



Методология системного расчета компенсации реактивных мощностей в электросетях промышленных предприятий и энергосистемах

Е.Ю.Микаэльян, М.А. Трубицин

Ростовский государственный университет путей сообщения

Аннотация: Разработана модель системного расчета компенсации реактивной мощности в электросетях промышленных предприятий и энергосистемах. Учтены три основные проблемы: многомерность, информационная разобщенность и неполнота информации. Рассмотрена квадратичная модель компенсации реактивной мощности. Приведены основные этапы методики расчёта, максимально использующей преимущества квадратичной модели и способы ее улучшения.

Ключевые слова: компенсирующие устройства, компенсация реактивной мощности, энергосистема, электросети промышленных предприятий, квадратичная модель, математическая модель, неполнота информации.

В настоящее время делается попытка объединить все имеющиеся теоретические и практические результаты в области компенсации реактивных мощностей потребителей в единую концепцию и максимально увязать создаваемую систему нормативных документов с теоретически оптимальными решениями[1.2]. Известно, что главной особенностью рассматриваемой проблемы в её широкой постановке - оптимизация размещения потребительских компенсирующих устройств (КУ) является её системный характер, обусловленный снижением токовых нагрузок всех тех сетевых элементов, которые располагаются между точками подключения (КУ) и источниками реактивной мощности (РМ) энергосистем: генераторами электростанций(ЭС), синхронными компенсаторами (СК) воздушными линиями напряжением 110кВ и выше[3.4]. В связи с этим возникают три основные сложности:

1) многомерность; 2) сильная информационная разобщенность отдельных подсистем (питающая сеть 110кВ и выше и распределительные

сети); 3) неполнота и недостоверность исходной информации как по технико-экономическим показателям сети, так и по условиям её развития[5-10] .

Понижение размерности задачи.

В общем виде минимизируемая функция приведенных затрат, представляющая собой первичную или полную модель процесса компенсации, для некоторых фиксированных расчётных условий может быть записана следующим образом:

$$Z = Z_0 + \sum_{i \in N} \sum_{j \in m_i} Z_{ij} + C_0(\Delta P_0 + \sum_{i \in N} \Delta P_i) \quad (1)$$

где Z_0 и Z_j - затраты на КУ в питающей сети и в j -ом узле сети i -й подсистемы, ΔP_0 и ΔP_i - потери активной мощности в этих подсистемах, C_0 - расчётная стоимость потерь; N - множество узлов питающей сети, к которым присоединены распределительные подсистемы, m_i - множество узлов каждой i -подсистемы, в которой планируется установка КУ.

Такая формулировка задачи носит абстрактный характер: во-первых, невозможно одновременно иметь необходимую сетевую информацию по всем подсистемам (хотя бы потому, что они находятся в различных стадиях своего развития) и во-вторых, даже при наличии всей информации, задача не решается из-за своей высокой размерности.

Данная сложность, как известно, преодолевается декомпозицией задачи по отдельным сетевым уровням с последующей увязкой полученных частных решений; при этом одновременно с понижением размерностей решаемых частных задач устраняется информационный барьер между подсистемами, поскольку теперь идёт обмен лишь обобщенной информацией[8-10].

В общем виде ход расчёта выглядит так.

Первоначально минимизируются затраты

$$Z = Z_0 + \sum_{i \in N} Z_i + C_0(\Delta P_0 + \sum_{i \in N} \Delta P_i, \varepsilon) \quad (2)$$

по питающей сети, что даёт N значений входных реактивных мощностей $Q_{\sigma i}$ – для распределительных подсистем. По каждой распределительной сети решается локальная оптимизационная задача,

$$Z_i = \sum_{j \in m_i} Z_j + C_0 \Delta P_i \quad (3)$$

при балансовом условии

$$\sum_{j \in m_i} Q_{kj} = Q_i - Q_{\sigma i} \quad (4)$$

Существуют методы декомпозиции, при которых полученные таким путём решения практически совпадают с решением глобальной задачи. Сюда относятся статистическое эквивалентирование, схемное эквивалентирование и парциальные расчёты [8], позже развитые в метод сокращения сети [9], метод аналитического [10] и электрического моделирования подсистем. Эти методы рассчитаны на различное математическое и вычислительное обеспечение и, главное, на различную по характеру исходную информацию. Можно, однако, констатировать, что в данной области проблемы наблюдается определенная завершённость в результатах и необходима лишь разработка обобщенных рекомендаций и методик.

Принципы математического моделирования. Рассмотрим более подробно оптимизационную задачу по питающей сети. Массив исходной информации можно представить в виде двух уровней.

Первый уровень – дискретное множество ω вариантов развитых сети на некоторой расчётный период (новые межсистемные связи и генерирующие мощности, схемы развития отдельных энергорайонов, варианты напряжений и др.)

Второй уровень – заданные параметры задачи, которые разобьём на два подмножества: а) подмножество x_1 величин, описывающих параметры сети, её конфигурацию, коэффициенты трансформации и нагрузки ;

б) подмножество x_2 , технико-экономических показателей, имеющее нижнюю $x_{2\text{ мин}}$ и верхнюю $x_{2\text{ макс}}$ границу. В общем случае каждый элемент множества ω порождает «своё» множество x параметров задачи. Предполагается, что множество ω есть тот минимум разнообразия в вариантах развития сети, к которому сжимается всё первоначальное множество соответствующих альтернатив путем экспертных оценок.

Искомые переменная проектирования являются величины $Q_{эi}$; одновременно существует некоторое множество зависимых переменных – состояния сети, к которым можно отнести величины напряжения в узлах. Эталонную модель оптимизации представим в виде минимизации приведенных затрат.

$$Z_{ПС} = \varphi_0 [Q_{э}; \omega(x_1, x_2)] \quad (5)$$

в условиях состояния сети

$$\psi(U, Q_{э}, x_1) = 0 \quad (6)$$

Определяемыми двумя законами Кирхгофа. Кроме того все переменные задачи должны принадлежать некоторому допустимому множеству решений.

Организация эталонной модели представляет довольно сложный процесс, который оправдало проводить либо в качестве оценочного расчёта, для проверки более простых моделей, либо для оптимизации эксплуатационных режимов при точно заданной исходной информации.

В последнем случае, однако возникает естественное противоречие между требованием программного управления в реальном времени и длительностью счёта.

Основная цель при проектировании, в условиях неопределенности и недостоверности исходной информации, - получение гарантированной

оценки принимаемого решения, что требует многовариантных расчётов по различным сценариям (см.ниже)

Многократность расчетов от нескольких десятков до нескольких сотен требует создания быстрых алгоритмов, что возможно при некотором закруглении моделей и упрощении логики самих алгоритмов. Отсюда и возникает необходимость в построении асимптотических моделей КРМ, степень упрощения которых диктуется необходимой точностью решения задачи, согласующейся с точностью исходной информации. В табл. 1 приведён соответствующий набор моделей, частично разработанных авторами (некоторые разновидности квадратичной модели φ_3 и уточнённой проектной модель φ_2).

Таблица 1

Классификация моделей КРМ	Назначение	Решаемые задачи
Эталонная	Оценочные расчеты	Проверка асимптотических моделей
Эксплуатационная	Оптимизация и управление сети в реальном времени	Регулирование во времени мощностей КУ
Экономическая проектная	Проектирование КРМ с учётом уровня напряжений в узлах	Размещение КУ по условиям минимума приведенных затрат
Балансовая проектная квадратичная	1.Проектирование КРМ без учета уровней напряжений в узлах 2.Разработка теоретических положений	1.Размещение заданной мощности КУ в сети 2. Установление количественных и качественных закономерностей оптимизации

Наибольшее распространение в теоретических исследованиях и на практике получила сильно агрегированная квадратичная модель, которая

благодаря целому ряду допущений даёт тем не менее наиболее целостное представление о процессе компенсации и позволяет видеть его основные закономерности [10]. Как показали экспериментальные расчёты на реальных схемах данная модель может успешно применяться при проектировании

По иному следует строить расчёты в связи с неопределённостью элементов множества X , где сосредоточены показатели с их возможным непрерывным изменением в некоторых достаточно гарантированных пределах. Их влияние на результат можно проследить с помощью рационально организованных расчетных экспериментов, что позволяет очерчивать сетевые зоны, особенно чувствительные к тому или иному фактору.

Заслуживает внимание и подход, ориентированный хотя и не на оптимальное решение, но - на заведомо приемлемое. Так, при рассмотрении экономической задачи КРМ, когда "последняя порция" конденсаторов в каждом узле должна окупаться за нормативный срок, её решение определяется обобщенной экономической константой $Z^* = \frac{Z_K}{C_O}$

где Z_K - линейные затраты на конденсатора. Для исключения риска из неоправданной установки в расчёты следует вводить максимально возможную величину $Z_{\text{макс}}^* = \frac{Z_{K, \text{макс}}}{C_{O, \text{мин}}}$.

Такой подход можно квалифицировать как принцип заведомой целесообразности первого шага решения.

Модель экономической проектной КРМ. Опыт показал, что квадратичная модель не приемлема для решения экономической задачи компенсации: неучёт действительных уровней напряжения в сети не позволяет достоверно оценивать эффект снижения потерь мощности и электроэнергии. Ниже приведены основные этапы методики расчёта, максимально

использующей преимущества квадратичной модели и усовершенствующие последнюю в указанном отношении.

1. Исходная питающая сеть эквивалентруется в полный многоугольник с диагоналями ЭМД обычной операцией исключения промежуточных узлов, причем операции ведутся отдельно в G -форме и B -форме. В результате вся сеть разбивается на N одинаковых сетевых модулей (рис.1).

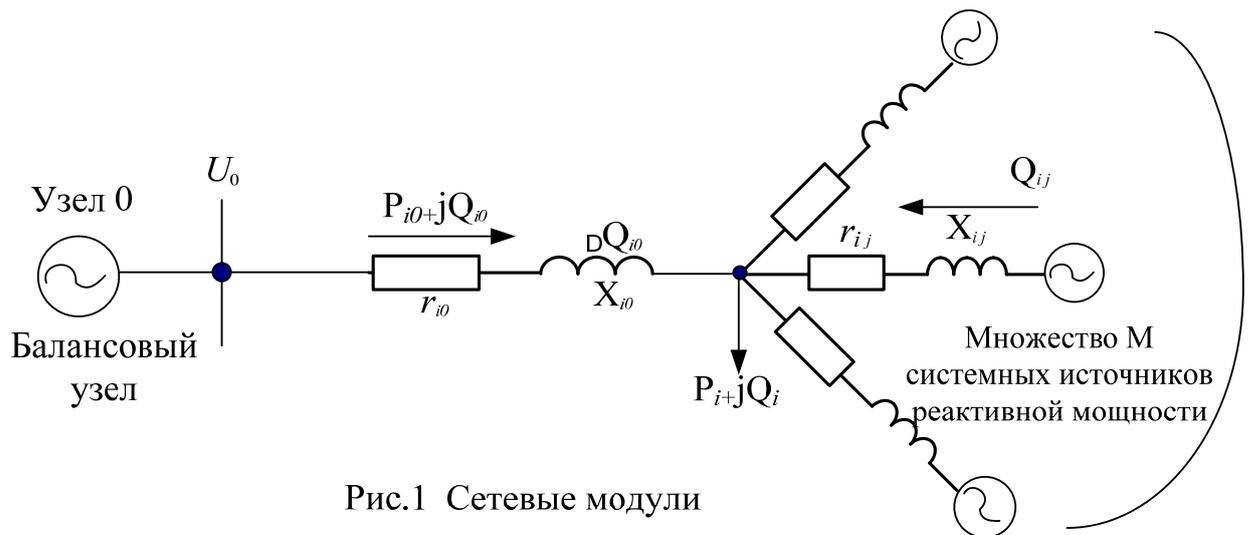


Рис.1 Сетевые модули

2. Расчёт удельных приростов потерь для i -го нагрузочного узла ведется по каждой ветви звезды :

а) для базисной ветви по формуле :

$$\delta_{i0} = \frac{\partial \Delta P_{i0}}{\partial Q_{i0}} = \frac{2r_{i0}}{U_i^2} (Q_{i0} + \Delta Q_{i0}) \quad (7)$$

б) для ветви соединенной с системным источником реактивной мощности

$$\delta_{ij} = \frac{\partial \Delta P_{ij}}{\partial Q_{ij}} = \frac{2r_{ij}}{U_i^2} Q_{ij} \quad (8)$$

3. Организуется итеративная процедура, направленная на определение таких мощностей ветвей при которых величины (7) и (8) равнялись бы некоторому заданному значению λ . Величина λ определяется либо

заданным балансовым условием, либо экономическими показателям при решении экономической КРМ.

4. Входная мощность каждого нагрузочного узла определяется так:

$$Q_{\partial i} = \sum_{i=0}^m Q_{ij}$$

Литература

1. Гибадуллин А.А. Модернизация электроэнергетики // Инженерный вестник Дона, 2012, №2. URL: ivdon.ru/magazine/archive/n2y2012/797 /
 2. Гибадуллин, А.А. Инвестиции в электроэнергетике // Инженерный вестник Дона, 2012. №2. URL:ivdon.ru/magazine/archive/n2y2012/863. /
 3. Hopwood, Bill Sustainable development: mapping different approaches / В.Норвуд, М. Меллор, Г. О'Бриен // Sustainable development. - 2005.- Vol.13,Is.1.-pp.38-52.
 4. Kelley, C.T. Iterative methods for optimization // Society for Industrial and Applied Mathematics, 1999. – 196 p.
 5. Кураков Л. П., Кураков В. Л., Кураков А. Л. Экономика и право: словарь-справочник. М.: Вуз и школа. 2004. —1072 с.
 6. Зайцев А.И., Плехов А.С. Применение компенсационных преобразователей в целях энергосбережения // Электротехнические комплексы и системы управления. Воронеж, 2010. - №4-(20).-с.38-44.
 7. Железко Ю.И. Компенсация реактивной мощности в сложных электрических системах. -М: Энергоиздат,1981. -200с
 8. Журавлев В.Г, Арион В.Д. Применение принципа сокращения схемы для наиболее выгодного размещения источников реактивной мощности // Промышленная энергетика. -1976- №4. -с36-39
-



9. Глазунов А.А., Гремяков А.А., Строев В.А. Техничко-экономическое эквивалентирование электрических сетей в задачах компенсации реактивной мощности//Электричество -1979-№9. -с64-67

10. Ковалёв И.Н. Два метода расчета компенсации реактивных нагрузок в электрических сетях// Электричество -1973-№10. -с5-11.

References

1. Gibadullin A.A. Inženernyj vestnik Dona (Rus), 2012, №2. URL: ivdon.ru/magazine/archive/n2y2012/797.

2. Gibadullin A.A. Inženernyj vestnik Dona (Rus), 2012, №2. URL: ivdon.ru/magazine/archive/n2y2012/797.

3. Hopwood, B., Mellor M., O'Brien G. Sustainable development. 2005. Vol.13, Is.1. pp.38-52.

4. Kelley, C.T. Society for Industrial and Applied Mathematics, 1999. 196 p.

5. Kurakov L. P., Kurakov V. L., Kurakov A. L. Jekonomika i pravo: slovar'-spravochnik. [Economics and law: dictionary-reference]. M.: Vuz i shkola. 2004. 1072 p.

6. Zajcev A.I., Plehov A.S. Jelektrotehničeskie kompleksy i sistemy upravlenija. Voronezh, 2010. №4-(20). pp.38-44.

7. Zhelezko Ju.I. Reactive power compensation in complex electrical systems. M: Jenergoizdat, 1981. 200p.

8. Zhuravlev V.G, Arion V.D. Promyshlennaja jenergetika. 1976, №4. Pp.36-39.

9. Glazunov A.A., Gremjakov A.A., Stroev V.A. Jelektrichestvo (Rus)-1979, №9. Pp. 64-67.

10. Kovaljov I.N. Jelektrichestvo, 1973, №10. Pp.5-11.