

D. V. Fedosha

Optimal design of power systems

The method for optimal design of electrical systems based on the method of the equipotential contours is proposed, it implements the simultaneous problem solution of the determination of the of load nodes number, the distribution of collectors among them, the definition of meaningful enforcement power sources, taking into account the discreteness of the application design elements of the system, as well as allowing the designer to minimize the subjective assessment of the formation of structure network.

Key words: network, power supply system, the load unit, design, topology, power consumers, power supply.

УДК 621.316.11

А. П. Заболотный

Канд. техн. наук, доцент Запорожского национального технического университета

ПОСТРОЕНИЕ СТРУКТУРЫ СИСТЕМ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ, СОДЕРЖАЩИХ «МАЛУЮ ГЕНЕРАЦИЮ», НА ОСНОВЕ ПРИНЦИПОВ ДЕКОМПОЗИЦИИ И РЕДУКЦИИ

Предложен метод оптимального проектирования систем электроснабжения, содержащих «малую генерацию», на основе принципов декомпозиции и редукции, реализующий одновременное решение задач определения числа узлов нагрузки, распределения между ними электроприемников и учитывающий дискретность конструктивного исполнения элементов системы.

Ключевые слова: система электроснабжения, малая генерация, узел нагрузки, проектирование, декомпозиция, редукция, топология.

Тенденции роста доли «малой генерации» в энергобалансе связанные с широким внедрением возобновляемых источников электроэнергии (ветроэнергетических установок, гелиоэлектростанций, миниГЭС, когенерационных биогазовых установок и т. п.) обуславливают ряд технических проблем в сетях электроснабжения. К ним относятся: решение проблем электромагнитной совместимости, необходимость замены коммутирующей и защитной аппаратуры, изменение настроек релейной защиты и автоматики. Основная проблема несогласованного присоединения разрозненных источников «малой генерации» к сети – это сложность управления и прогнозирования режимов работы энергосистемы, связанные с возникновением перетоков мощности по сети.

Рост тарифов на электрическую энергию обуславливают значительное увеличение составляющей стоимости потерь электроэнергии в сетях при ее передаче и распределении. Особую актуальность это приобретает в сетях электроснабжения предприятий АПК, что обусловлено их протяженностью, разветвленностью и использованием низких классов напряжения.

Уменьшение составляющей стоимости потерь электроэнергии возможно лишь путем оптимизации структуры энергосистемы во время реконструкции существующих сетей электроснабжения.

Решение задач формирования оптимальной структуры сети электроснабжения (определение количества источников питания и распределение между ними приемников электроэнергии, а также организации промежуточных узлов нагрузки) требует математического моделирования и оптимизации процессов энергообмена в такой системе с учетом всех электроприемников, а также учетом специфики работы разрозненных источников «малой генерации».

Построение математической модели (ММ) таких систем в некоторых случаях возможно на принципах макро моделирования целью которого является снижение вычислительных затрат путем упрощения ММ при сохранении достаточной для практики точности результатов моделирования. Поставленная цель достигается посредством предварительного расчленения (декомпозиции) ММ с последующим упрощением (редукцией) ее составных частей. Наиболее приемлемым при анализе и оптимизации энергетических процессов в системе содержащей «малую генерацию» является метод подсхем, при этом алгоритмы декомпозиции могут различаться способами принимаемого расчленения, характером представления подсхем и их взаимосвязей, а также методами обоснования. Процесс выделения отдельных частей системы требует определения границ и граничных условий, при этом процесс декомпозиции – неоднозначная процедура.

Эффективность использования метода подсхем в первую очередь зависит от того, насколько рационально исходная схема разбита на подсхемы. К факторам, влияющим на процессы декомпозиции, необходимо отнести следующие: выделение отдельных функциональных блоков; учет повторяемости отдельных частей схемы; локализация линейных и нелинейных частей схемы; учет связанности отдельных компонентов схемы и т. д. [1].

Формально процесс декомпозиции полной модели можно представить таким образом:

$$D(M) (M_1 M_2, \dots, M_i, \dots, M_n), i = 1, \dots, n. \quad (1)$$

Здесь $D(M)$ – оператор декомпозиции, причем по необходимости процесс декомпозиции может использоваться неоднократно – m (декомпозиция по глубине

$j = 1, \dots, m$), в частности и по отношению к отдельным составным частям (подсхемам) полной модели.

При макро моделировании энергетических процессов в системе содержащей «малую генерацию» наиболее рационально проводить расчленение на подсхемы по функциональному назначению в соответствии с квазинепрерывностью потока энергии. Так как процесс передачи энергии в такой системе связан с протеканием довольно сложных электромагнитных процессов, сопровождающихся изменением величины потерь за счет влияния работы «малой генерации» как на систему электропотребителей, так и на систему источников питания, работа которых, в свою очередь, определяет режим работы самой «малой генерации», целесообразно определить генерирующие и потребляющие подсистемы, выделить накопители и диссипаторы энергии.

Таким образом, получаем иерархическую систему «вложенных» друг в друга макромоделей, начиная с полной эквивалентной электрической схемы, отражающей все стороны функционирования системы содержащей «малую генерацию», включая динамические и аварийные режимы и кончая упрощенными схемами, отражающими отдельные режимы работы того или иного звена системы.

Редукция эквивалентной электрической схемы фактически приводит к редукции системы дифференциальных уравнений, описывающих процессы в схеме, при этом сохраняя четкий физический смысл и наглядность при переходе с одного уровня редукции на другой, что является весьма важным при решении задач оптимизации.

Блок-схема алгоритма оптимизации процессов энергообмена в системе содержащей «малую генерацию» на основе принципов декомпозиции и редукции приведена на рис. 1 и включает следующие этапы:

1. Формирование полной модели системы и ее анализ (М).
2. Декомпозиция исходной модели (M_{nm}).
3. Формирование ряда редуцированных моделей ($M(K)_{nm}$)
4. Решение задачи анализа для каждой из подсхем.
5. Построение функции цели (F_1, F_2, \dots, F_p)
6. Выбор метода оптимизации ($\Omega_1, \Omega_2, \dots, \Omega_q$).
7. Решение задачи оптимизации – нахождение экстремума.
8. Переход на последующий уровень редукции.
9. Проверка полученных решений на глобальный экстремум на полной модели (М).

Построенный в зависимости от принятой точности ряд редуцированных моделей в рассматриваемом алгоритме используется непосредственно в организации процесса оптимизации и зависит от выбора способов редукции, а также от условий их применения: однократно или многократно, последовательное или параллельное построение множества редуцированных моделей ($M(K)_{nm}$).

Кроме того, трудности поиска оптимальных параметров связаны не только с большой сложностью вычислительных процедур, но и со сложностью формулировки

критериев оптимальности, которые достаточно верно отражали бы физическую сущность электромагнитных процессов, протекающих в системе содержащей «малую генерацию». Это вызывает необходимость построения нескольких целевых функций (F_1, F_2, \dots, F_p) с последующим перебором их в процессе оптимизации. Причем, в зависимости от характера поиска оптимальных параметров при многопараметрической оптимизации с целью сокращения машинного времени целесообразно осуществлять переход от одного метода оптимизации к другому и наоборот ($\Omega_1, \Omega_2, \dots, \Omega_q$).

Используемые в настоящее время основные подходы решения задач построения оптимальной структуры сети электроснабжения базируются на использовании оценочных и оптимизационных моделей. Первые служат для определения технико-экономических показателей для заданного проектировщиком варианта сети. Вторые – для определения оптимального варианта конфигурации сети в пределах принятых проектировщиком допущений в соответствии с принятым критерием оптимальности. При этом в оптимизационных моделях необходимо учитывать дискретность некоторых величин (сечение проводов и кабелей, мощность и количество трансформаторов, количество присоединений к РП и т. д.).

Оптимальное проектирование систем электроснабжения содержащих «малую генерацию» предполагает одновременное решение задач: определения числа узлов нагрузки и их координат; распределения между ними электроприемников; определения конструктивного исполнения (мощности) источников питания; учета дискретности конструктивного исполнения элементов системы электроснабжения; а также учета специфики работы разрозненных источников «малой генерации».

Используемые в настоящее время методы проектирования таких систем электроснабжения осуществляют решение вышеуказанных задач по отдельности и без учета источников «малой генерации», что не дает возможности говорить об оптимальности получаемых решений по критериям минимума капитальных затрат и потерь электроэнергии.

Анализ существующих подходов к формированию структуры систем электроснабжения показал, что существует метод, способный решать выше перечисленные задачи одновременно – это метод эквипотенциальных поверхностей [2].

Суть данного метода заключается в проведении аналогии между нагрузкой электроприемников (P_i), расположенных в точках (x_i, y_i), и потенциалами некоторых источников энергии, расположенных в тех же точках. Потенциалы этих источников равны нагрузке приемников. При удалении от точки расположения приемника потенциал от источника, расположенного в той же точке, будет уменьшаться. Совокупность всех потенциалов источников образует потенциальную поверхность имеющую максимум, который определяет место (координаты) установки источника питания.

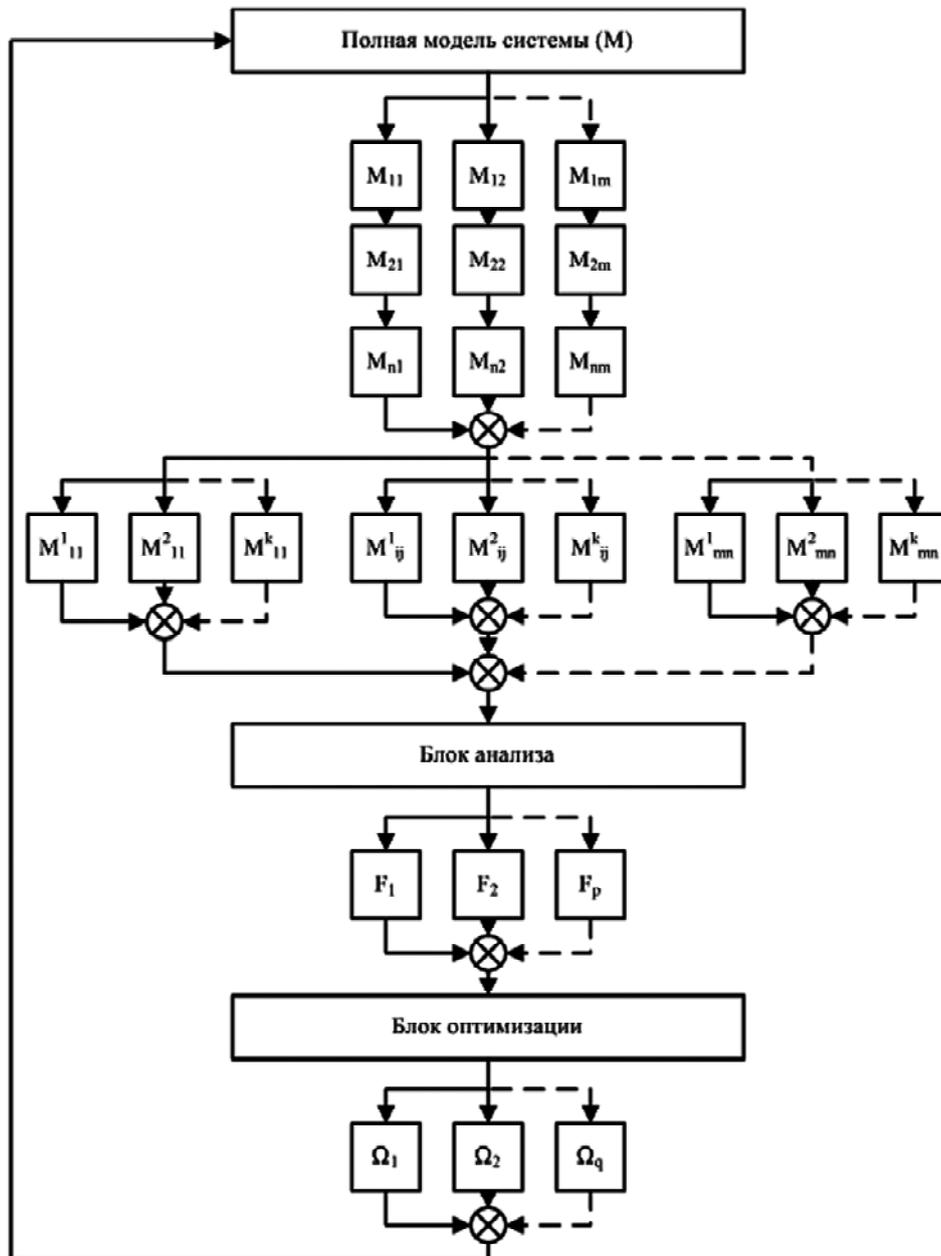


Рис. 1. Блок-схема алгоритма оптимизации процессов энергообмена в системе содержащей «малую генерацию» на основе принципов декомпозиции и редукции

Аналогичную поверхность можно построить и для источников «малой генерации», где P_i принимает значение равное величине генерируемой энергии, но со знаком минус.

Совмещение этих двух поверхностей приводит к изменению координат максимума, тем самым уточняются координаты установки источника питания.

Таким образом, построение структуры системы электроснабжения содержащей источники «малой генерации», можно представить в виде следующего алгоритма.

На первом этапе строится потенциальная поверхность для электроприемников работающих в режиме потребления.

На втором этапе строится поверхность для источников «малой генерации».

Затем производится наложение этих поверхностей и на суммарной поверхности выделяется максимум функции, в координатах которого и будет расположен источник питания.

Важным моментом в определении этих координат является учет зон запрета прокладки линий и установки источников питания. Для этого возможно использовать методы распознавания образов, в соответствии с которыми предусмотрено разбиение пространства объекта, на области, которые не пересекаются, каждая из которых соответствует отображению одного и того же класса, к которому допустимо элементарное математическое описание [3].

На следующем этапе производится отбор электроприемников по «потенциальному» критерию, а затем по «техническому» с учетом дискретности конструктивного исполнения элементов. В результате чего формируется группа электроприемников первого источника питания, которые исключаются из дальнейшего рассмотрения при формировании структуры сети.

После этого, вновь строятся две (если остались источники «малой генерации»), либо одна (если все источники «малой генерации» присоединены к источникам питания) потенциальные поверхности и осуществляется формирование группы электроприемников второго источника питания.

В результате циклического действия (до тех пор пока все электроприемники не получают своего источника питания) формируется радиальная структура системы электроснабжения, после чего осуществляется проверка возможности организации промежуточных источников питания.

Используя свойство предложенного подхода, согласно которому источником питания (включая и источники «малой генерации»), а также электроприемником могут выступать узлы любых уровней системы электроснабжения, возможно выполнить декомпозицию отдельных участков потенциальной поверхности для образования в пределах этих зон промежуточных узлов нагрузки. Это позволяет на уровне системы электроснабжения, с которого начинается расчет, рассматривать эти промежуточные узлы нагрузки как приемники электрической энергии. При этом приемники, которые присоединяются к этому промежуточному узлу нагрузки, непосредственно не учитываются на потенциальной поверхности, т.е. исключаются, но потребляемая ими мощность учитывается на начальном уровне через мощность промежуточного узла нагрузки.

Целесообразность устройства промежуточных узлов нагрузки определяется на основе оценочной модели, исходные данные для которой (приемники, для которых возможно оборудование промежуточных узлов нагрузки) определяются по трем признаками: «по сильной технической группе»; «по слабой технической группе»; «по доле сильной группы».

Под термином «сильная техническая группа» понимается группа электроприемников, сформированная по «техническому» критерию, которая имеет оптимальный коэффициент загрузки источника питания, исходя из условий избыточности. Под термином «слабая техническая группа» понимается группа электроприемников, сформированная по «техническому» критерию, которая сформирована при условии недостаточности и коэффициентом загрузки источника питания меньшим за приемлемый. Под термином «доля сильной группы» понимается группа электроприемников «сильной группы», которая выделена из нее по дополнительным критериям (например, показатель разброса нагрузки, который используется в тензорном методе) [4].

Технико-экономический расчет базируется на сравнении двух вариантов выполнения локального участка структуры сети, границы которой определяются по приведенным выше трем признаками.

Таким образом, метод сравнительной оценки предусматривает анализ локального участка структуры сети с определением ряда технически целесообразных вариантов ее выполнения и дальнейшее сравнение этих вариантов между собой по критерию удельных затрат.

Данный подход позволяет не только автоматизировать построение оптимальной структуры распределительной сети содержащей источник «малой генерации», а и снизить размеры капитальных вложений при построении такой сети за счет применения промежуточных узлов нагрузки (определение их оптимального количества и местоположения).

На последнем этапе алгоритма производится оценка возможности (по критериям минимума капитальных затрат и потерь электроэнергии) замены отдельных участков радиальной сети на магистральные участки.

ВЫВОДЫ

Использование предлагаемого подхода позволяет построить инженерные методики проектирования оптимальной структуры распределительных сетей содержащих источник «малой генерации» с минимальными коммуникационными потерями, оценить потенциал энергосбережения уже существующих сетей, произвести оценку эффективности их работы при реконфигурации, а также провести оценку капиталовложений при реконструкции части сети.

Кроме того, на основе совместного использования оценочных и оптимизационных моделей, данный подход дает возможность построить структуру сети электроснабжения содержащей источник «малой генерации» по замкнутой схеме, что позволит существенно уменьшить эксплуатационные затраты, необходимые для поддержания нужного уровня надежности сети и повысить пропускную способность существующих сетей в 1,3–1,5 раз без дополнительных затрат на повышение сечения проводов и кабелей.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Заболотный, А. П.* Макромоделирование процессов энергообмена в системе «Электропривод-Сеть» на основе принципов декомпозиции и редукции / *А. П. Заболотный* // Вестник национального технического университета «Харьковский политехнический институт». Тематический выпуск «Проблемы автоматизированного электропривода. Теория и практика». – Харьков : НТУ «ХПИ», 2010. – № 28. – С. 218–219.
2. *Авдеев, І. В.* Розвиток методу еквіпотенційних контурів для проектування розподільчої мережі / *І. В. Авдеев, А. П. Заболотний, Д. В. Федоша, С. А. Теліпайло, В. С. Мамбаєва* // Вісник Національного університету «Львівська політехніка». Тематич-

- ний випуск «Електроенергетичні та електромеханічні системи». – 2009. – № 637. – С. 3–7.
3. Качан, Ю. Г. О возможности распознавания топологии оптимальной системы электроснабжения / Ю. Г. Качан, В. В. Дьяченко // Гірничі електромеханіка та автоматика. – 2007. – № 78. – С. 3–5.
 4. Заболотний, А. П. Алгоритм визначення проміжних вузлів навантаження радіальних розподільчих мереж / А. П. Заболотний, Д. В. Федоша, К. І. Парусімова, С. В. Усенко // Електротехніка та електроенергетика. – 2010. – № 1. – С. 66–71.

Стаття надійшла до редакції 05.07.2011.

А. П. Заболотний

Побудова структури систем електропостачання, що містять «малу генерацію», на основі принципів декомпозиції і редукції

Запропоновано метод оптимального проектування систем електропостачання, які містять «малу генерацію», на основі принципів декомпозиції і редукції, який реалізує одночасне вирішення задач визначення числа вузлів навантаження, розподілу між ними електроприймачів та враховує дискретність конструктивного виконання елементів системи.

Ключові слова: система електропостачання, мала генерація, вузол навантаження, проектування, декомпозиція, редукція, топологія.

A. P. Zabolotny

Design of the structure of power systems containing «minor generation» based on the principles of decomposition and reduction

In this article the method of optimal design of power systems containing «minor generation», based on the principles of decomposition and reduction, is proposed; it implements the simultaneous solution of the problem of determination of the load nodes number, collector distribution among them, taking into account the discreteness of the system elements embodiment.

Key words: power supply system, minor generation, unit load design, decomposition, reduction, topology.

УДК 620.9:621.311.153

С. В. Серебренніков¹, К. Г. Петрова²

¹Канд. техн. наук, доцент Кіровоградського національного технічного університету

²Аспірант Кіровоградського національного технічного університету

УДОСКОНАЛЕННЯ КРИТЕРІЇВ ПРІОРИТЕТНО-КРОКОВОГО МЕТОДУ РЕГУЛЮВАННЯ ЕЛЕКТРОСПОЖИВАННЯ

Досліджено достатність критеріїв пріоритетно-крокового методу для оцінки пріоритетності варіанту вирівнювання графіка електроспоживання у реально досяжних межах зсувів його складових у часі. Доведено необхідність доповнення критеріїв показниками нерівномірності графіку та аналізу динаміки всієї їх сукупності при пошуку найбільш прийняттого варіанту регулювання.

Ключові слова: режим електроспоживання, зсув навантажень у часі, критерії вирівнювання, графік електричних навантажень, показники нерівномірності.

ВСТУП

Нерівномірність добових графіків електроспоживання значно ускладнює забезпечення перманентного балансу електроенергії (ЕЕ).

Підтримання електроенергетичного балансу можна досягти шляхом нарощування маневрових генеруючих потужностей або цілеспрямованим регулюванням режиму електроспоживання у часі. Оскільки більшість генеруючих станцій в Україні є базовими та нерегульованими, то раціонально використовувати саме другий шлях.

АНАЛІЗ ДОСЛІДЖЕНЬ ТА ПУБЛІКАЦІЙ

У роботах [1–4] висвітлюються технічні та економічні аспекти управління електроспоживанням для його ви-

рівнювання протягом доби. Разом з тим, у зазначених роботах не враховуються специфіка та індивідуальні можливості окремих груп споживачів до регулювання, не пропонується однозначних критеріїв, алгоритмів та моделей, за якими можна було б синхронізувати процес виробництва-споживання ЕЕ в часі. Тому, актуальним є пошук простих інженерних методик, що дозволять знизити загальну нерівномірність графіків електричних навантажень (ГЕН) як окремих споживачів, так і об'єднаної енергосистеми (ОЕС) в цілому.

Метою даної роботи є удосконалення критеріїв пріоритетно-крокового методу для оцінки пріоритетності варіанту регулювання у реально досяжних часових межах вирівнювання загального споживання електроенергії промисловими споживачами (ПС) обласних енергокомпаній (ЕК).