

## Оценка процессов в узле нагрузки и управление активно-адаптивными устройствами энергосбережения

Плехов А. С., канд. техн. наук, Титов В. Г., доктор техн. наук, Титов Д. Ю., инж., Яшин С. Н., доктор техн. наук

Нижегородский государственный технический университет им. Р. Е. Алексеева

Исследована структура системы энергосберегающего электропотребления в узле нагрузки с активными устройствами компенсации реактивной мощности, потребляемой из сети электроснабжения. Использование активных устройств предусматривает распределение нагрузок между ними и управление с целью обеспечения энергосбережения в изменяющихся условиях электропотребления. Предложен подход к управлению энергосбережением с использованием имитационно-ситуационной модели. Имитационная модель на основе марковской цепи рассматривается как инструмент управления состоянием активных устройств и предварительного обследования режимов работы электрооборудования в узле нагрузки для формулирования предложений по модернизации системы электропотребления.

**Ключевые слова:** энергосберегающие узлы нагрузки, активные компенсационные устройства электроприемников, марковские цепи.

В системах переменного тока всегда присутствует реактивная составляющая тока, которая является дополнительной нагрузкой для линий и создает проблемы, связанные со стабилизацией напряжения. Для управления потоками энергии с целью энергосбережения и обеспечения электромагнитной совместимости электроприемников с сетью создаются инструментальные средства, обеспечивающие гибкость систем электропередачи на переменном токе (FACTS). Для узлов нагрузки, как и для сетей электроснабжения, основными показателями эффективности являются надежность работы комплекса электрооборудования, качество электроэнергии и ее минимальные технологические потери. Технологии FACTS проецируются на узлы нагрузки — конечные компоненты сетей электроснабжения, и наоборот (известно, что регулируемые статические компенсаторы реактивной мощности были созданы в начале 70-х годов для компенсации бросков активной и реактивной мощности на дуговых сталеплавильных печах, а несколько лет спустя их применили на линиях электропередачи [1]).

Основой гибких управляемых узлов нагрузки, как и сетей, являются активные устройства энергосбережения и адаптивные системы управления ими. Нивелировать факторы негативного влияния нагрузок потребителей можно посредством применения синхронных двигателей и различных компенсационных преобразователей, являющихся составной частью электроприводов или технологических установок [2 – 4].

Модели потерь электроэнергии [5, 6] должны отражать нагрузочные и условно постоянные потери, а также технологические потери на транспортировку электроэнергии. Однако для расчета ущерба от ненадлежащего качества электроэнергии этого недостаточно — необходимо учитывать ущерб, наносимый материальной части — резервному электрооборудованию. Вместе с тем концепция энерго- и ресурсосбережения предполагает, что активные устройства узла нагрузки обеспечат повышение устойчивости при электромеханических переходных процессах и демпфирование колебаний в энергосистеме.

Основной задачей управления активно-адаптивной системой энергосбережения в узле нагрузки целесообразно считать поддержание номинального уровня напряжения, что является необходимым условием эффективной работы и надлежащего использования оборудования. Таким образом, допускаем, что технология энерго- и ресурсосбережения заключается в обеспечении минимума технологических потерь, вызванных отклонением напряжения от номинального значения. Напряжение в узле электроэнергетической системы определяется балансом реактивной мощности в системе в целом и в узле электрической сети. Отклонение напряжения, зависящее от потребляемой от центра питания активной и реактивной мощности, вычисляется по формуле

$$\Delta U = \frac{PR_{\text{л}} + QX_{\text{л}}}{U}, \quad (1)$$

где  $U$  и  $\Delta U$  — напряжение и его отклонение в узле нагрузки;  $P$  и  $Q$  — потребляемая от трансформатора (центра питания) активная и реактивная мощность;  $R_{\text{л}}$  и  $X_{\text{л}}$  — эквивалентные активное и реактивное сопротивления линий связи в узле нагрузки (в реальности эти линии связи имеют индивидуальные импедансы, которые можно учесть лишь используя геоинформационную основу, например, план размещения электрооборудования и базу данных о его параметрах).

При принятом допущении о неравенстве активного и реактивного сопротивлений ( $R_{\text{л}} < X_{\text{л}}$ ) падение напряжения будет определяться значением реактивной мощности, потребляемой электроприемниками, как это показано на рис. 1.

Для стабилизации напряжения в узле нагрузки создается кластер электроприемников с полупроводниковыми источниками реактивной мощности (ИРМ) по схеме с групповой компенсацией (рис. 2). Модель кластера содержит такие блоки, которые отражают уровни напряжения в сети  $U$  с номинальным значением  $U_n$ , токов  $I_j$ , активной  $P$  и реактивной  $Q$  мощности в узле нагрузки, комплексные сопротивления цепей нагрузки  $Z_j$ , управляемые источники реактивной мощности ИРМ $_j$  с уровнями генерации  $Q_j$ . В модели и системе управления кластером присутствует оптимизирующее устройство ОУ, управляющее задающими сигналами на источники реактивной мощности  $Q_j^*$ . Здесь для

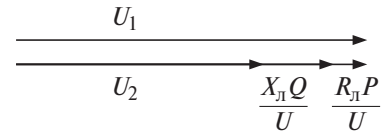


Рис. 1. Упрощенная векторная диаграмма распределения напряжений в узле нагрузки

каждой группы электроприемников задаются коэффициенты ущерба [6] вследствие изменения напряжения в узле нагрузки  $K_{yj}$ , найденные регрессионными методами и показанные на схеме в виде вектора  $K_y^T$ .

Оптимизирующее устройство предназначено для решения в компьютерном времени задачи математического программирования в следующей постановке:

1) источники реактивной мощности генерируют заданные уровни  $Q_j = Q_j^*$ ;

2) ущерб от падения напряжения  $Y = \Delta U \sum_{j=1}^n K_{yj}$ ;

3) общее падение напряжения после компенсации реактивной мощности  $\Delta U = \Delta U_{\Sigma} - \frac{X_{\text{л}}}{U} \sum_{j=1}^n Q_j$ ;

4) стоимость генерации реактивной мощности определяется ее ценой для каждого типа ИРМ:  $C_{\Sigma} = \sum_{j=1}^n c_j Q_j$ .

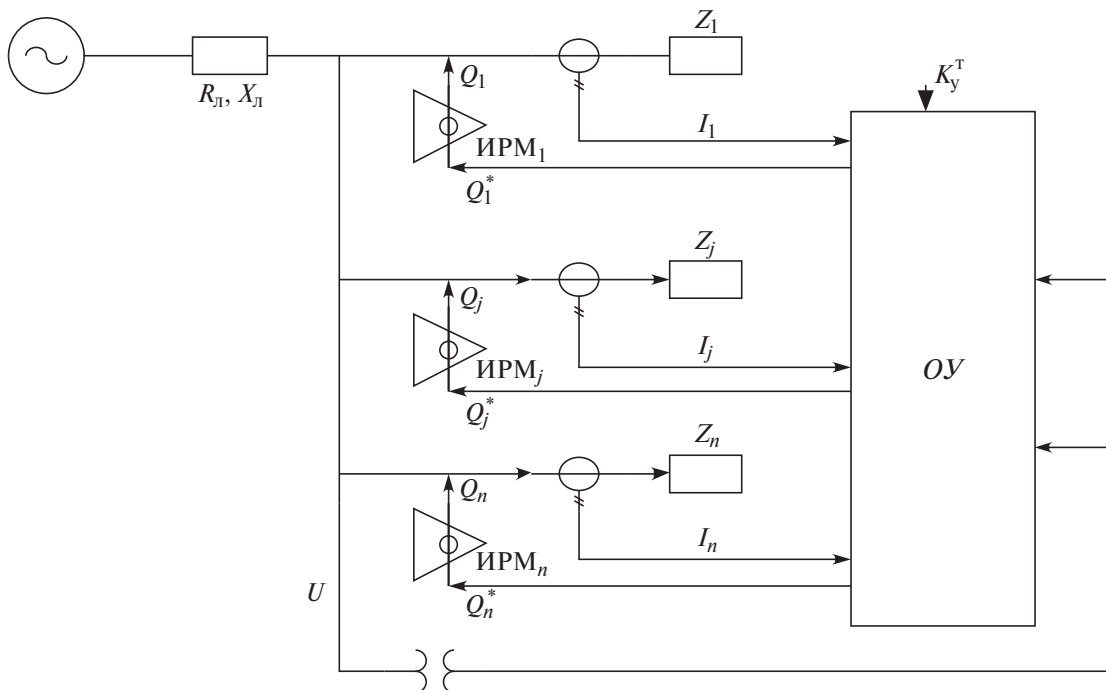


Рис. 2. Архитектура кластера и модели энергосберегающего узла нагрузки

Тогда целевая функция

$$F_{ц} = \mathcal{Y} - C_{\Sigma} \rightarrow \min. \quad (2)$$

Приведенные зависимости в первом приближении представлены линейными. В общем случае ущерб от падения напряжения и значение последнего должны быть представлены нелинейными функциями соответственно  $\mathcal{Y} = \sum_{j=1}^n K_{y_j}(\Delta U)$  и  $\Delta U = \Delta U_{\Sigma} - \frac{X_{\Pi}}{U} \sum_{j=1}^n f_j(Q_j)$ .

Все процессы в узле нагрузки — вероятностные. Случайный процесс, протекающий в системе управления группой компенсирующих устройств, характеризуется тем, что для любого момента времени вероятность любого состояния системы в будущем зависит только от ее состояния в настоящем и не зависит от того, когда и каким образом она пришла в данное состояние. Это связано с технологическим производственным процессом, который обуславливает изменения как активных, так и реактивных нагрузок на сеть со стороны электрооборудования. Рассматриваемая система компенсирующих устройств ИРМ<sub>*j*</sub> (*j* = 1, ..., *n*) на схеме рис. 2 непрерывно переходит от одного состояния к другому. Без централизованного управления такая многомерная и многосвязная система с большой вероятностью вызовет качания потоков реактивной мощности, а значит, и колебания напряжения в узле нагрузки. Управление такой системой требует непрерывной связи всех переменных состояния (параметров режима). При этом невозможно использовать компьютерную сеть, покрывающую все электроприемники в узле нагрузки. Для динамического управления реактивной мощностью каждого ИРМ недостаточно ресурсов даже самого широкополосного канала связи. Реализация подобной системы возможна при синхронном управлении всеми активными устройствами по специальному сигналу, который, например, может быть синхронизирован сигналом с периодом, кратным ежесекундному сигналу GPS (ГЛАНАС). Система энергосбережения, каждая компонента которой — активное компенсирующее устройство, должна иметь и отрабатывать свою программу ситуационного управления, в свою очередь зависящую от состояний отдельных компонент системы. Данная программа включает активное устройство в работу в режиме стабилизации напряжения узла нагрузки при наличии максимальных резервов, предоставленных данному устройству техно-

логической обстановкой, т.е. потребляемой им активной мощностью.

В работу в качестве ведущего включается активное устройство, которому на ближайший тактовый период соответствует наибольшая возможность генерировать максимальную реактивную мощность емкостного характера. Для обеспечения предложенного способа управления необходимо принимать состояния системы дискретными (*i* =  $\overline{0, n}$ ) в непрерывном времени:  $\sum_{i=0}^n P_i(t) = 1$ . Последовательность пере-

ключений между случайно загружаемыми ИРМ<sub>*j*</sub> узла нагрузки может быть отражена непрерывной цепью Маркова.

Вероятности перехода  $P_{ij}$  от одной вершины графа (*i*) к другой (*j*) представляют матрицей переходных вероятностей. В непрерывных цепях Маркова матрица переходов содержит плотности вероятностей перехода

$$\lambda_{ij} = \lim_{dt \rightarrow 0} \frac{P_{ij}(t, dt)}{dt}.$$

Как и любая производная, плотность выражает скорость соответствующего перехода. Оценка  $\lambda_{ij}$  с целью модельного исследования осуществляется по алгоритму, схема которого приведена на рис. 3.

Коэффициенты использования электрооборудования  $K_{ui}$  являются весовыми характеристиками при активной и реактивной мощностях электрооборудования, потребляемых или генерируемых в случае применения компенсационного преобразователя. Паспортные характеристики оборудования, установленного в узле нагрузки, и графики производственных процессов служат источниками информации о загрузке отдельных электроприемников, о периодически изменяемых параметрах режима узла нагрузки, а значит, и о плотностях вероятностей перехода из одного состояния в другое на очередном периоде [*m*]. Использование  $\lambda_{ij[m]}$  в модели осуществляется путем считывания значений из таблицы памяти ОУ.

Определение ситуации, когда  $P_j > P_{i \leq j}$ , демонстрируется марковской однородной моделью, т.е. на одном из периодов [*m*]. При этом в работу включается *j*-е активное устройство, реализуя свою программу ситуационного управления и доставляя в сеть максимальную реактивную мощность емкостного характера. На этом периоде работы системы оно является ведущим. Все другие *i*-е активные устройства, для которых  $i \leq j$ , осуществляют режим ИРМ в той степени, какую пре-

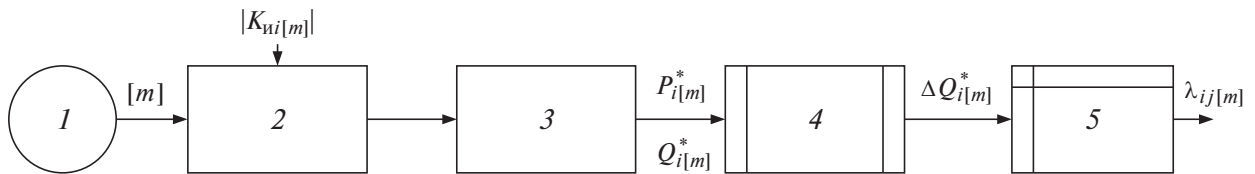


Рис. 3. Блок-схема алгоритма оценки элементов матрицы переходных вероятностей:

*I* — генератор номера такта *[m]* длительностью 30 мин; 2 — матрица включения в работу групп электроприемников при выбранном технологическом процессе; 3 — оценка потребления активной и реактивной мощности на такте *[m]*; 4 — вычисление элементов матрицы первых разностей потребляемой реактивной мощности на соседних тактах; 5 — вычисление матрицы

переходных вероятностей  $[\lambda_{ij}[m]] \approx \left[ \frac{\Delta Q_{ij}^*[m]}{\sum_{j=1}^n \Delta Q_{ij}^*[m]} \right]$

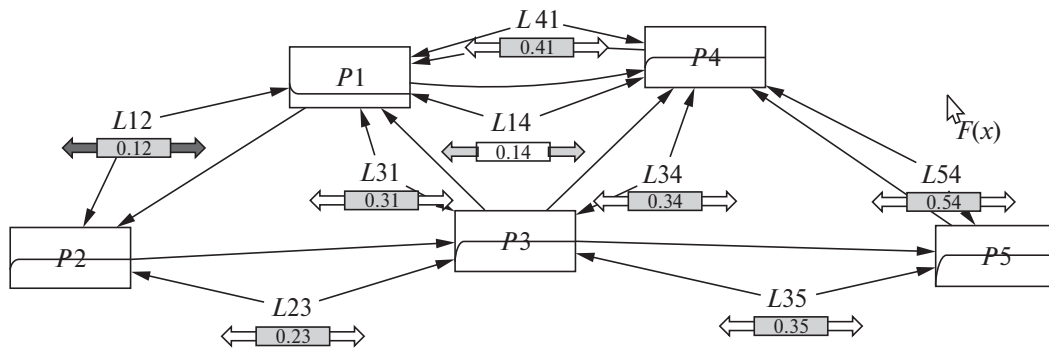


Рис. 4. Имитационная марковская однородная модель генерации программы ситуационного управления активными энергосберегающими устройствами

доставляют их технологическая нагрузка и установленная мощность преобразователя.

Вероятности состояний  $P_i(t)$  находят путем решения системы дифференциальных уравнений Колмогорова. В качестве примера приведем следующую систему таких уравнений, описывающих процессы компенсации реактивной мощности пятью ИРМ на подстанции (в узле нагрузки) предприятия ЗАО “Серебряные ключи” (г. Ижевск):

$$\left. \begin{aligned} \frac{dP_1}{dt} &= \lambda_{31} P_3 + \lambda_{41} P_4 + \lambda_{11} P_1 - (\lambda_{12} + \lambda_{14}) P_1; \\ \frac{dP_2}{dt} &= \lambda_{12} P_1 - \lambda_{23} P_2; \\ \frac{dP_3}{dt} &= \lambda_{23} P_2 - (\lambda_{31} + \lambda_{34} + \lambda_{35}) P_3; \\ \frac{dP_4}{dt} &= \lambda_{14} P_1 + \lambda_{34} P_3 + \lambda_{54} P_5 - \lambda_{41} P_4; \\ \frac{dP_5}{dt} &= \lambda_{35} P_3 - \lambda_{54} P_5. \end{aligned} \right\} (3)$$

Имитационная модель, реализованная с помощью программы Vensim, представлена на рис. 4. На диаграмме модели обозначение

$L_{ij}$  соответствует  $\lambda_{ij}$ . Начальные условия при  $t = 0$ :  $P_1 = 1$ ;  $P_2 = P_3 = P_4 = P_5 = 0$ .

Критерием адекватности имитационной модели можно считать наблюдение в траектории ее поведения финальных вероятностей состояний. При этом  $\sum_{j=1}^n P_{ij} = 1, i = \overline{1, n}$ , по-

скольку переходы образуют полную группу несовместных событий. В модели и алгоритме управления необходимо обеспечить условия достижения эргодических процессов в системе — размеченный граф состояния системы энергосбережения должен содержать для активных устройств энергосбережения только существенные состояния, в которые система может перейти из любой ситуации.

Предложенная модель позволяет реализовать и адекватную изменяемой производственной ситуации неоднородную цепь Маркова, используемую для переключения активных устройств. Такой подход наряду с синхронным управлением позволяет свести к минимуму объем информации, циркулирующей в системе управления. Результаты работы модели показывают достижимость предельных вероятностей, которые представляют собой

среднее относительное время пребывания системы в данном состоянии. Таким образом, доказана возможность устойчивой работы нескольких энергосберегающих устройств в одном узле нагрузки, а также оценки необходимой установленной мощности активных преобразователей электроэнергии.

### Выводы

1. Использование в узлах нагрузки активных устройств энергосбережения на основе преобразователей с функциями компенсаторов реактивной мощности, потребляемой из сети электроснабжения, позволяет наряду с обеспечением заданных момента и частоты вращения двигателя, а также температуры нагрева обрабатываемых материалов регулировать значение компенсируемой реактивной мощности в узле нагрузки питающей сети. Управление компенсационными преобразователями обеспечивает минимизацию ущерба от ненадлежащего качества потребляемой электроэнергии: либо достижением целевой функции — максимизацией коэффициента мощности питающей сети, либо ограничением посадок напряжения и перенапряжений в узле нагрузки.

2. Каждое активное устройство энергосбережения реализует свой алгоритм функционирования под управлением непрерывной марковской цепи, что позволяет системе работать в реальном времени с минимальным объемом циркулирующей информации.

3. Процесс изменения траектории поведения активных устройств в синхронной систе-

ме управления может быть представлен неоднородным марковским. Разметка графа имитационной модели управления активными устройствами должна обеспечивать достижение финальных вероятностей состояний активных устройств энергосбережения.

4. Предложенные имитационные модели являются не только средством управления, но и инструментом для предварительного обследования режимов работы электрооборудования в узле нагрузки с целью формулирования предложений по модернизации системы электропотребления.

### Список литературы

1. Дьюды Л. Силовая электроника в энергосистемах: статические компенсаторы реактивной мощности. — ТИИЭР, т. 76, 1988, № 4.
2. Титов В. Г., Плехов А. С., Охотников М. Н. Комплексные технические решения для энергосберегающих электроприводов. — В кн.: Актуальные проблемы электроэнергетики. Нижний Новгород, 2010.
3. Активные фильтры PQFI — PQFM — PQFK — PQFS (<http://www.05.abb.com>).
4. VLT Active Filter AAF00x Operating Instructions. (<http://www.vltdrives.com.ua>).
5. Вагин Г. Я., Лоскутов А. Б., Севостьянов А. А. Электромагнитная совместимость в электроэнергетике. — М.: Издательский центр “Академия”, 2010.
6. Экономические модели электроприемников и узлов нагрузки / Б. П. Борисов, Г. Я. Вагин, И. Г. Крахмалин, Е. Б. Солнцев. — Киев: Институт электродинамики АН УССР, 1989.

[aplehov@mail.ru](mailto:aplehov@mail.ru)