цели работы, полученная научная новизна и кратко изложено содержание диссертационной работы.

В первой главе: "Критический анализ работ по расчетам установившихся режимов и относительных приростов потерь" приведен критический анализ работ существующей литературы. Анализ рассмотренных работ показывает, что несмотря на существующие множества методов по расчету установившихся режимов и относительных приростов потерь, требуется дальнейшее усовершенствование и развитие

теории и методов решения указанных задач с учетом индивидуальных свойств и особенностей исследуемой ЭЭС.

В частности необходимо иметь в виду, что:

1. Математическая модель установившегося режима и разработанный соответствующий метод ее реализации должен обеспечивать решение соответствующих систем нелинейных алгебраических уравнений в реальном масштабе времени.
2. Математическая модель относительных приростов потерь мощностей должна учитывать физические явления, имеющие место в ЭЭС и стать подмоделью математической модели оптимизации режимов.

В настоящей диссертационной работе представленные и решаемые задачи исходят именно от вышеуказанных требований.

2. Во второй главе: "Решение Y-Z уравнений установившегося режима электроэнергетической системы методом Ньютона-Рафсона и Ньютона-Канторовича" соответствующая модель представляется в виде:

$$\begin{bmatrix} \hat{S}_m \\ \hat{S}_k \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \hat{S}_{Bm} \\ \hat{S}_{Bk} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \sum_{n=1}^{\Gamma} Y_{m,n} \hat{U}_m \hat{U}_n & 0 \\ 0 & \sum_{l=\Gamma+1}^M Z_{kl} \hat{I}_l \hat{I}_l \end{bmatrix} \quad (1)$$

где

$$\hat{S}_{Bm} = \hat{I}_{Bm} \hat{U}_m + \sum_{l=\Gamma+1}^M A_{m,l} \hat{I}_l \hat{U}_m \quad (2)$$

$$\hat{S}_{Bk} = \hat{U}_{Bk} \hat{I}_k + \sum_{n=1}^{\Gamma} C_{k,n} \hat{U}_n \hat{I}_k \quad (3)$$

При переходе к активным и реактивным мощностям узлов, математическая модель (1) принимает следующий вид:

$$\begin{bmatrix} P_m \\ Q_m \\ P_k \\ Q_k \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} P_{Bm} \\ Q_{Bm} \\ P_{Bk} \\ Q_{Bk} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} P_{mn} \\ Q_{mn} \\ 0 \\ P_l \\ Q_l \end{bmatrix} \quad (4)$$

В математической модели (4), отдельные блоки определяются:

$$\begin{bmatrix} P_{mn} \\ Q_{mn} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sum_{n=1}^{\Gamma} [g_{m,n}(U'_m U'_n + U''_m U''_n) + b_{m,n}(U''_m U'_n - U'_m U''_n)] \\ \sum_{n=1}^{\Gamma} [g_{m,n}(U''_m U'_n - U'_m U''_n) - b_{m,n}(U'_m U'_n + U''_m U''_n)] \end{bmatrix} \quad (5)$$

$$\begin{bmatrix} P_{kl} \\ Q_{kl} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sum_{l=\Gamma+1}^M [R_{k,l}(I'_k I'_l + I''_k I''_l) + X_{k,l}(I'_k I'_l - I''_k I''_l)] \\ \sum_{l=\Gamma+1}^M [R_{k,l}(I'_k I'_l - I''_k I''_l) - X_{k,l}(I'_k I'_l + I''_k I''_l)] \end{bmatrix} \quad (6)$$

С другой стороны величины $P_{Bm}, Q_{Bm}, P_{Bk}, Q_{Bk}$ определяются:

$$\begin{bmatrix} P_{Bm} \\ Q_{Bm} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} P'_{Bm} + \sum_{l=\Gamma+1}^M [a'_{m,l}(U'_m I'_l + U''_m I''_l) + a''_{m,l}(U''_m I'_l - U'_m I''_l)] \\ Q'_{Bm} + \sum_{l=\Gamma+1}^M [a'_{m,l}(U''_m I'_l - U'_m I''_l) - a''_{m,l}(U'_m I'_l + U''_m I''_l)] \end{bmatrix} \quad (7)$$

где

$$\begin{bmatrix} P'_{Bm} \\ Q'_{Bm} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\sum_{n=1}^{\Gamma} (g_{m,n} U'_m + b_{m,n} U''_m) U_n \\ -\sum_{n=1}^{\Gamma} (g_{m,n} U''_m - b_{m,n} U'_m) U_n \end{bmatrix} \quad (8)$$

$$\begin{bmatrix} P_{Bk} \\ Q_{Bk} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} P'_{Bk} + \sum_{n=1}^{\Gamma} [C'_{kn}(I'_k U'_n + I''_k U''_n) + C''_{kn}(I''_k U'_n - I'_k U''_n)] \\ Q'_{Bk} + \sum_{n=1}^{\Gamma} [C'_{kn}(I''_k U'_n + I'_k U''_n) - C''_{kn}(I'_k U'_n + I''_k U''_n)] \end{bmatrix} \quad (9)$$

где

$$\begin{bmatrix} P'_{Bk} \\ Q'_{Bk} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} I_k U_0 - \sum_{n=1}^{\Gamma} (C'_{kn} I'_k + C''_{kn} I''_k) U_n \\ I_k U_0 - \sum_{n=1}^{\Gamma} (C'_{kn} I''_k + C''_{kn} I'_k) U_n \end{bmatrix} \quad (10)$$

Для реализации математической модели установившегося режима ЭЭС, удобно соответствующие системы нелинейных алгебраических уравнений представить в следующем виде:

$$\Phi_{pm} = P_m - [P_{Bm} + \Phi_{pm}(U'_n, U''_n)] = 0; \quad (11)$$

$$\Phi_{qm} = Q_m - [Q_{Bm} + \Phi_{qm}(U'_n, U''_n)] = 0;$$

$$\Phi_{pk} = P_k - [P_{Bk} + \Phi_{pk}(I'_l, I''_l)] = 0; \quad (12)$$

$$\Phi_{qk} = Q_k - [Q_{Bk} + \Phi_{qk}(I'_l, I''_l)] = 0.$$

где

$$\Psi_{pm} = P_{pm}; \Psi_{qm} = Q_{pm}; \Psi_{pk} = P_{pk}; \Psi_{qk} = Q_{pk}.$$

Рассматривается решение системы нелинейных алгебраических уравнений, для случая, когда независимые стационарные узлы, являются узлами типа P-Q, с применением метода Ньютона-Рафсона и Ньютона-Канторовича.

При этом рекуррентные выражения для систем нелинейных алгебраических уравнений (11) и (12) соответственно будут иметь следующий вид:

$$\begin{bmatrix} U'_m \\ \dots \\ U''_m \end{bmatrix}^{u+1} = \begin{bmatrix} U'_m \\ \dots \\ U''_m \end{bmatrix}^u - \begin{bmatrix} \frac{\partial \Phi_{pm}}{\partial U'_m} & \dots & \frac{\partial \Phi_{pm}}{\partial U''_m} \\ \dots & \dots & \dots \\ \frac{\partial \Phi_{qm}}{\partial U'_m} & \dots & \frac{\partial \Phi_{qm}}{\partial U''_m} \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} \Phi_{pm} \\ \dots \\ \Phi_{qm} \end{bmatrix}; \quad (13)$$

$$\begin{bmatrix} I'_k \\ \dots \\ I''_k \end{bmatrix}^{u+1} = \begin{bmatrix} I'_k \\ \dots \\ I''_k \end{bmatrix}^u - \begin{bmatrix} \frac{\partial \Phi_{pk}}{\partial I'_k} & \dots & \frac{\partial \Phi_{pk}}{\partial I''_k} \\ \dots & \dots & \dots \\ \frac{\partial \Phi_{qk}}{\partial I'_k} & \dots & \frac{\partial \Phi_{qk}}{\partial I''_k} \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} \Phi_{pk} \\ \dots \\ \Phi_{qk} \end{bmatrix}; \quad (14)$$

В диссертационной работе проведено множество вычислительных экспериментов для установления весомости отдельных блоков матрицы Якоби с целью упрощения ее структуры.

Рассматривались схемы ЭЭС, состоящих из 4, 10 и 22 узлов, при котором первая схема состояла из 3-х стационарных и 1-ого нагрузочного узла, а вторая схема из 5-и стационарных и 5-и нагрузочных узлов, а третья схема из 6-и стационарных и 14-и нагрузочных узлов.

Для первой схемы матрица Якоби рекуррентного выражения (13) четвертого порядка, а для рекуррентного выражения (14) второго порядка. Для второй схемы матрица Якоби рекуррентного выражения (13) восьмого порядка, а для рекуррентного выражения (14) десятого порядка. Для третьей схемы матрица Якоби рекуррентного выражения (13) двенадцатого порядка, а матрица Якоби рекуррентного выражения (14) двадцать восьмого порядка.

При организации итерационного процесса для обеспечения одинаковых точностей искомых переменных потребовалось осуществлять по первой схеме 2-3 итерации, а по второй схеме 3-4 итерации, а по третьей схеме 4-5 итерации. Важным является то, что поиск искомых переменных по рекуррентному выражению (14) завершается быстрее, чем по (13). Для первой схемы по выражению (14) потребовалось 2 итерации, а для второй

схемы 3 итерации, а для третьей схемы 4 итерации. При этом по (13) потребовалось осуществлять соответственно 3 и 5 итерации.

Вычислительные эксперименты по этим трем схемам показали также, что в рекуррентном выражении (14) численные значения элементов подматриц $\partial \Phi_{pk} / \partial I'_k$ и $\partial \Phi_{qk} / \partial I''_k$ определенно меньше, чем численные значения элементов остальных подматриц.

В силу этого, рекуррентное выражение (14) рекомендуется представить в следующем виде:

$$\begin{bmatrix} I'_k \\ \dots \\ I''_k \end{bmatrix}^{u+1} = \begin{bmatrix} I'_k \\ \dots \\ I''_k \end{bmatrix}^u - \begin{bmatrix} \frac{\partial \Phi_{pk}}{\partial I'_k} & \dots & 0 \\ \dots & \dots & \dots \\ 0 & \dots & \frac{\partial \Phi_{qk}}{\partial I''_k} \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} \Phi_{pk} \\ \dots \\ \Phi_{qk} \end{bmatrix}; \quad (15)$$

На основании (15) можно написать:

$$[I'_k]^{u+1} = [I'_k]^u - \left[\frac{\partial \Phi_{pk}}{\partial I'_k} \right]^{-1} [\Phi_{pk}]; \quad (16)$$

$$[I''_k]^{u+1} = [I''_k]^u - \left[\frac{\partial \Phi_{qk}}{\partial I''_k} \right]^{-1} [\Phi_{qk}]; \quad (17)$$

Вычислительные эксперименты проведены также относительно рекуррентных выражений (16) и (17), рассматривая те же самые схемы ЭЭС.

Результаты расчета показали, что сходимость решения систем нелинейных алгебраических уравнений по рекуррентным выражениям (13), (15) и (16) особенно не ухудшилась.

Для первой схемы потребовалось осуществить 8 итераций по рекуррентному выражению (18) и 6 итераций по рекуррентному выражению (19).

Рекуррентные выражения для систем нелинейных алгебраических уравнений (11) и (12) с применением метода Ньютона-Канторовича имеет следующий вид:

$$\begin{bmatrix} U'_m \\ \dots \\ U''_m \end{bmatrix}^{u+1} = \begin{bmatrix} U'_m \\ \dots \\ U''_m \end{bmatrix}^u - \begin{bmatrix} A'_p & \dots & A''_p \\ \dots & \dots & \dots \\ A'_q & \dots & A''_q \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} F_{pm} \\ \dots \\ F_{qm} \end{bmatrix}; \quad (18)$$

$$\begin{bmatrix} I'_k \\ \dots \\ I''_k \end{bmatrix}^{u+1} = \begin{bmatrix} I'_k \\ \dots \\ I''_k \end{bmatrix}^u - \begin{bmatrix} B'_p & \dots & B''_p \\ \dots & \dots & \dots \\ B'_q & \dots & B''_q \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} F_{pk} \\ \dots \\ F_{qk} \end{bmatrix}; \quad (19)$$

Определим элементы матрицы приближенного Якобиана выражения (18) и (19)

$$A_p' = \begin{cases} \left[\begin{array}{l} -\sum_{\alpha=1}^r g_{m,\alpha} U_\alpha + \sum_{\alpha=1}^r (a'_{m,\alpha} I'_\alpha - a''_{m,\alpha} I''_\alpha) + \sum_{\alpha=1}^r (g_{m,\alpha} U'_\alpha - b_{m,\alpha} U''_\alpha) \\ + (g_{m,m} U'_m + b_{m,m} U''_m) \end{array} \right] & \text{при } m = n \\ - (g_{m,n} U'_m + b_{m,n} U''_m) & \text{при } m \neq n \end{cases}$$

$$A_p'' = \begin{cases} \left[\begin{array}{l} -\sum_{\alpha=1}^r b_{m,\alpha} U_\alpha + \sum_{\alpha=1}^r (a'_{m,\alpha} I'_\alpha - a''_{m,\alpha} I''_\alpha) + \sum_{\alpha=1}^r (g_{m,\alpha} U'_\alpha - b_{m,\alpha} U''_\alpha) \\ + (g_{m,m} U'_m + b_{m,m} U''_m) \end{array} \right] & \text{при } m = n \\ - (g_{m,n} U'_m - b_{m,n} U''_m) & \text{при } m \neq n \end{cases}$$

(20)

$$A_q' = \begin{cases} \left[\begin{array}{l} -\left(\sum_{\alpha=1}^r b_{m,\alpha} U_\alpha + \sum_{\alpha=1}^r (a'_{m,\alpha} I'_\alpha - a''_{m,\alpha} I''_\alpha) \right) + \sum_{\alpha=1}^r (g_{m,\alpha} U'_\alpha + b_{m,\alpha} U''_\alpha) \\ + (g_{m,m} U'_m - b_{m,m} U''_m) \end{array} \right] & \text{при } m = n \\ - (g_{m,n} U'_m - b_{m,n} U''_m) & \text{при } m \neq n \end{cases}$$

$$A_q'' = \begin{cases} \left[\begin{array}{l} -\sum_{\alpha=1}^r g_{m,\alpha} U_\alpha + \sum_{\alpha=1}^r (a'_{m,\alpha} I'_\alpha - a''_{m,\alpha} I''_\alpha) + \sum_{\alpha=1}^r (g_{m,\alpha} U'_\alpha - b_{m,\alpha} U''_\alpha) \\ + (g_{m,m} U'_m + b_{m,m} U''_m) \end{array} \right] & \text{при } m = n \\ - (g_{m,n} U'_m - b_{m,n} U''_m) & \text{при } m \neq n \end{cases}$$

$$B_p' = \begin{cases} \left[\begin{array}{l} \left(1 - \sum_{\alpha=1}^r C_{k,\alpha} \right) U_0 + \sum_{\alpha=1}^r (C'_{k,\alpha} U'_\alpha - C''_{k,\alpha} U''_\alpha) + \sum_{\ell=\Gamma+1}^M (R_{k,\ell} I'_\ell - X_{k,\ell} I''_\ell) \\ + (R_{k,k} I'_k + X_{k,k} I''_k) \end{array} \right] & \text{при } k = \ell \\ - (R_{k,\ell} I'_\ell - X_{k,\ell} I''_\ell) & \text{при } k \neq \ell \end{cases}$$

$$B_p'' = \begin{cases} \left[\begin{array}{l} -\sum_{\alpha=1}^r C_{k,\alpha} U_0 + \sum_{\alpha=1}^r (C'_{k,\alpha} U'_\alpha - C''_{k,\alpha} U''_\alpha) + \sum_{\ell=\Gamma+1}^M (R_{k,\ell} I'_\ell - X_{k,\ell} I''_\ell) \\ + (R_{k,k} I'_k + X_{k,k} I''_k) \end{array} \right] & \text{при } k = \ell \\ - (R_{k,\ell} I'_\ell - X_{k,\ell} I''_\ell) & \text{при } k \neq \ell \end{cases}$$

(21)

$$B_q' = \begin{cases} \left[\begin{array}{l} -\sum_{\alpha=1}^r C_{k,\alpha} U_0 + \sum_{\alpha=1}^r (C'_{k,\alpha} U'_\alpha - C''_{k,\alpha} U''_\alpha) + \sum_{\ell=\Gamma+1}^M (R_{k,\ell} I'_\ell - X_{k,\ell} I''_\ell) \\ - (R_{k,k} I'_k - X_{k,k} I''_k) \end{array} \right] & \text{при } k = \ell \\ - (R_{k,\ell} I'_\ell - X_{k,\ell} I''_\ell) & \text{при } k \neq \ell \end{cases}$$

$$B_q'' = \begin{cases} \left[\begin{array}{l} -\left(1 - \sum_{\alpha=1}^r C_{k,\alpha} \right) U_0 + \sum_{\alpha=1}^r (C'_{k,\alpha} U'_\alpha - C''_{k,\alpha} U''_\alpha) + \sum_{\ell=\Gamma+1}^M (R_{k,\ell} I'_\ell - X_{k,\ell} I''_\ell) \\ + (R_{k,k} I'_k + X_{k,k} I''_k) \end{array} \right] & \text{при } k = \ell \\ - (R_{k,\ell} I'_\ell + X_{k,\ell} I''_\ell) & \text{при } k \neq \ell \end{cases}$$

Необходимо определить численные значения функций F_{pm} и F_{qm} по рекуррентному выражению (18)

$$F_{pm} = P_m - \left[P_{Bm} + \sum_{\alpha=1}^r [g_{m,\alpha} (U'_m U'_\alpha + U''_m U''_\alpha) + b_{m,\alpha} (U''_m U'_\alpha - U'_m U''_\alpha)] \right];$$

(22)

$$F_{qm} = Q_m - \left[Q_{Bm} + \sum_{\alpha=1}^r [g_{m,\alpha} (U''_m U'_\alpha - U'_m U''_\alpha) + b_{m,\alpha} (U'_m U'_\alpha + U''_m U''_\alpha)] \right];$$

и F_{pk} , F_{rk} по рекуррентному выражению (19).

$$F_{pk} = P_k - \left[P_{Bk} + \sum_{\ell=\Gamma+1}^M [R_{k,\ell} (I'_\ell I'_\ell + I''_\ell I''_\ell) + X_{k,\ell} (I'_\ell I''_\ell - I''_\ell I'_\ell)] \right];$$

(23)

$$F_{rk} = Q_k - \left[Q_{Bk} + \sum_{\ell=\Gamma+1}^M [R_{k,\ell} (I''_\ell I'_\ell - I'_\ell I''_\ell) + X_{k,\ell} (I'_\ell I'_\ell + I''_\ell I''_\ell)] \right];$$

Другой разновидностью рекуррентного выражения (19) являются:

$$\begin{bmatrix} I'_k \\ \vdots \\ I'_\ell \\ \vdots \\ I''_k \end{bmatrix}^{u+1} = \begin{bmatrix} I'_k \\ \vdots \\ I''_k \end{bmatrix}^u - \begin{bmatrix} B'_p & 0 \\ 0 & B''_q \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} F_{pk} \\ \vdots \\ F_{rk} \end{bmatrix}$$

(24)

При этом общий объем вычислительных работ в среднем уменьшился на (15-20)%.

На основании разработанного вычислительного алгоритма составлена ПАСКАЛЬ программа для численного решения практических задач по расчету установившегося режима ЭЭС.

Исследовались схемы, состоящие из 4, 10, 22, 46 и 100 узлов. Для наглядности предложенных методов, ниже в таблице 1 приводятся итерационные процессы установившегося режима ЭЭС. Для численного

сравнения методов и экономии места приводятся только режимные параметры относительно 4-х узловой схемы.

Таблица 1

Метод	Узлы Пар	Метод Ньютона-Рафсона		Модифицированный метод Ньютона-Рафсона		Метод Ньютона-Квадровича		Модифицированный метод Ньютона-Квадровича	
		\dot{U}	\dot{I}	\dot{U}	\dot{I}	\dot{U}	\dot{I}	\dot{U}	\dot{I}
ЭС-1	1	220,00000 +j0,00000	0,733136 -j0,366545	220,00000 +j0,00000	0,733136 -j0,366545	220,00000 +j0,00000	0,733136 -j0,366545	220,00000 +j0,00000	0,733136 -j0,366545
	2	223,53117 +j1,71570	0,713626 -j0,375811	223,53117 +j1,71570	0,713626 -j0,375811	223,53117 +j1,71570	0,713626 -j0,375811	223,98862 +j2,33112	0,716257 -j0,367473
	3	221,21148 +j4,45359	0,721329 -j0,379254	221,42292 +j4,50258	0,720721 -j0,378846	221,19531 +j4,70060	0,721102 -j0,379889	222,16980 +j3,24454	0,720522 -j0,373488
	4	220,9434 +j4,53289	0,722007 -j0,379767	221,06738 +j4,53923	0,721802 -j0,379597	221,02926 +j4,53848	0,721927 -j0,379662	221,92978 +j3,10180	0,721381 -j0,373356
	5	220,94349 +j4,54895	0,722023 -j0,37976	221,00517 +j4,54388	0,721995 -j0,379723	220,99445 +j4,54779	0,722022 -j0,379754	221,92827 +j3,14321	0,721475 -j0,373579
	6	-	-	220,99386 +j4,54435	0,721008 -j0,389542	-	-	-	-
ЭС-2	1	220,00000 +j0,00000	0,920273 -j0,460136	220,00000 +j0,00000	0,920273 -j0,460136	220,00000 +j0,00000	0,920273 -j0,460136	220,00000 +j0,00000	0,920273 -j0,460136
	2	224,08923 +j4,36397	0,894343 -j0,469456	224,08923 +j4,36397	0,894343 -j0,469456	224,08923 +j4,36397	0,894343 -j0,469456	224,47900 +j2,17656	0,897454 -j0,459657
	3	221,77557 +j1,11744	0,904321 -j0,473272	221,90663 +j1,15057	0,903517 -j0,473082	221,66421 +j1,11664	0,904062 -j0,474407	222,49923 +j3,03197	0,904118 -j0,469446
	4	221,4670 +j4,1870	0,905204 -j0,471976	221,54167 +j4,17400	0,904939 -j0,473984	221,50131 +j4,17145	0,905107 -j0,474063	222,31245 +j2,86612	0,904679 -j0,467014
	5	221,46506 +j4,18713	0,905246 -j0,474158	221,47183 +j4,17655	0,904003 -j0,473485	221,46597 +j4,18015	0,905231 -j0,474177	221,45568 +j2,90573	0,904823 -j0,467296
	6	-	-	221,46547 +j4,17663	0,905241 -j0,474164	-	-	-	-
ЭН-3	1	219,999999 +j0,000448	-1,96218 +j0,98109	219,999999 +j0,000448	-1,96218 +j0,98109	219,999999 +j0,000448	-1,962181 +j0,98109	219,999999 +j0,000448	-1,962181 +j0,98109
	2	206,439421 +j9,01296	-2,041540 +j1,13466	207,510486 +j8,540152	-2,034028 +j1,12385	207,510496 +j8,540137	-2,034028 +j1,12385	207,652732 +j10,06626	-2,023712 +j1,13753
	3	204,540545 +j9,33088	-2,058051 +j1,14915	204,922062 +j9,108956	-2,0556761 +j1,14465	204,537928 +j9,160491	-2,059120 +j1,14747	205,375744 +j9,808701	-2,047041 +j1,14871
	4	204,338078 +j9,287175	-2,060313 +j1,14993	204,440543 +j9,261391	-2,0594650 +j1,14905	204,367362 +j9,292257	-2,059995 +j1,14980	205,014103 +j10,14362	-2,048506 +j1,15416
	5	204,107139 +j9,66818	-2,060299 +j1,15002	202,885673 +j8,387079	-2,0801675 +j1,14984	204,336585 +j9,290838	-2,0603054 +j1,14997	204,941828 +j10,12458	-2,049323 +j1,15441
	6	-	-	204,33686 +j9,292426	-2,0602930 +j1,14998	-	-	-	-

В третьей главе: "Математическая модель установившегося режима 2Z эквивалентированной электроэнергетической системы - и ее реализация" рассматривается вопрос построения нелинейных алгебраических уравнений эквивалентированной ЭЭС. Предварительно электрические нагрузки делят

на изменяющихся и на неизменяющихся, уравнения состояния ЭЭС в матричной форме представляется.

$$\begin{bmatrix} \dot{U}_{мБ} \\ \dot{U}_{\Sigma н,Б} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Z_{mn} & Z_{m, \Sigma н} \\ Z_{\Sigma н, n} & Z_{\Sigma н, \Sigma н} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{I}_n \\ \dot{I}_{\Sigma н} \end{bmatrix} \quad (25)$$

В матричном выражении (25):

$\dot{U}_{мБ}$ - столбцевая подматрица комплексных напряжений независимых стационарных узлов относительно напряжения базисного стационарного узла;

$\dot{U}_{\Sigma н,Б}$ - комплексное напряжение эквивалентированного нагрузочного узла относительно напряжения базисного стационарного узла;

\dot{I}_n - столбцевая подматрица комплексных токов независимых стационарных узлов;

$\dot{I}_{\Sigma н}$ - суммарный комплексный ток эквивалентного нагрузочного узла с изменяющимися и неизменяющимися активными и реактивными мощностями;

Z_{mn} - неособенная квадратная подматрица собственных и взаимных сопротивлений независимых стационарных узлов.

При этом математическая модель 2Z эквивалентированной ЭЭС принимает следующий вид:

$$\dot{U}_m = \dot{U}_{\Sigma н,Б} + \sum_{n=1}^r (Z_{mn} - Z_{m, \Sigma н} - Z_{\Sigma н, n} + Z_{\Sigma н, \Sigma н}) \dot{I}_n \quad (26)$$

Если ввести обозначение

$$Z_{m, n} = Z_{mn} - Z_{m, \Sigma н} - Z_{\Sigma н, n} + Z_{\Sigma н, \Sigma н} \quad (27)$$

то математическая модель (26) принимает следующий вид:

$$\dot{U}_m = \dot{U}_{\Sigma н,Б} + \sum_{n=1}^r Z_{m, n} \dot{I}_n \quad (28)$$

На основании заданной исходной информации относительно нагрузочных узлов, всегда можно установить численные значения комплексных сопротивлений $Z_{m, \Sigma н}$, $Z_{\Sigma н, n}$, $Z_{\Sigma н, \Sigma н}$, имея численные значения элементов матрицы Z_{mn} , всегда можно установить также численные значения комплексных сопротивлений $Z_{m, n}$.

Математическая модель в мощностях имеет следующий вид:

$$\left. \begin{aligned} \Phi_{pm} &= P_m - \left\{ P_{1m} + \sum_{n=1}^r \left[(I'_m I'_n + I''_m I''_n) R_{m,n} - (I'_m I''_n + I''_m I'_n) X_{m,n} \right] \right\} \\ \Phi_{qm} &= Q_m - \left\{ Q_{5m} + \sum_{n=1}^r \left[(I'_m I'_n + I''_m I''_n) X_{m,n} + (I'_m I''_n - I''_m I'_n) R_{m,n} \right] \right\} \end{aligned} \right\} \quad (29)$$

где

$$P_{om} = (U'_{\Sigma_{H,A}} I'_m + U''_{\Sigma_{H,A}} I''_m); \quad Q_{om} = -(U'_{\Sigma_{H,A}} I''_m + U''_{\Sigma_{H,A}} I'_m). \quad (30)$$

В данной системе нелинейных алгебраических уравнений установившегося режима ЭЭС, искомыми переменными являются составляющие комплексных токов независимых станционных узлов, относительно которых можно написать следующее рекуррентное выражение.

$$\begin{bmatrix} I'_m \\ \vdots \\ I''_m \end{bmatrix}^{u+1} = \begin{bmatrix} I'_m \\ \vdots \\ I''_m \end{bmatrix}^u - \begin{bmatrix} \frac{\partial \Phi_{pm}}{\partial I'_n} & \left| \frac{\partial \Phi_{pm}}{\partial I''_n} \right. \\ \hline \frac{\partial \Phi_{qm}}{\partial I'_n} & \left| \frac{\partial \Phi_{qm}}{\partial I''_n} \right. \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} \Phi_{pm} \\ \vdots \\ \Phi_{qm} \end{bmatrix}; \quad (31)$$

Элементы матрицы Якоби рекуррентного выражения (31)

определяются.

при одинаковых индексах, т.е. когда $n=m$

$$\begin{aligned} \frac{\partial \Phi_{pm}}{\partial I'_m} &= - \left[U'_{\Sigma_{H,B}} + 2R_{m,m} I'_m + \sum_{n=1}^r (R_{m,n} I'_n - X_{m,n} I''_n) \right] \\ \frac{\partial \Phi_{pm}}{\partial I''_m} &= - \left[U''_{\Sigma_{H,B}} + 2R_{m,m} I''_m + \sum_{n=1}^r (R_{m,n} I''_n - X_{m,n} I'_n) \right]; \\ \frac{\partial \Phi_{qm}}{\partial I'_m} &= - \left[U''_{\Sigma_{H,B}} + 2X_{m,m} I'_m + \sum_{n=1}^r (X_{m,n} I'_n - R_{m,n} I''_n) \right]; \\ \frac{\partial \Phi_{qm}}{\partial I''_m} &= - \left[U'_{\Sigma_{H,B}} + 2X_{m,m} I''_m + \sum_{n=1}^r (X_{m,n} I''_n - R_{m,n} I'_n) \right]. \end{aligned} \quad (32)$$

При разных индексах, т.е. $n \neq m$:

$$\begin{aligned} \frac{\partial \Phi_{pm}}{\partial I'_n} &= -(R_{m,n} I'_m + X_{m,n} I''_m); & \frac{\partial \Phi_{pm}}{\partial I''_n} &= -(R_{m,n} I''_m + X_{m,n} I'_m); \\ \frac{\partial \Phi_{qm}}{\partial I'_n} &= -(X_{m,n} I'_m + R_{m,n} I''_m); & \frac{\partial \Phi_{qm}}{\partial I''_n} &= -(X_{m,n} I''_m + R_{m,n} I'_m). \end{aligned} \quad (33)$$

Для решения системы нелинейных алгебраических уравнений относительно составляющих комплексных токов независимых станционных узлов и для их решения применяется также метод Ньютона-Канторовича.

$$\begin{bmatrix} I'_m \\ \vdots \\ I''_m \end{bmatrix}^{u+1} = \begin{bmatrix} I'_m \\ \vdots \\ I''_m \end{bmatrix}^u - \begin{bmatrix} B'_p & \left| \begin{array}{c} B'_p \\ \vdots \\ B'_q \end{array} \right. \\ \hline B'_q & \left| \begin{array}{c} B'_q \\ \vdots \\ B'_q \end{array} \right. \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} F_{pm} \\ \vdots \\ F_{qm} \end{bmatrix}. \quad (34)$$

Элементы приближенного Якобиана определяются согласно следующим выражениям:

$$B'_p = \begin{cases} \left[U'_B + \sum_{n=1}^r (Z'_{\Sigma_{H,A}} I'_n - Z''_{\Sigma_{H,A}} I''_n) + (Z'_{\Sigma_{H,H}} I'_{\Sigma_H} - Z''_{\Sigma_{H,H}} I''_{\Sigma_H}) + \right. \\ \left. + 2R_{m,m} I'_m + \sum_{\substack{n=1 \\ n \neq m}}^r (R_{m,n} I'_n - X_{m,n} I''_n) \right] & \text{при } n=m; \\ -[R_{m,n} I'_m + X_{m,n} I''_m] & \text{при } n \neq m; \end{cases} \quad (35)$$

$$B'_q = \begin{cases} \left[U''_B + \sum_{n=1}^r (Z'_{\Sigma_{H,A}} I''_n - Z''_{\Sigma_{H,A}} I'_n) + (Z'_{\Sigma_{H,H}} I''_{\Sigma_H} - Z''_{\Sigma_{H,H}} I'_{\Sigma_H}) + \right. \\ \left. + 2R_{m,m} I''_m + \sum_{\substack{n=1 \\ n \neq m}}^r (R_{m,n} I''_n - X_{m,n} I'_n) \right] & \text{при } n=m; \\ -[R_{m,n} I''_m + X_{m,n} I'_m] & \text{при } n \neq m; \end{cases} \quad (36)$$

$$B'_q = \begin{cases} \left[U'_B + \sum_{n=1}^r (Z'_{\Sigma_{H,A}} I''_n + Z''_{\Sigma_{H,A}} I'_n) + (Z'_{\Sigma_{H,H}} I''_{\Sigma_H} + Z''_{\Sigma_{H,H}} I'_{\Sigma_H}) + \right. \\ \left. + 2X_{m,m} I'_m + \sum_{\substack{n=1 \\ n \neq m}}^r (X_{m,n} I'_n + R_{m,n} I''_n) \right] & \text{при } n=m; \\ -[X_{m,n} I'_m - R_{m,n} I''_m] & \text{при } n \neq m; \end{cases} \quad (3.7)$$

$$B'_q = \begin{cases} \left[U''_B + \sum_{n=1}^r (Z'_{\Sigma_{H,A}} I'_n - Z''_{\Sigma_{H,A}} I''_n) + (Z'_{\Sigma_{H,H}} I'_{\Sigma_H} - Z''_{\Sigma_{H,H}} I''_{\Sigma_H}) + \right. \\ \left. + 2X_{m,m} I''_m + \sum_{\substack{n=1 \\ n \neq m}}^r (X_{m,n} I''_n - R_{m,n} I'_n) \right] & \text{при } n=m; \\ -[X_{m,n} I''_m + R_{m,n} I'_m] & \text{при } n \neq m; \end{cases} \quad (38)$$

Для установления численных значений комплексных токов независимых стационарных узлов пользуемся рекуррентным выражением (34), где необходимо пользоваться функциями F_{pm} и F_{qm} , которые удобно при этом представить в виде выражений (39) и (40).

$$F_{pm} = P_m - \left\{ P_{bc} + (I'^2_m + I''^2_m) R_{m,m} + \sum_{n=1}^m [(I'_n I'_m + I''_n I''_m) R_{n,m} - (I'_n I'_m + I''_n I''_m) X_{n,m}] \right\}; \quad (39)$$

$$F_{qm} = Q_m - \left\{ Q_{bc} + (I'^2_m + I''^2_m) X_{m,m} + \sum_{n=1}^m [(I'_n I'_m + I''_n I''_m) X_{n,m} - (I'_n I'_m + I''_n I''_m) R_{n,m}] \right\}; \quad (40)$$

На основании разработанного вычислительного алгоритма составлена ПАСКАЛЬ программа для численного решения практических задач по расчету установившегося режима эквивалентированной ЭЭС. Ниже в таблице 2 и 3 приводятся численные сравнения одного установившегося режима для схемы ЭЭС, состоящей из 10-и и 22-х узлов рассчитанных вышеотмеченными методами с точным методом. Для экономии места приводятся только режимные параметры относительно стационарных узлов

Таблица 2

Метод	Точный метод		Метод Ньютона-Рафсона		Метод Ньютона-Канторовича	
	$\dot{U} = U' + jU''$	$I = I' + jI''$	$\dot{U} = U' + jU''$	$I = I' + jI''$	$\dot{U} = U' + jU''$	$I = I' + jI''$
ЭС-0	220,00000 +j0,00000	0,74520 -j0,16979	220,00000 +j0,00000	0,71631 -j0,09210	220,00000 +j0,00000	0,67936 -j0,15233
ЭС-1	219,09560 -j6,37413	0,53265 -j0,51756	220,30380 -j6,50544	0,52950 -j0,52495	219,71000 -j5,59029	0,53309 -j0,51422
ЭС-2	213,48570 -j11,72084	0,16116 -j0,47726	217,35440 -j7,03667	0,27427 -j0,05489	216,63950 -j5,94772	0,27548 -j0,05372
ЭС-3	213,48570 -j11,72084	0,16116 -j0,47726	215,59970 -j12,13165	0,15893 -j0,47277	214,57930 -j10,47275	0,16328 -j0,47400
ЭС-4	213,04920 -j7,51166	0,47982 -j0,03002	215,06220 -j7,87391	0,47535 +j0,02910	214,01990 -j6,34026	0,47756 +j0,03258

Таблица 3

Метод	Точный метод		Метод Ньютона-Рафсона		Метод Ньютона-Канторовича	
	$\dot{U} = U' + jU''$	$I = I' + jI''$	$\dot{U} = U' + jU''$	$I = I' + jI''$	$\dot{U} = U' + jU''$	$I = I' + jI''$
ЭС-0	220,00000 +j0,00000	0,74520 -j0,16979	220,00000 +j0,00000	0,71631 -j0,09210	220,00000 +j0,00000	0,67966 -j0,15293
ЭС-1	214,04270 -j3,81857	0,48382 -j0,26563	215,56894 -j4,17658	0,48197 -j0,26447	215,43910 -j4,28029	0,48356 -j0,26596
ЭС-2	216,91430 -j1,66800	0,52866 -j0,27945	218,88759 -j1,60302	0,52326 -j0,27698	218,78123 -j1,71025	0,52678 -j0,27809

продолжение таблицы 3

ЭС-3	213,98620 +j9,93668	0,57684 -j0,31708	216,19982 -j5,45968	0,57026 -j0,31456	216,09553 -j5,57386	0,57304 -j0,31675
ЭС-4	220,17420 +j0,75134	0,36395 -j0,18043	221,94956 +j0,21245	0,36038 -j0,17908	221,95560 +j0,08413	0,36286 -j0,18002
ЭС-5	225,19517 +j5,32414	0,30356 -j0,16158	226,43150 +j5,15236	0,30175 -j0,16098	226,43365 +j5,02341	0,30258 -j0,16106
ЭС-6	225,04139 +j8,59931	0,54267 -j0,24587	225,90180 +j8,45537	0,54035 -j0,24586	225,89790 +j8,36593	0,54126 -j0,24457
ЭС-7	214,14420 -j5,70768	0,21157 -j0,11305	215,26580 -j5,67782	0,21070 -j0,11238	214,97047 -j5,76407	0,21101 -j0,11254

Последняя четвертая глава "Математическая модель относительных приростов потерь мощностей электроэнергетической системы" на основании матричного уравнения эквивалентированной ЭЭС (29) строятся функции потерь мощностей, которые в неявно выраженной форме представляются в виде:

$$P_n = P_n(P_m, Q_m, U_m, \Psi_m); \quad (41)$$

$$P_p = P_p(P_m, Q_m, U_m, \Psi_m).$$

Рассматриваются следующие типы частных производных, представленных в матричных записях:

$$\frac{\partial P_n}{\partial P_m} = \left[\frac{\partial P_n}{\partial P_m} \right] + \left[\frac{\partial P_n}{\partial U_n} \right] \left[\frac{\partial U_n}{\partial P_m} \right] + \left[\frac{\partial P_n}{\partial \Psi_m} \right] \left[\frac{\partial \Psi_m}{\partial P_m} \right]; \quad (42)$$

$$\frac{\partial P_n}{\partial Q_m} = \left[\frac{\partial P_n}{\partial Q_m} \right] + \left[\frac{\partial P_n}{\partial U_n} \right] \left[\frac{\partial U_n}{\partial Q_m} \right] + \left[\frac{\partial P_n}{\partial \Psi_m} \right] \left[\frac{\partial \Psi_m}{\partial Q_m} \right]; \quad (43)$$

$$\frac{\partial P_p}{\partial P_m} = \left[\frac{\partial P_p}{\partial P_m} \right] + \left[\frac{\partial P_p}{\partial U_n} \right] \left[\frac{\partial U_n}{\partial P_m} \right] + \left[\frac{\partial P_p}{\partial \Psi_m} \right] \left[\frac{\partial \Psi_m}{\partial P_m} \right]; \quad (44)$$

$$\frac{\partial P_p}{\partial Q_m} = \left[\frac{\partial P_p}{\partial Q_m} \right] + \left[\frac{\partial P_p}{\partial U_n} \right] \left[\frac{\partial U_n}{\partial Q_m} \right] + \left[\frac{\partial P_p}{\partial \Psi_m} \right] \left[\frac{\partial \Psi_m}{\partial Q_m} \right]; \quad (45)$$

Первые слагаемые и левые множители в формулах (42-45) определяются с помощью аналитических выражений функции потерь мощностей (41).

Правые множители определяются с помощью системы нелинейных алгебраических уравнений установившегося режима ЭЭС, представленных в следующей неявно выраженной форме:

$$\begin{aligned} \Phi_{pm}(P_m, Q_m, U_m, \Psi_{um}) &= 0; \\ \Phi_{qm}(P_m, Q_m, U_m, \Psi_{um}) &= 0. \end{aligned} \quad (46)$$

Относительно (46) можно написать следующие выражения, представленные в матричной форме:

$$\left. \begin{aligned} \left[\frac{\partial \Phi_{pm}}{\partial P_m} \right] + \left[\frac{\partial \Phi_{pm}}{\partial U_n} \right] \left[\frac{\partial U_n}{\partial P_m} \right] + \left[\frac{\partial \Phi_{pm}}{\partial \Psi_{um}} \right] \left[\frac{\partial \Psi_{um}}{\partial P_m} \right] &= 0; \\ \left[\frac{\partial \Phi_{qm}}{\partial P_m} \right] + \left[\frac{\partial \Phi_{qm}}{\partial U_n} \right] \left[\frac{\partial U_n}{\partial P_m} \right] + \left[\frac{\partial \Phi_{qm}}{\partial \Psi_{um}} \right] \left[\frac{\partial \Psi_{um}}{\partial P_m} \right] &= 0. \end{aligned} \right\} \quad (47)$$

$$\left. \begin{aligned} \left[\frac{\partial \Phi_{pm}}{\partial Q_m} \right] + \left[\frac{\partial \Phi_{pm}}{\partial U_n} \right] \left[\frac{\partial U_n}{\partial Q_m} \right] + \left[\frac{\partial \Phi_{pm}}{\partial \Psi_{um}} \right] \left[\frac{\partial \Psi_{um}}{\partial Q_m} \right] &= 0; \\ \left[\frac{\partial \Phi_{qm}}{\partial Q_m} \right] + \left[\frac{\partial \Phi_{qm}}{\partial U_n} \right] \left[\frac{\partial U_n}{\partial Q_m} \right] + \left[\frac{\partial \Phi_{qm}}{\partial \Psi_{um}} \right] \left[\frac{\partial \Psi_{um}}{\partial Q_m} \right] &= 0. \end{aligned} \right\} \quad (48)$$

Из матричного уравнения (47) определяем (49), а из уравнения (48) получаем (50)

$$\begin{bmatrix} \frac{\partial U_m}{\partial P_m} \\ \frac{\partial \Psi_{um}}{\partial P_m} \end{bmatrix} = - \begin{bmatrix} \frac{\partial \Phi_{pm}}{\partial U_n} & \frac{\partial \Phi_{pm}}{\partial \Psi_{um}} \\ \frac{\partial \Phi_{qm}}{\partial U_n} & \frac{\partial \Phi_{qm}}{\partial \Psi_{um}} \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} \frac{\partial \Phi_{pm}}{\partial P_m} \\ \frac{\partial \Phi_{qm}}{\partial P_m} \end{bmatrix} \quad (49)$$

$$\begin{bmatrix} \frac{\partial U_m}{\partial Q_m} \\ \frac{\partial \Psi_{um}}{\partial Q_m} \end{bmatrix} = - \begin{bmatrix} \frac{\partial \Phi_{pm}}{\partial U_n} & \frac{\partial \Phi_{pm}}{\partial \Psi_{um}} \\ \frac{\partial \Phi_{qm}}{\partial U_n} & \frac{\partial \Phi_{qm}}{\partial \Psi_{um}} \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} \frac{\partial \Phi_{pm}}{\partial Q_m} \\ \frac{\partial \Phi_{qm}}{\partial Q_m} \end{bmatrix} \quad (50)$$

Можно заметить, что в обоих матричных выражениях (49) и (50) имеются одинаковые обращенные матрицы.

Теперь рассмотрим уравнения установившегося режима (46). Поскольку стационарные узлы являются узлами типа P-Q, то систему нелинейных алгебраических уравнений установившегося режима (46) в конечной форме можно представить как:

$$\begin{aligned} \Phi_{pm}(U_m, \Psi_{um}) &= 0; \\ \Phi_{qm}(U_m, \Psi_{um}) &= 0. \end{aligned}$$

Применяя относительно системы уравнений установившегося режима ЭЭС (53) метод Ньютона-Рафсона, соответствующее рекуррентное выражение можно представить в исходном виде:

$$\begin{bmatrix} U_m \\ \Psi_{um} \end{bmatrix}^{u+1} = \begin{bmatrix} U_m \\ \Psi_{um} \end{bmatrix}^u - \begin{bmatrix} \frac{\partial \Phi_{pm}}{\partial U_n} & \frac{\partial \Phi_{pm}}{\partial \Psi_{um}} \\ \frac{\partial \Phi_{qm}}{\partial U_n} & \frac{\partial \Phi_{qm}}{\partial \Psi_{um}} \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} \Phi_{pm} \\ \Phi_{qm} \end{bmatrix} \quad (52)$$

Можно заметить, что матрица Якоби рекуррентного выражения (52) полностью совпадает с квадратными матрицами выражения (49) и (50). Это говорит о том, что определение частных производных является определенным этапом расчета установившегося режима ЭЭС.

В такой постановке определения относительных приростов рассматриваются впервые.

В работе рассматривается множество примеров по расчету численных значений частных производных с целью установления весомости отдельных слагаемых, входящих в соответствующие полные численные значения отдельных слагаемых раскрывают полную картину по определению относительных приростов потерь.

Исследовались схемы, состоящие из 10, 22, 46 и 100 узлов.

Ниже в таблицах 4 и 5 приводятся численные значения соответствующих полных частных производных для схем, состоящих из 10 и 22 узлов, только для стационарных узлов из-за ограниченности объема.

Таблица 4

Узлы	$\frac{\partial \Pi_p}{\partial P_m}$	$\frac{\partial \Pi_p}{\partial P_m}$	$\frac{\partial \Pi_p}{\partial Q_m}$	$\frac{\partial \Pi_p}{\partial Q_m}$
ЭС-0	0,046792	0,090742	-0,010352	-0,023058
ЭС-1	0,072248	0,073459	0,014135	1,020751
ЭС-2	0,060237	0,092185	0,013481	0,020371
ЭС-3	0,020879	0,052681	0,053652	0,110682
ЭС-4	0,030227	0,065728	0,009848	-0,024183

Таблица 5

Узлы	$\frac{\Delta P_p}{\Delta P_m}$	$\frac{\Delta P_p}{\Delta P_m}$	$\frac{\Delta P_p}{\Delta Q_m}$	$\frac{\Delta P_p}{\Delta Q_m}$
ЭС-0	0,027992	0,098939	0,017938	0,076398
ЭС-1	0,065038	0,215989	0,027898	0,103068
ЭС-2	0,141489	0,323495	0,072865	0,149682
ЭС-3	0,072853	0,263575	0,031735	0,120835
ЭС-4	0,113848	0,329653	0,049865	0,149728
ЭС-5	0,079869	0,329855	0,042859	0,159738
ЭС-6	0,072879	0,329788	0,022787	0,172498
ЭС-7	0,029963	0,135957	0,019616	0,083029

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Предлагается метод Ньютоновского типа для решения системы нелинейных алгебраических уравнений Y-Z гибридных уравнений установившегося режима ЭЭС.
2. Впервые для решения Y-Z гибридных уравнений установившегося режима ЭЭС применяется слабый метод Ньютона или Ньютона-Канторовича и его модификации.
3. Построена математическая модель установившегося режима 2Z эквивалентированной ЭЭС и для ее реализации применяются методы Ньютона-Рафсона и Ньютона-Канторовича.
4. Разработанные вычислительные алгоритмы и Паскаль программы позволяют решить задачу расчета установившегося режима ЭЭС в реальном масштабе времени.
5. Построена математическая модель относительных приростов потерь мощностей, основанная на 2Z эквивалентированной ЭЭС.
6. Рассматриваемая задача определения относительных приростов потерь мощностей является подмоделю общей математической модели оптимизации режима ЭЭС, ее можно рассматривать как определенный этап расчета установившегося режима методом Ньютона-Рафсона или Ньютона-Канторовича.
7. Полученные теоретические результаты по диссертационной работе внедрены в учебный процесс при чтении специальных курсов как в

бакалавратуре, так и в магистратуре для электроэнергетических специальностей.

Основные положения работы отражены в следующих публикациях:

1. Эль Саид И.М., Абдурахим Я.С., Тамразян М.Г. Относительные приросты потерь мощностей в электроэнергетических системах // Известия АН Армении.-Сер.ТН.-1993.-N2-3.-С.77-82.
2. Тамразян М.Г. Об одном Y-Z методе расчета установившегося режима электроэнергетической системы // НАН и ГИУ Армении.- Сер.ТН.-1996.-N3.-С.138-142.
3. Хачатрян В.С., Тамразян М.Г. Математическая модель установившегося режима эквивалентной электроэнергетической системы и ее реализация // НАН и ГИУ Армении.- Сер.ТН.-1998.-N1.-С.44-50
4. Тамразян М.Г. Об одном упрощенном Y-Z методе расчета установившегося режима электроэнергетической системы // НАН и ГИУ Армении.- Сер.ТН.-1998.-N2.-С.
5. Тамразян М.Г. Расчет установившегося режима электроэнергетической системы при диагонализации матрицы Якоби рекуррентного выражения Ньютона - Рафсона // Сборник материалов Годичная научная конференция Государственного Инженерного Университета Армении.- Ереван.- 1998 .- С.- 79-80.
6. Тамразян М.Г. Решение Y-Z формы уравнения установившегося режима электроэнергетической системы слабым методом Ньютона //Сборник материалов Годичная научная конференция Государственного Инженерного Университета Армении.- Ереван.- 1998 .- С.- 81-82.

ԱՄՓՈՓՈՒՄ

Ներկայացված աշխատանքը նվիրված է էլեկտրատեղեկատվական համակարգերի կայունացված ռեժիմների հաշվմանը, երբ նրանց պասիվ մասը ներկայացված է Y-Z հիբրիդային մատրիցայի տեսքով: Ստացված Y-Z տեսքի ոչ գծային հանրահաշվական հավասարումների համակարգի լուծման համար կիրառվում է Նյուտոն-Ռաֆսոնի նոր մոդիֆիկացված մեթոդները: Նույն հավասարումների լուծման համար կիրառվում է Նյուտոն-Կանտորովիչի և նրան մոդիֆիկացված մեթոդները: Հիմնվելով հաշվարկման ալգորիթմի վրա մշակվել է Պասկալ ծրագրեր, որոնք թույլ են տալիս լուծել էլեկտրատեղեկատվական

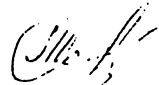
15.05.2014

համակարգերի կայունացված ռեժիմների խնդիրները իրական ժամանակի մասշտաբում:

Կառնուցվել է նաև 22 համարժեքացված էլեկտրաէներգետիկական համակարգերի կայունացված ռեժիմների համակարգ, որի համար նորից կիրառվում է Նյուտոն-Ռաֆսոնի և Նյուտոն-Կանտորովիչի մեթոդները:

Աշխատանքում առաջարկվում է նոր մեթոդ կորուստների հարաբերական աճերի որոշման համար, և այն դիտվում է որպես կայունացված ռեժիմի հաշվման համապատասխան էտապ:

Ստացված տեսական արդյունքները ներդրված են բակալավրատուրայում և մագիստրատուրայում կարդացվող հատուկ դասընթացում << էլեկտրաէներգետիկական համակարգերի հատուկ հարցերը >> :



Տպագրված է ՀՀ ԲՈՎ-ի պապրվերով

Հանձնված է տպագրության 08.11.98 թ: Պատվեր 244: Տպաքանակ 70:

Տպագրված է «Դավիթ» կոոպերատիվի տպարանում:
Երևան, Տերյան 72:

