

УДК 65.01

**ОСНОВНЫЕ ПОДХОДЫ РЕАЛИЗАЦИИ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ  
УСТРОЙСТВАМИ FACTS С УЧЕТОМ ОПТИМИЗАЦИИ  
РЕЖИМА ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ****Долингер С.Ю., Люtareвич А.Г., Панкрац Т.В., Жданова В.А.***ФГБОУ ВО «Омский государственный технический университет», Омск,  
e-mail: Veimertysya@mail.ru*

В данной статье рассмотрены основные подходы реализации системы управления элементами Smart Grid с учетом оптимизации режима электроэнергетической системы. Проведен обзор применяемых методов оптимизации и сделан вывод о необходимости применения децентрализованной адаптивной системы управления устройствами FACTS.

**Ключевые слова:** методы оптимизации, устройства FACTS, интеллектуальные сети**CHARACTERISTICS OF THE PERIOD DOSE TITRATION  
WARFARIN IN PATIENTS WITH ATRIAL FIBRILLATION  
RELATIONSHIP WITH CLINICAL FACTORS****Dolinger S.Y., Lyutarevich A.G., Pankrats T.V., Zhdanova V.A.***Omsk State Technical University, Omsk, e-mail: Veimertysya@mail.ru*

We have done the analysis of the relationship characteristics of the individual selection of therapeutic doses of warfarin and clinical characteristics in patients with atrial fibrillation. Following characteristics of the period of selection of a dose were considered: a definitive therapeutic dose of warfarin in mg, duration of selection of a dose in days and the maximum value of the international normalised relation (INR), registered in the course of titration. Therapeutic dose of warfarin, duration of its selection and fluctuations in thus INR depend on the following clinical factors – a history of stroke, obesity, thyroid lesions, smoking, and concomitant therapy, specifically, the use of amiodarone, in cases of appointment of warfarin in patients with atrial fibrillation.

**Keywords:** optimization methods, FACTS devices, Smart Grid

Современный путь развития электроэнергетики требует повышения энергоэффективности, надежности и качества электроснабжения потребителя, что немислимо без применения новейших информационных и коммуникационных технологий [1, 2]. Все это получило отражение в Энергетической стратегии России на период до 2030 года, утвержденной распоряжением Правительства Российской Федерации от 13 ноября 2009 г. № 1715-р, и Стратегии развития электросетевого комплекса Российской Федерации, утвержденной распоряжением Правительства Российской Федерации от 3 апреля 2013 г. № 511-р. В представленных документах уделяется большое внимание созданию высокоинтегрированных интеллектуальных системообразующих и распределительных электрических сетей нового поколения в Единой энергетической системе России (интеллектуальные сети – SmartGrids).

Концепция SmartGrids (интеллектуальная сеть) предполагает применение новейших технологий, направленных на превращение пассивной электрической сети в активный элемент, параметры и характеристики которой изменяются в зависимости

от требований режимов работы в реальном времени, и принимает активное участие в процессах передачи и распределения электроэнергии.

В последние годы активно внедряется управление распределительными сетями на базе FACTS (FlexibleACTransmissionSystem s – гибкие системы передачи переменного тока), что позволяет реализовать концепцию SmartGrid с использованием уже установленного оборудования совместно с новыми средствами телемеханики, мониторинга и управления. На данный момент к устройствам технологии FACTS относят: устройства продольной компенсации, устройства поперечной компенсации [3], вставки постоянного тока, а также электромеханические преобразователи частоты (ЭМПЧ) на базе асинхронизированных синхронных машин АСМ, управляемые реакторы и синхронные компенсаторы. Таким образом, в настоящее время под устройствами FACTS, как правило, понимается совокупность устройств, устанавливаемых в электрической сети и предназначенных для стабилизации напряжения, повышения управляемости, оптимизации потокораспределения, снижения потерь, демпфирования низкочастотных

колебаний, повышения статической и динамической устойчивости, а в итоге – повышения пропускной способности сети и снижения потерь.

### Методы оптимизации

Для повышения эффективности работы электроэнергетической системы требуется обеспечить оптимальный режим работы. При решении данной задачи используют методы оптимизации. Под оптимизацией понимают поиск экстремума некоторой целевой функции. Параметр, который она определяет, является критерием оптимизации. Переменные, от которых зависит целевая функция, называются оптимизируемыми переменными. На них могут накладываться различные дискретные и непрерывные ограничения в виде равенств и неравенств.

Наиболее широкое распространение при оптимизации режимов электроэнергетических систем получили методы множителей Лагранжа, градиентные, динамического программирования и др. [4, 5, 6]. В настоящее время разрабатываются альтернативные методы оптимизации режимов на основе стохастических алгоритмов [7-10].

Рассмотрим целевую функцию  $F(x_1, x_2, \dots, x_n)$ . На переменные  $x_1, \dots, x_n$  этой функции наложено  $m$  ограничений-равенств  $g_i(x_1, x_2, \dots, x_n)$  (в каждое конкретное ограничение могут входить не все переменные, а только их часть). Тогда задача оптимизации формулируется следующим образом:

$$F(x_1, x_2, \dots, x_n) \rightarrow \min, \quad (1)$$

$$g_i(x_1, x_2, \dots, x_n) = 0, \quad i = 1, \dots, m. \quad (2)$$

Если  $m = n$ , то равенства (2) определяют однозначный набор значений  $x_1, \dots, x_n$ , и оптимизация невозможна. Поэтому, чтобы режим был оптимизируемым, должно выполняться условие  $m < n$ . Разность  $(n - m)$  называется числом степеней свободы системы и представляет собой количество переменных, которые в процессе оптимизации могут варьироваться независимо друг от друга.

**Метод множителей Лагранжа** состоит в переходе от условной оптимизации (1), (2) к безусловной [4, 5]. Этот переход осуществляется путем замены целевой функции (1) на функцию Лагранжа, которая имеет вид [5]

$$L(x_1, \dots, x_n, \lambda_1, \dots, \lambda_m) = F(x_1, \dots, x_n) + \sum_{i=1}^m \lambda_i g_i(x_1, \dots, x_n), \quad (3)$$

где  $\lambda_i$  – вспомогательные переменные, которые называются множителями Лагранжа.

Экстремум функции Лагранжа определяется классическим способом, т.е. из условия равенства нулю частных производных по всем переменным  $x_j, \lambda_j$ .

В результате получается следующая система уравнений:

$$\begin{cases} \frac{\partial F}{\partial x_j} + \sum_{i=1}^m \lambda_i \frac{\partial g_i}{\partial x_j} = 0, & j = 1, \dots, n, \\ g_i = 0, & i = 1, \dots, m. \end{cases} \quad (4)$$

Если все  $g_i = 0$ , то экстремум функции Лагранжа совпадает с экстремумом исходной целевой функции. Из (4) видно, что данное условие выполняется. Таким образом, значения  $x_1, \dots, x_n$ , полученные путем решения системы (5), являются решением задачи оптимизации.

Метод множителей Лагранжа позволяет найти общее решение задачи (если система (4) решается аналитически). На практике составление и решение этой системы как правило связано с громоздкими вычислениями и не позволяет непосредственно учесть ограничения-неравенства.

**Градиентный метод** заключается в переходе от предыдущего приближения переменных  $x_1, \dots, x_n$  к следующему на основе вычисления производных целевой функции  $F$ . В простейшем случае рекуррентное соотношение метода принимает вид

$$x_i^{[p+1]} = x_i^{[p]} - t \frac{\partial F}{\partial x_i}, \quad (5)$$

где  $p$  – номер приближения;  $t$  – шаг метода; производные вычисляются при  $p$ -м приближении переменных.

Совокупность производных, взятых с обратным знаком, определяет направление убывания целевой функции, т.е. ее градиент. Поэтому выражение (5) при правильном выборе шага будет последовательно приближать переменные к искомой точке минимума.

При выполнении условия расчет завершается

$$|F^{[p+1]} - F^{[p]}| \leq \varepsilon, \quad (6)$$

где  $\varepsilon$  – заданная точность.

Вместо условия (6) могут также использоваться другие способы контроля сходимости итерационного процесса.

Сходимость градиентных методов оптимизации в значительной мере определяется величиной шага  $t$ . В случае неправильного выбора шага может привести к расходимости метода. Поэтому выбор величины  $t$  представляет собой довольно сложную задачу и входит в алгоритм оптимизации.

В отличие от методов Лагранжа, градиентные методы позволяют учесть ограничения-неравенства. При оптимизации режимов электрических систем этот учет осуществляется на с использованием метода штрафных функций.

**Метод динамического программирования**, как правило, используется в тех задачах, в которых искомым ответ состоит из решений нескольких более простых задач [6]. В задачах оптимизации может быть много различных решений, но требуется выбрать оптимальное решение, при котором значение некоторого параметра будет минимальным или максимальным.

Если в качестве примера взять работу электрической станции с точки зрения её рентабельности, то критерием оптимальности будет прибыль, получаемая за отчетный период.

Одной из важной особенностью метода динамического программирования является то, что оптимальное решение, принимаемое на очередном этапе, не зависит от предыстории. Оптимизация происходит лишь с учётом факторов, характеризующих процесс в данный момент.

Принимаемое оптимальное решение на каждом этапе производится с учетом его последствий в будущем. Таким образом, динамическое программирование – это планирование с учетом перспективы.

Математически это можно записать следующим образом:

$$F_{k(u_k)} = \min(\max) \{Z(x_k, u_k) + F_k + 1(u_k + 1)\}, (7)$$

где  $F_k(u_k)$  – значение искомой целевой функции на  $k$ -м этапе;  $F_{k+1}(u_{k+1})$  – значение целевой функции на  $k + 1$  этапе;  $Z(x_k, u_k)$  – оценочная функция данного  $k$ -го этапа;  $x, u$  – выбранные параметры функции.

Основным функциональным уравнением динамического программирования или функциональным уравнением Беллмана представляет собой математическую запись принципа оптимальности (7). При решении оптимизационной задачи методом динамического программирования необходимо учитывать на каждом шаге те последствия, к которым приведет в будущем решение, принимаемое в данный момент. За исключением последнего шага, в котором процесс завершается. Таким образом процесс можно планировать, чтобы последний шаг сам по себе приносил максимальный эффект. Для принятия оптимального решения на последнем шаге, надо знать, чем мог закончиться предпоследний шаг. Отсюда следует что, надо сделать разные гипотезы о том, чем может закончиться предпоследний шаг и для каждой из гипотез найти решение,

при котором эффект последнего шага был бы максимальным. Такое оптимальное решение, найденное при условии, что предыдущий шаг закончился определенным образом, называют условно-оптимальным.

Во время движения от конца к началу оптимизируемого процесса определяются условно-оптимальные решения для каждого шага и вычисляется соответствующий эффект (условная оптимизация), то в дальнейшем останется только «пройти» весь процесс в прямом направлении (безусловная оптимизация) и «прочитать» оптимальную стратегию, которая нас интересует.

На вид целевой функции оказывают влияние используемые при оптимизации режимов электроэнергетических систем расходные характеристики, которые в ряде случаев имеют некоторые особенности (разрывы непрерывности, отклонения от условий выпуклости). Особенности расходных характеристик ограничивают применение градиентного метода, требующего непрерывности всех частных производных, и метода Ньютона, требующего непрерывности как первых, так и вторых производных целевой функции.

**Метод отжига** представляет собой стохастический метод для аппроксимации глобального оптимума данной функции. Он часто используется, когда пространство поиска является дискретным (например, имеется дискретное количество узлов, в которых необходимо использование устройств FACTS). Для задач, где нахождение приближенного глобального оптимума является приоритетной задачей и для решения данной задачи происходит в фиксированном временном интервале, алгоритм имитации отжига может быть более оптимальный, чем такие методы, как полный перебор или градиентный.

Метод базируется на имитации физического процесса, который происходит при кристаллизации вещества, в частности при отжиге металлов. Рассматривается процесс постепенного понижения температуры, при которой атомы уже выстроились в кристаллическую решётку, но ещё допустимы переходы отдельных атомов из одной ячейки в другую. процесс протекает при постепенно понижающейся температуре. Переход атома из одной ячейки в другую происходит с некоторой вероятностью, причём вероятность эта уменьшается с понижением температуры. Устойчивая кристаллическая решётка соответствует минимуму энергии атомов, поэтому атом либо переходит в состояние с меньшим уровнем энергии, либо остаётся на месте. Оптимизационный процесс состоит в том,

чтобы привести систему из произвольного начального состояния, в состояние с наименьшей энтропией.

При моделировании такого процесса находится такая точка или множество точек, при котором достигается минимум некоторой целевой функции  $F(\bar{x})$ , где  $\bar{x} = (x_1, \dots, x_m) \in X$ . Решение ищется последовательным вычислением точек  $\bar{x}_0, \bar{x}_1, \dots$ , пространства  $X$ ; каждая точка, начиная с  $\bar{x}_1$ , «претендует» на то, чтобы лучше предыдущих приближать решение. Алгоритм принимает точку  $\bar{x}_0$  как исходные данные. На

каждом шаге происходит вычисление новой точки и понижает значение величины, понимаемой как «температура». Алгоритм останавливается по достижении точки, которая оказывается при температуре ноль.

Точка  $\bar{x}_{i+1}$  получается на основе текущей точки  $\bar{x}_i$  следующим образом. К точке  $\bar{x}_i$  применяется оператор  $A$ , который случайным образом модифицирует соответствующую точку, в результате чего получается новая точка  $\bar{x}^*$ , которая становится точкой  $\bar{x}_{i+1}$  с вероятностью вычисленной в соответствии с распределением Гиббса

$$P(\bar{x}^* \rightarrow \bar{x}_{i+1} | \bar{x}_i) = \begin{cases} 1, & F(\bar{x}^*) - F(\bar{x}_i) < 0 \\ \exp\left(-\frac{F(\bar{x}^*) - F(\bar{x}_i)}{Q_i}\right), & F(\bar{x}^*) - F(\bar{x}_i) \geq 0 \end{cases} \quad (8)$$

где  $Q_i > 0$  – элементы произвольной убывающей, сходящейся к нулю положительной последовательности, которая задаёт аналог падающей температуры в кристалле.

Скорость убывания и закон убывания могут задаются в соответствии с поставленной задачей. Метод имитации отжига похож на градиентный, но за счёт случайности выбора промежуточной точки попадает в локальные минимумы реже, чем градиентный.

В отличие от методов рассмотренных ранее метод отжига позволяет находить решение, близкое к оптимальным, за приемлемое время. Универсальность данного метода определяется также применимостью к задачам с неметризуемым пространством управляемых переменных (т.е. среди управляемых переменных могут быть и лингвистические величины, т.е. не имеющие количественного выражения).

### Заключение

Децентрализованные алгоритмы управления обладают рядом существенных преимуществ в сравнении с централизованными. Использование их позволит повысить гибкость и живучесть системы, упростить техническую реализацию и обслуживание, снизить стоимость системы управления и конструировать более сложные из простых. Но для успешной реализации децентрализованной системы в электроэнергетике необходимо решить проблемы запаздывания и недостаточности информации, которую получает каждое устройство FACTS в рамках стандарта IEC 61850 [11].

*Данные исследования проведены при финансовой поддержке государства*

*в лице Минобрнауки России (договор № 14. Z56.16.5570-МК).*

### Список литературы

1. Распоряжение Правительства РФ от 03.04.2013 № 511-р «Об утверждении Стратегии развития электросетевого комплекса Российской Федерации» / «Собрание законодательства РФ», 08.04.2013, № 14, ст. 1738.
2. Энергетическая стратегия России на период до 2030 года. Утверждена Распоряжением Правительства РФ от 13 ноября 2009 г. № 1715-р.
3. Dolinger S.Y., Lyutarevich A.G., Plankov A.A. «Active – adaptive control system development of electric power quality assurance device», Control and Communications (SIBCON), 2015 International Siberian Conference on Control and Communications (SIBCON). DOI:10.1109/SIBCON.2015.7147043.
4. H. Li, «Lagrange multipliers and their applications», Department of Electrical Engineering and Computer Science, University of Tennessee, Knoxville, TN, vol. 37921, 2008.
5. J. Zhu, Optimization of Power System Operation. IEEE Press, 2009.
6. Kamboj V.K., Bath S.K. «Single Area Unit Commitment using Dynamic Programming.» In Proceeding of 4th International Conference on Emerging Trends in Engineering and Technology (IETET 2013), P. 930-936, 2013. DOI:03.AETS.2013.3.260.
7. M. Basu «Economic environmental dispatch using multi-objective differential evolution.» Applied Soft Computing, 11 (2011), P. 2845-2853.
8. Hazra J. and Sinha A.K. «Environmental constrained economic dispatch using bacteria foraging optimization», Proceedings of the Power System Technology and IEEE Power India Conference, P. 1–6 (2008).
9. R. A. F. Saleh and H. R. Bolton, «Genetic algorithm-aided design of a fuzzy logic stabilizer for a superconducting generator.» IEEE Trans. Power Syst., vol. 15, P. 1329–1335, Nov. 2000.
10. Vijayakumar D., & Malathi V., «A real-time management and evolutionary optimization scheme for a secure and flexible smart grid towards sustainable energy.» International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 62, 540–548. DOI:10.1016/j.ijepes.2014.05.013.
11. IEC 61850: «Communication networks and systems in substations», Ed.1,2004.