



УДК 621.31

А.О. Кашканов, аспирант ФГБОУ ВО «ВГУВТ»

А.С. Плехов, к.т.н. доцент ФГБОУ ВО «ВГУВТ»

603950, г. Нижний Новгород, ул. Нестерова, 5

АЛГОРИТМ ИДЕНТИФИКАЦИИ ПАРАМЕТРОВ ПОТРЕБЛЕНИЯ СЕТИ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ

Ключевые слова: компенсация реактивной мощности, идентификация параметров, скользящее окно данных, групповое управление

Рассмотрен алгоритм идентификации характеристик и переменных состояния радиальной сети электроснабжения. Алгоритм реализует метод скользящего окна данных и, основываясь на данных измерения электрических величин в различных узлах системы, выполняет групповой расчет параметров потребления для всей сети.

Система электроснабжения автономного объекта является сложной динамической системой, представляющей собой многоуровневую разветвленную электрическую сеть с разнообразным электротехническим оборудованием. Она включает в себя автономные источники питания, устройства коррекции показателей качества электроэнергии, различное бытовое и технологическое электрооборудование. Эта система практически непрерывно находится в переходных режимах: осуществляются коммутации элементов электрической сети и потребителей электроэнергии, меняются технологические режимы механизмов и установок, а, следовательно, и режимы работы соответствующих приемников электроэнергии [1]. Эти процессы приводят к постоянному изменению нагрузки источника питания, изменению напряжения на его выходных клеммах и клеммах электроприемников. Особенно остро это касается систем, в которых основную долю электрооборудования занимает электропривод. Пуск электродвигателя и наброс нагрузки на него сопровождаются резким изменением коэффициента мощности электродвигателя, что приводит к локальным кратковременным всплескам потребления реактивной мощности [2]. Последние приводят к повышению амплитуды провалов напряжения в сети, что может сказываться на стабильности работы параллельно работающего электрооборудования и приводить к выходу его из строя.

Возникает необходимость в использовании устройств динамической компенсации реактивной мощности. Установка подобного оборудования в непосредственной близости от источника электроэнергии способствует уменьшению общего количества потребляемой от него реактивной мощности. Однако это не решает проблемы колебаний напряжения на клеммах электрооборудования от всплесков потребления реактивной мощности параллельно работающих электроприемников. Решением является установка быстродействующих устройств компенсации реактивной мощности непосредственно возле нагрузки. Такой подход позволяет не только уменьшить амплитуду колебаний напряжения за счет генерации реактивной мощности непосредственно возле ее потребителя, но и снизить потери электроэнергии внутри электрической сети промышленного объекта.

Однако использование группы независимых устройств из-за их взаимного влияния во многих случаях приводит к перетокам реактивной мощности и колебаниям напряжения в узле нагрузки. Встает вопрос оптимального управления группой устройств компенсации для снижения взаимного влияния отдельных устройств системы. Для этого необходимо знать топологию и характеристики системы — напряжение холостого хода источника питания и его внутреннее сопротивление, сопротивление питающих линий. Кроме того необходимо в каждый момент времени иметь данные о текущих значениях напряжения и тока в узлах системы; эквивалентные параметры узлов нагрузок.

Рассмотрим минимальный участок радиальной сети электроснабжения сохраняющий основные ее свойства (рис. 1а), где для узла распределения нагрузки V_0 вышестоящий узел V_e является неидеальным источником напряжения с внутренним сопротивлением \overline{Z}_{e-0} , формирующим в узле V_0 напряжение \dot{U}_0 при потребляемом токе I_0 . К источнику с помощью питающих линий с сопротивлениями \dot{Z}_{0-1} и \dot{Z}_{0-2} подключены соответственно два дочерних узла – текущий узел V_1 , с напряжением \dot{U}_1 , потребляющий ток I_1 и эквивалентный узел V_2 с напряжением \dot{U}_2 , и потребляющий ток $I_2 = I_0 - I_1$. В обоих узлах потребления нагрузки установлен управляемый источник реактивного тока:

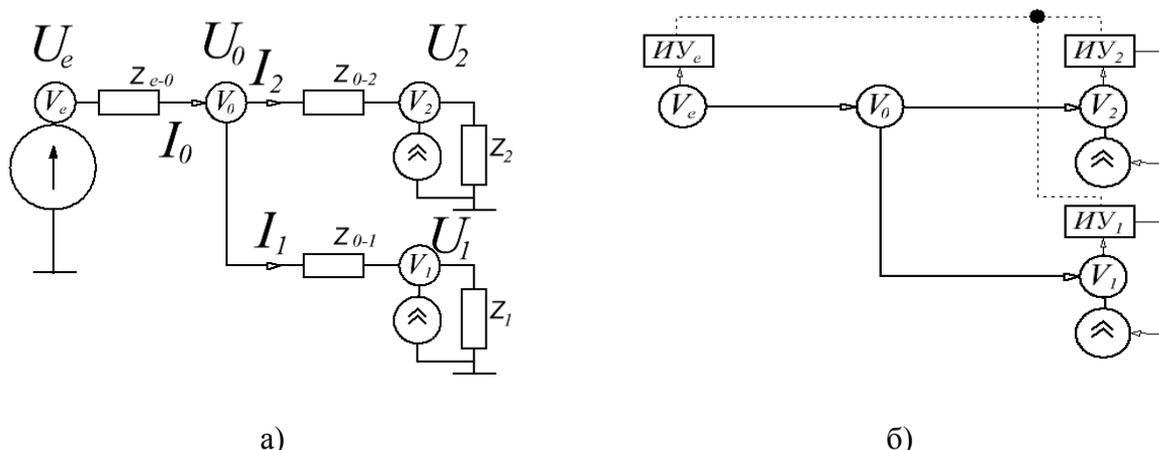


Рис. 1. Эквивалентная схема замещения узла распределения нагрузки (а) и расположение измерительных устройств (б).

Схема на рис. 1.а представляет собой древовидный граф $G(V, E)$, где $V = \{1, \dots, n\}$ – вершины графа, представляющие собой шины, которым соответствуют источники напряжения и электроприемники, а также точка подключения к промышленной сети электроснабжения; $E = \{E | m\}$ – набор ребер, соединяющих между собой узлы (h, k) , $h, k \in V$ и представляющих соединительные кабели. В качестве допущения считаем, что в установившемся режиме ток во всех узлах имеет синусоидальную форму с одинаковой частотой. Тогда каждый сигнал может быть представлен некоторой комплексной величиной $y = |y|e^{j\psi_y}$, где $|y|$ – среднеквадратичное значение сигнала, а ψ_y – сдвиг фазы сигнала относительно общей базовой величины.

Каждый узел $h \in V$ будет характеризоваться определенным значением напряжения u_h в нем:

$$u_h = U_h e^{(j\theta_h)}, \quad (1)$$

где U_h – амплитуда напряжения в узле $h \in V$, θ_h – фаза напряжения в узле $h \in V$.

К узлу может быть подключен источник или потребитель. В этом случае количество тока i_h , инжектируемого источником, или потребляемое нагрузкой определяется следующим выражением:

$$i_h = I_h e^{j\psi_h}, \quad (2)$$

где I_h – амплитуда тока, втекающего в узел $h \in V$, ψ_h – фаза тока.

Каждое ребро (h, k) , $h, k \in V$ представляет собой питающий кабель или магистральную шину с активно-индуктивным сопротивлением

$$z_{h,k} = |Z_{h,k}| e^{j\theta}, \quad (3)$$

где $\theta = \arctg(L/R)$.

В результате, имеется следующая связь между матрицей инжектируемых токов i и напряжениями в узлах u :

$$i = L_B u. \quad (4)$$

Где $L = AZ^{-1}A^T$ – матрица Кирхгофа, определяемая с помощью матрицы инцидентности $A \in \{0, \pm 1\}^{|E| \times n}$ и диагональной матрицы сопротивлений ребер $Z = \text{diag}(|z_e|, e \in E)$.

В процессе работы сети, в каждый узел будет инжектироваться полная мощность s_n , комплексное значение которой вычисляется по формуле

$$s_v = u_v \bar{i}_v = U_v \cdot I_v e^{j(\theta_v + \psi_v)} = S_v e^{j\alpha_v}, \quad (5)$$

где выражения:

$$p_v = \Re(s_v), \quad q_v = \Im(s_v), \quad (6)$$

определяют активную и реактивную составляющие полной мощности. В узле потребления нагрузки активная составляющая мощности имеет отрицательный знак ($p_v < 0$). Это означает, что положительная активная мощность потребляется нагрузкой. В узлах-источниках активная составляющая мощности положительна ($p_v > 0$) и равна активной мощности, отдаваемой источником.

Для измерения параметров системы (характеристик) и параметров режима (переменных состояния) необходимо наличие измерительных устройств (ИУ) в узлах системы (рис. 1.б). Эти ИУ представляют собой трехфазные устройства измерения показателей качества электроэнергии, которые с помощью встроенных датчиков тока и напряжения в непрерывном режиме производят измерения текущих значений токов и напряжений в узлах. Эта информация используется для вычисления значений потребляемых узлами активной и реактивной мощности. Помимо этого в задачи ИУ, установленных в узлах V_1, V_2 , входит управление устройствами компенсации реактивной мощности.

Для оценки текущих параметров потребления измерительное устройство использует временные ряды $\{u_t\}, \{i_t\}$ мгновенных значений тока и напряжения, где $t = \frac{T}{N}, 2\frac{T}{N}, \dots, T$ – последовательность временных отсчетов, а $N = T \cdot f_{кв}$ – количество отсчетов временного ряда при частоте квантования $f_{кв}$ за период времени T , кратный периоду обрабатываемого сигнала. Например, для обработки сигналов промышленной сети переменного тока 50 Гц период времени T , может быть равен 0.02 с, 0.04 с, 0.06 с и т.д. В приборах учета, как правило, производится расчет текущих значений параметров потребления электроэнергии на основе временного ряда длительностью 1 с, 2 с или 4 с. [3] и частотой квантования $f_{кв}$ 2048 Гц. или 4096 Гц. С другой стороны такой период окна

данных увеличивает временной лаг, что для сигналов обратной связи систем регулирования может быть серьезным недостатком. Представленный в данной работе алгоритм основывается на временном ряде с частотой квантования $f_{кв}$ равной 4096 Гц и периодом времени T 0,02 с. Это дает высокую точность оцифровки данного периода и минимальный временной лаг. Действующие значения токов и напряжений в узлах

нагрузки рассчитываются по стандартным формулам $U_v = \sqrt{\frac{\sum_{n=1}^N v_v^2(n)}{N}}$ и $I_v = \sqrt{\frac{\sum_{n=1}^N i_v^2(n)}{N}}$,

однако при расчете используется метод скользящего окна данных, когда расчет U_t, I_t производится на основе выборки данных $\{u_t\}, \{i_t\}$ где $t \in \{t, t+0.02\}$, а спустя время $dt = 1/f_{кв}$ расчет U_{t+dt}, I_{t+dt} производится на основе выборки данных $\{u_t\}, \{i_t\}$ где $t \in \{t+dt, t+dt+0.02\}$. Это дает минимальную чистую задержку и повышает быстродействие системы.

Итоговый алгоритм идентификации параметров потребления сети электроснабжения включает в себя два основных режима работы: а) самоидентификации системы, б) непосредственно рабочий режим.

В исходном состоянии каждое ИУ содержит в своей памяти топологию электрической сети, свое местоположение, а также информацию о расположении других ИУ. Для перехода в рабочий режим необходимо произвести идентификацию статических параметров системы: а) параметров источника питания, б) сопротивления питающих линий. Согласно [4, 5], для определения этих параметров каждое ИУ должно произвести не менее 32 измерений действующих значений токов и напряжений, а также коэффициента мощности и с помощью метода линейной регрессии произвести расчет напряжения холостого хода источника питания и его внутреннего сопротивления с точностью не хуже 5%.

После определения статических параметров системы все имеющиеся в системе ИУ переходят в рабочий режим, в котором, каждую единицу тактового времени они выполняют следующую последовательность операций.

1. Производится измерение действующего значения тока I_v и напряжения U_v и коэффициента мощности $\cos\varphi_v$ в узле.

2. Производится расчет полной S_v , активной P_v и реактивной Q_v мощности, инжектируемой в узел или потребляемой из него.

3. Производится расчет текущего значения эквивалентного полного сопротивления нагрузки Z .

4. По каналу передачи данных производится обмен измеренными и вычисленными значениями $I_v, U_v, \cos\varphi_v, S_v, P_v, Q_v, Z_v$, при этом каждое ИУ формирует массивы данных значений размерностью $1 \times n$, где n - число узлов системы.

5. По методике, описанной в [5] производится расчет значений токов и напряжений в промежуточных узлах, где не установлены ИУ, определяются значения падений напряжения на питающих линиях ΔU_v .

6. По матрицам Q_v и ΔU_v исходя из условия $\sum_{e=1}^E \Delta U_e \rightarrow 0$, определяются текущие оптимальные значения напряжения задания на устройства компенсации.

Повышение стандартов качества выпускаемой продукции и оказываемых услуг ужесточает требования к качеству электроэнергии, что требует совершенствования систем электроснабжения, повсеместного внедрения быстродействующих устройств индивидуальной компенсации реактивной мощности. Однако использование группы независимых устройств из-за взаимного их влияния во многих случаях приводит к

перетокам реактивной мощности и колебаниям напряжения в узле нагрузки. Предложенный алгоритм идентификации позволяет в реальном времени производить оценку текущих характеристик сети электроснабжения и выдавать сигнал задания на группу устройств компенсации для стабилизации напряжения в узлах нагрузок с минимизацией взаимного влияния компенсирующих устройств друг на друга.

Список литературы:

- [1] Гуревич Ю.Е., Либова Л.Е. Применение математических моделей электрической нагрузки в расчетах энергосистем и надежности электроснабжения промышленных потребителей. -М: ЭЛЕКС КМ. 2008. 248 с.
- [2] Белоусенко И.В., Югай В.Ф. Оценка влияния основных параметров систем промышленного электроснабжения на устойчивость узлов электрической нагрузки // Промышленная энергетика. 2002. № 10. С. 31-33.
- [3] Sedlacek M., Krumpholz M. Digital measurement of phase difference - a comparative study of DSP algorithms//Metrology and Measurement Systems. 2005. Vol. 12. № 4. pp. 427-448.
- [4] Кашканов А.О. Идентификация параметров источника питания промышленной электрической сети [Электронный ресурс] // Электронный научный журнал «Инженерный вестник Дона». 2015. № 4. URL: <http://www.ivdon.ru/ru/magazine/archive/n4y2015/3363>.
- [5] Кашканов А.О., Плехов А.С., Охотников М.Н., Серебряков А.В. Идентификация параметров узла нагрузки с эквивалентным электроприемником // Главный энергетик. 2015. №9. С. 58-62.

FAST ALGORITHM FOR POWER NETWORK CONSUMPTION PARAMETERS IDENTIFICATION

A.O. Kashkanov, A.S. Plehov

Keywords: reactive power compensation, parameters identification, sliding data windows, group controlling

The article describes a algorithm for fast identification of radial power network characteristics and variables. This algorithm implements a sliding data window method and using data from measurement devices in different network nodes, it computes current consumption parameters for the whole power network.