



**“Fizika-2005”
Beynəlxalq Konfrans
International Conference
Международная Конференция**



**7 - 9 İyun June 2005 №147 səhifə page 567-571
Июнь 2005 №147 стр. 567-571**

Bakı, Azərbaycan

Baku, Azerbaijan

Баку, Азербайджан

**О МОДЕЛИРОВАНИИ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ПОТОКОВ ЭНЕРГИИ
В ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СЕТЯХ**

БАЛАМЕТОВ А.Б., МУСАХАНОВА Г.С., ХАЛИЛОВ Э.Д., БАЛАМЕТОВ Э.А.

*АзНИИЭ и ЭП, Баку
E-mail: balametov.aznie@mail.ru
Тел. 4-31-11-57, факс 4-32-80-76*

Рассматриваются математические модели распределения потоков энергии в ЭС, использующие измерения системы учета ЭЭ. Показано, что задача распределения потоков энергии также должна основываться на уравнениях узловых напряжений (УУН). Приводятся результаты анализа на тестовых примерах. Анализируются эквивалентные модели распределения потоков энергии.

Основным товаром производства на рынках электроэнергии, за которую проводятся финансовые расчеты, является электрическая энергия. Современные автоматизированные системы контроля и учета электроэнергии должны контролировать распределение потоков энергии во всей электрической сети.

Возникают новые целевые задачи при функционировании и управлении ЭЭС, требующие разработки соответствующих моделей анализа режимов распределения потоков электроэнергии на разных временных интервалах, так как по мере внедрения и развития систем автоматизированных систем коммерческого учета электроэнергии - АСКУЭ и внедрения в энергетику рыночных принципов управления основной период проведения финансовых расчетов, который составляет 1 месяц, будет сокращаться.

В данном докладе рассматривается задача распределения потоков энергии для расчета балансов ЭЭ за месяц при отсутствии АСКУЭ. По аналогии с задачей потокораспределения может быть поставлена задача расчета распределения потоков электрической энергии.

Измерительные комплексы учета ЭЭ построены на принципах интегрирования мгновенной мощности.

Известно, что для расчета потерь ЭЭ в элементе сети используется выражение

$$\Delta W_n = 3R \int_0^T I_t^2 dt \quad (1)$$

где R - активное сопротивление элемента сети; I_t - сила тока.

Расчеты потерь ЭЭ по упрощенным моделям приводят к погрешностям.

Задачу расчета потоков энергии можно свести к задаче потокораспределения средних мощностей:

$$P_{cp} = \frac{W}{T} \quad (2)$$

При адекватности такого подхода возможно использование методов и программ расчета установившихся режимов электрических сетей. Однако УУН для моделирования потоков энергии по усредненным мощностям не обеспечивает адекватности.

В общем случае УУН не могут применяться в качестве уравнений состояния для задачи расчета потоков энергии. Основной причиной этой неадекватности является различие в расчете потерь мощности и энергии.

ОСОБЕННОСТИ ЗАДАЧИ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ПОТОКОВ ЭНЕРГИИ ПО СРАВНЕНИЮ С ЗАДАЧЕЙ РАСЧЕТА УР ЭС.

Расчет УР ЭС производится по параметрам режима для фиксированного момента времени, для которого известна топология ЭС. Расчет режима распределения потоков энергии предполагает (интегральное) рассмотрение задачи на длительных интервалах времени - сутки, месяц, квартал, год и т.п. При этом на длительных интервалах времени возможны изменения топологии сети, связанные с аварийными, ремонтными и эксплуатационными

отключениями воздушных линий, трансформаторов, выключателей и другого оборудования. Поэтому расчет режима распределения потоков энергии необходимо производить в условиях изменения топологии ЭС и схемы ее замещения.

Задача моделирования распределения потоков энергии может быть поставлена в виде оперативного расчета технических потерь ЭЭ; выявления и локализации очагов коммерческих потерь ЭЭ, финансовых взаиморасчетов между участниками энергообмена; расчетных потоков для разрешения споров; анализа метрологических характеристик систем учета электроэнергии; выявления измерительных комплексов энергии, имеющие ложные показания.

Постановка задачи расчета ЭР приобретает большое значение в связи с переходом на рыночные механизмы управления в энергетике. К примеру, в Азербайджанской Республике системообразующие сети относятся к АОТ «Азерэнерджи», а распределительные сети 110 кВ и ниже переданы на управление. В связи с этим в последние годы в АЗНИИЭ и ЭП для АО «Азерэнерджи» проводились НИР по анализу потоков ЭЭ, оцениванию потерь ЭЭ и проверке измерительных комплексов энергии по показаниям счетчиков учета ЭЭ.

Для учета реализованной в распределительные сети ЭЭ, на переданных на управление РЭС на 110 электрических станциях и подстанциях АОТ «Азерэнерджи» установлены 655 расчетных счетчиков. Общее количество измерительных комплексов учета ЭЭ, обеспечивающих составление баланса ЭЭ АОТ «Азерэнерджи», составляет около 1022. Из них около 600 шт. являются современными микропроцессорными типа «Индиго». Эти счетчики многофункциональные, интервал усреднения мощности составляет 5, 10, 15, 20.....60 минут, глубина хранения информации до 900 суток. Расчеты коэффициентов формы графика нагрузки можно определить обработкой результатов потоков активной и реактивной мощности, снятых из архива измерений счетчиков цифровым интерфейсом. Коммерческий и технический учет ЭЭ в ЭЭС осуществляется современными микропроцессорными счетчиками. Разновременность снятия показаний с приборов учета ЭЭ практически отсутствует.

Период снятия показаний счетчиков для расчетного учета электроэнергии обычно составляет 1 месяц. Расчеты могут проводиться для месячных, квартальных и годовых периодов. При наличии автоматизированных систем контроля и учета ЭЭ период измерения и расчета может составлять часы или даже минуты.

При расчете распределения потоков энергии возможно нижеследующие ситуации, связанные с обеспеченностью электрической сети средствами учета электроэнергии:

1. Число измерений недостаточно для решения задачи расчета распределения потоков ЭЭ. Число измерений меньше, чем число неизвестных. Для определения потоков энергии необходима дополнительная информация.

2. Число измерений равно числу неизвестных в схеме сети. Избыточность измерений отсутствует. Выявление и сглаживание ошибок в измерениях невозможно.

3. Число измерений больше, чем число неизвестных. Система переопределена. Имеет место информационная избыточность.

В [6] для моделирования распределения потоков энергии предлагается использование уравнений баланса в узлах с применением формул для расчета потерь в ветвях и в узлах (шунтах) по средним напряжениям узлов, получаемым из архива измерений напряжений из ОИК, АСКУЭ, без использования УУН.

УРАВНЕНИЯ СОСТОЯНИЯ ЗАДАЧИ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ПОТОКОВ ЭНЕРГИИ.

Уравнения состояния при решении задачи распределения потоков энергии определяются системой уравнений узловых балансов ЭЭ. Расчетные оценки узловых W_i и линейных W_{ij} - потоков ЭЭ образуют для всех N узлов сети систему ограничений-равенств вида

$$W_i = \sum_{j=1}^N W_{ij} \quad (3)$$

где $i=1, 2, 3, \dots, N$.

Нагрузочные потери активной ЭЭ на всех линейных элементах сети за время T рассчитываются по формуле [2-3]

$$\Delta W_n = W_{ij} - W_{ji} = \frac{k_{\phi}^2 \cdot (W_{Pij}^2 + W_{Qij}^2)}{U_{cp}^2 T} \cdot R_{ij} \quad (4)$$

где R_{ij} - активное сопротивление элемента сети; k_{ϕ}^2 - коэффициент формы графика нагрузки потоков активной и реактивной мощности; U_{cp} - среднее напряжение i -го узла за время T .

Потоки активной W_{Pij} и реактивной W_{Qij} ЭЭ в формуле (4) являются расчетными величинами.

Постоянные потери ЭЭ на всех поперечных элементах схемы замещения сети определяются из

$$\Delta W_{ixx} = U_{cp}^2 T g_i \quad (5)$$

где g_i - активная проводимость на землю в i -м узле.

Часть потоков энергии является измеряемой. Задача распределения потоков энергии ставится как расчет потоков энергии для всех элементов сети. В связи с тем, что потоки в начале и конце ветви различаются на значения технических потерь, векторы - столбцы потоков активной энергии имеют удвоенную к числу ветвей размерность.

Уравнения состояния задачи энергораспределения являются нелинейными. Для учета нелинейности необходима организация итерационного процесса расчета.

Данный метод [6] для моделирования распределения потоков энергии имеет следующие недостатки. Для моделирования распределения потоков энергии требуется более подробный учет составляющих потерь ЭЭ - потери на корону, в

изоляторах от загрязнения и в измерительных приборах. В алгоритме предполагается, что средние напряжения узлов получаются из архива измерений напряжений из ОИК, АСКУЭ. При отсутствии информации об измерениях напряжений по какой либо причине постановка приводит к погрешностям моделирования.

В работе [6] задача распределения потоков энергии решается без учета УУН электрической сети. Более приемлемой постановкой задачи является представление сети эквивалентной радиальной.

Более эффективными являются модели распределения потоков энергии на основе УУН, приводящие к унификации расчетов и использования стандартных программных средств расчета установившихся режимов.

Причиной возникновения погрешностей расчета потерь ЭЭ в элементах сети является применение упрощенных формул для расчета потерь энергии.

Моделирование распределения потоков энергии в сети по уравнениям узловых балансов энергии на основе первого закона Кирхгофа и Ома и расчет потерь энергии в элементах сети по выражению по известным потокам энергии и их дисперсиям.

Потокораспределение обычно производится на основе УУН, вытекающих из первого закона Кирхгофа и закона Ома. Такой путь эффективнее, чем решение системы нелинейных уравнений.

УУН для описания распределения потоков энергии с усреднением мощностей в общем случае не могут применяться в качестве уравнений состояния. Только при неизменности топологии сети и несущественных изменениях режима это возможно.

Расчет ЭР на основе УУН чувствителен к изменению топологии и режимных параметров и при неточности исходной информации может привести к существенным погрешностям и к неадекватности модели ЭР. Поэтому закругление модели ЭР в данном случае может дать лучшие результаты.

Моделирование ЭР по упрощенной модели на основе первого закона Кирхгофа менее чувствительно к неточности в исходной информации. Потери ЭЭ для нормальных режимов и схем находятся в пределах 5-8% от суммарного отпуска ЭЭ, а погрешности в определении потерь ЭЭ расчетным путем при неточности информации находятся в пределах 10%. Таким образом, погрешности в расчете ЭР по этой методике находятся в пределах 1%, поэтому упрощение модели допустимо для предварительных практических расчетов.

Моделирование потоков энергии в элементах сети использовалось при расчетах потерь ЭЭ в радиальных ЭС [1-4]. В частности, метод расчета «в два этапа» реализован в программах АзНИИЭ и ЭП [4,5].

Для анализа результата статьи предлагается постановка задачи расчета потерь ЭЭ в радиальных распределительных ЭС по показаниям счетчиков учета ЭЭ методом расчета «в два этапа» [4,5]:

1. На первом этапе по сформированному направленному графу схемы радиальной сети производится расчет потерь ЭЭ и потоков энергии в

элементах сети по заданным отпускам энергии в узлах (потребителей) по условно линейной схеме, начиная от удаленных узлов в направлении балансирующего узла по формуле

$$\Delta W_{ij} = \frac{k_{\phi}^2 \cdot (W_{Pij}^2 + W_{Qij}^2)}{U_{cp}^2 T} \cdot R_{ij},$$

где R_{ij} - активное сопротивление элемента сети; k_{ϕ} - коэффициент формы графика нагрузки потоков активной и реактивной мощности; U_{cp} - среднее напряжение i -го узла за время T .

Определяются потоки энергии в элементах сети

$$W_{Pij} = W_{Pi} + \Delta W_{Pij} + \Delta W_{Pjш},$$

$$W_{Qij} = W_{Qi} + \Delta W_{Qij} + \Delta W_{Qjш},$$

где W_{Pi} , W_{Qi} - отпуск ЭЭ от узла j , $\Delta W_{Pjш}$, $\Delta W_{Qjш}$ - потери в шунтах элемента сети.

2. На втором этапе производится расчет напряжений, начиная от балансирующего узла (БУ) по направлению к концу линий по данным начала ветви по формуле

$$U_j = \sqrt{\left(U_i - \frac{P_{ij} \cdot R_{ij} + Q_{ij} \cdot X_{ij}}{U_i} \right)^2 + \left(\frac{P_{ij} \cdot X_{ij} - Q_{ij} \cdot R_{ij}}{U_i} \right)^2}.$$

При расчете напряжения на конце трансформаторной ветви учитывается фактический коэффициент трансформации.

3. Итеративное уточнение потерь энергии и потоков энергии в элементах сети до достижения желаемой точности по разнице суммарного потока ЭЭ в БУ между последними итерациями k и $k-1$, т.е.

$$\left| W_{PBY}^{(k)} - W_{PBY}^{(k-1)} \right| \leq \xi_P$$

$$\left| W_{QBY}^{(k)} - W_{QBY}^{(k-1)} \right| \leq \xi_Q$$

где ξ_P и ξ_Q - малые положительные числа.

Практически приемлемое решение методом расчета «в два этапа» обычно достигается за 2-3 приближения.

В данной постановке совместно решаются задачи распределения потоков активной и реактивной электроэнергии в ЭС с расчетом потерь ЭЭ по напряжениям усредненного режима. Расчет производится приближенно. В отличие от применения численных методов решения нелинейных уравнений, использование метода расчета «в два этапа» лишено вычислительных трудностей.

Количество нелинейных уравнений ЭР по активной и реактивной энергии для разомкнутых сетей в методе расчета «в два этапа» составляет $2(N-1)$.

В предлагаемой в [6] постановке размерность модели совместного решения систем нелинейных уравнений ЭР по активной и реактивной энергии численными методами составляет 4M. Для

сложнозамкнутых кольцевых сетей необходимо иметь линейные измерения ЭЭ (показания технических счетчиков ЭЭ), равные числу независимых контуров $M-N+1$. При этом задачу ЭР замкнутых сетей также возможно приводить к разомкнутой схеме. Размерность нелинейных уравнений для ЭР для кольцевых сетей увеличиваются на $4(M-N+1)$. Соответствующие ветви независимых контуров, в которых задаются линейные измерения ЭЭ, разрываются, и представляются дополнительными узлами с соответствующим разнесением линейных потоков энергии в узлы. Поэтому использование данного метода не ограничивается сложностью схемы.

Постановка задачи расчета ЭР приобретает большое значение в связи с переходом на рыночные механизмы управления в энергетике. К примеру, в Азербайджанской Республике системообразующие сети относятся к АОО «Азерэнержи», а распределительные сети 110 кВ и ниже переданы на управление. В связи с этим в последние годы в АЗНИИЭ и ЭП для АОО «Азерэнержи» проводились НИР по анализу потоков ЭЭ, оцениванию потерь ЭЭ и проверке измерительных комплексов энергии по показаниям счетчиков учета ЭЭ.

МОДЕЛИ РАСЧЕТА ПОТОКОВ ЭНЕРГИИ ПРИВЕДЕНИЕМ ИСХОДНОЙ СХЕМЫ К ЭКВИВАЛЕНТНОЙ ПО ПОТОКАМ ЭНЕРГИИ.

Схема сложной ЭС приводится к эквивалентной радиальной путем разрыва определенных ветвей кольцевой ЭС и представлением их нагрузками в узлах (по показаниям счетчиков технического учета ЭЭ).

При этом возможны следующие модели расчета распределения потоков энергии на основе УУН:

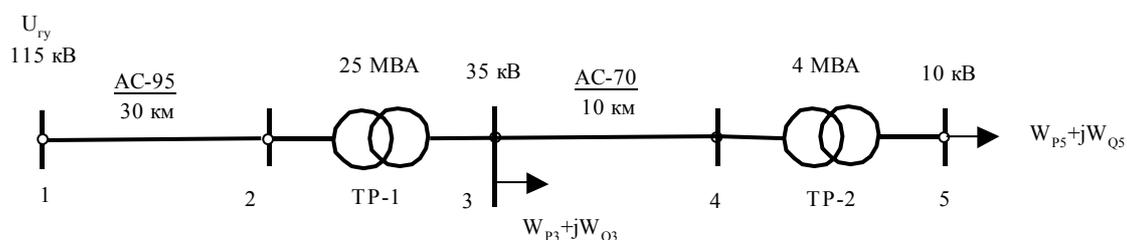


Рис. Схема тестовой распределительной электрической сети.

Таблица. Сопоставление результатов расчетов потоков энергии по разным методикам.

Потоки активной энергии								
Метод расчета	W_{P12}	W_{P21}	W_{P23}	W_{P32}	W_{P34}	W_{P43}	W_{P45}	W_{P54}
«в два этапа»	-12331.60	12119.16	-12119.16	12045.04	-2045.04	2020.08	-2020.08	2000
По модели ЭР	-12331.60	12119.15	-12119.15	12045.04	-2045.04	2020.08	-2020.08	2000
Потоки реактивной энергии								
Метод расчета	W_{Q12}	W_{Q21}	W_{Q23}	W_{Q32}	W_{Q34}	W_{Q43}	W_{Q45}	W_{Q54}
«в два этапа»	-5240.13	5042.39	-5042.39	3785.62	-785.62	764.42	-764.42	600
По модели ЭР	-5239.98	-5042.05	-5042.05	3785.65	-785.65	764.45	-764.45	600

Расчеты по методу «в два этапа» с расчетом средних напряжений получены за три приближения с точностью 0.03 тыс. кВт*час по активной энергии и 0.08 тыс. кВАр*час по реактивной энергии. Значения напряжений узлов, полученные по средним значениям

1. По напряжениям узлов ЭС, полученным расчетами характерных режимов и вычислением средних значений напряжений узлов.

2. По напряжениям узлов ЭС, полученным расчетом режима по средним значениям нагрузок и определением потерь с учетом коэффициента формы.

3. Эквивалентным представлением схемы ЭС по мощности и энергии путем замены R и X умножением на соответствующие коэффициенты формы элементов сети.

Для анализа эффективности метода расчета ЭР и оценки погрешности моделей необходимо сопоставление результатов для радиальных и кольцевых тестовых примерах электрических сетей.

Пример. Схема распределительной ЭС с количеством узлов 5 и ветвей 4 (рис.).

Параметры трансформатора ТР-1 $S = 25$ МВА, потери в трансформаторе $\Delta P_{\text{ТР}23} = 120$ кВт, $\Delta P_{\text{XX}23} = 30$ кВт, $u_k = 10.5\%$, $i_0 = 0.7\%$, коэффициент трансформации 110/37.

Параметры трансформатора ТР-2 $S = 4$ МВА, потери в трансформаторе $\Delta P_{\text{ТР}23} = 33.5$ кВт, $\Delta P_{\text{XX}23} = 6.7$ кВт, $u_k = 7.5\%$, $i_0 = 1.0\%$, коэффициент трансформации 35/10.5.

Отпуск ЭЭ $W_{P5} = 2000$ тыс. кВт*час, $W_{Q5} = 600$ тыс. кВАр*час, $W_{P3} = 10000$ тыс. кВт*час, $W_{Q3} = 3000$ тыс. кВАр*час.

В расчетах коэффициенты формы графиков для потоков ветвей принимались одинаковыми и равными $k_{\phi}^2 = 1.2$. Были произведены расчеты предлагаемым в [6] методом энергораспределения и методом «в два этапа», результаты которых приведены в таблице.

нагрузок в соответствии с методом «в два этапа» при $U_1 = 115$ кВ, имеют значения: $U_2 = 112.84$ кВ, $U_3 = 36.62$ кВ, $U_4 = 36.16$ кВ и $U_5 = 10.60$ кВ.

В соответствии с предлагаемой в [6] моделью ЭР была сформирована и решена система 16 нелинейных

уравнений методом Ньютона. Система уравнений состоит из 8 уравнений баланса активной и реактивной энергии и 8 уравнений для потерь активной и реактивной энергии (рис.) в ветвях. Напряжения в узлах были заданы такими же, как при расчете потоков по методу «в два этапа». Результаты расчетов практически совпадают (таблица). Для оценки эффективности модели расчета ЭР также были произведены предварительные расчеты для тестовой 6-и узловой кольцевой сети 110-220 кВ с 7-ю ветвями с двумя независимыми контурами. Кольцевая схема была приведена к радиальной с 8-ю узлами и 7 ветвями. Метод расчета «в два этапа» показывает эффективность его применения для анализа потоков энергии при приведении исходной схемы любой сложности к эквивалентной радиальной. В предлагаемой в [6] постановке задачи ЭР требуется составление систем нелинейных уравнений с количеством $4 \cdot M + 4(M - N + 1)$ и для решения систем нелинейных уравнений ЭР используются численные методы расчета. При этом для задач большой размерности возникают известные трудности с хранением и обработкой информации с ненулевыми элементами и устойчивостью сходимости итерационных процессов. Предполагается использование архива измерений напряжений из ОИК, АСКУЭ. При отсутствии информации об измерениях напряжений по какой либо причине постановка приводит к погрешностям моделирования.

Сопоставление результатов показывает, что расчеты методом «в два этапа» [4-5] обладают

следующими преимуществами. Метод расчета «в два этапа» не требует формирования и решения системы уравнений численными методами, при задании средних значений напряжений расчет производится в один этап без итерационного уточнения потерь в элементах сети, при отсутствии информации о средних значениях напряжений расчет производится по напряжениям, полученным из усредненного режима по потокам энергии. Для моделирования ЭР метод «в два этапа» имеет явные преимущества.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Задачу расчета потоков энергии можно свести к задаче потокораспределения средних мощностей. Более эффективным являются модели распределения потоков энергии на основе УУН. Рассматриваются модели расчета распределения потоков энергии на основе уравнений узловых напряжений.
2. Предлагается постановка задачи расчета потерь ЭЭ в радиальных распределительных ЭС по показаниям счетчиков учета ЭЭ на базе метода расчета режима сети «в два этапа». Для расчета сложной ЭС ее схема представляется эквивалентной радиальной путем разрыва определенных ветвей кольцевой ЭС.
3. Анализ эффективности расчета потоков энергии и оценки погрешности модели произведен сопоставлением результатов расчета на тестовых примерах электрических сетей.

-
- [1]. Электрические системы. Электрические расчеты, программирование и оптимизация режимов. Под. Ред. В.А. Веникова. М., «Высшая школа», 1973, 320 с.
- [2]. Г.Е. Пospelов, Н.М. Сыч. Потери мощности и энергии в электрических сетях. Под ред. Г.Е. Пospelова. М.: Энергоиздат, 1981. - 216 с.
- [3]. Потери электроэнергии в электрических сетях энергосистем. В.Э.Воротницкий, Ю.С.Железко, В.Н.Казанцев и др. М.: Энергоатомиздат, 1983.- 368 с.
- [4]. Мамедяров О.С., Баламетов А.Б. Программа расчета установившегося режима многоузловых радиальных электрических сетей с оценкой качества напряжения. - В кн.: Вопросы разработки методов и средств управления режимами энергосистем. - М.: Изд-во ЭНИН, 1982, с. 56-59.
- [5]. Баламетов А.Б., Исмаилов Ф.С., Мусаханова Г.С., Керимова С.Н. Опыт эксплуатации комплекса программирования режимов предприятий электрических сетей с использованием ЭВМ районного энергоуправления. -В кн.: Разработка методов и средств оптимального управления режимами энергетических систем. - М.: Изд-во ЭНИН, 1984, с. 76-82.
- [6]. Паздерин А.В. Проблема моделирования распределения потоков электрической энергии в сети. – Электричество. 2004, № 10.