

КОНТРОЛЬ ЧАСТОТЫ В ЗАДАЧАХ МАТЕМАТИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ И УПРАВЛЕНИЯ РЕЖИМАМИ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СИСТЕМ

Для підвищення швидкодії алгоритмів обробки первинних даних при визначенні частоти в задачах математичного моделювання та управління режимами електричних систем пропонується виконувати перехід від дискретних миттєвих значень параметрів режиму до представлення їх узагальненими векторами.

Для повышения быстродействия алгоритмов обработки первичных данных при определении частоты в задачах математического моделирования и управления режимами электрических систем предлагается выполнять переход от дискретных мгновенных значений параметров режима к представлению их обобщенными векторами.

ВВЕДЕНИЕ

Частота является одним из самых важных параметров электрической сети, который характеризует её надёжность, стабильность и качество электрической энергии. Даже незначительное отклонение частоты ($\pm 0,2 - 0,4$ Гц) от номинального значения (50 Гц) свидетельствует о нарушении в работе энергосистемы. Оценка частоты является важным элементом в алгоритмах автоматики энергосистем (автоматическая частотная разгрузка, автоматический частотный ввод резерва, частотное автоматическое повторное включение и т.д.), поэтому её правильное определение необходимо для их эффективной работы.

Определение частоты возможно либо расчётным путём с применением математических моделей и средств моделирования, либо путем измерений в реальной электрической системе с использованием соответствующих средств измерений.

В результате значительного прогресса вычислительной техники за последние годы всё более широкое применение получают средства измерения на основе микропроцессорной техники.

Оценка частоты необходима для согласованной, эффективной и своевременной работы всех подсистем сетей энергоснабжения, поэтому её правильное определение является важной задачей.

Актуальность проблемы совершенствования методов определения частоты электрической сети в режиме реального времени подтверждается обширным количеством публикаций в заданном направлении. В подавляющем большинстве работ предлагаются пути усовершенствования существующих или разработка новых методов измерения частоты. Основными требованиями, выдвигаемыми к средствам измерения, являются [1]:

- высокое быстродействие;
- высокая точность измерений;
- устойчивость к помехам и искажениям исходного сигнала.

Из публикаций, содержащих оценки современных средств измерения, следует, что наряду с существенным прогрессом в развитии элементной базы алгоритмы обработки первичной информации требуют совершенствования.

Хотя в настоящее время известно множество цифровых алгоритмов оценки частоты, на практике продолжает использоваться классический метод определения периодов сигнала по моментам переходов

сигнала через заданный уровень. А именно, чаще всего, через нулевой уровень, но в общем случае момент перехода сигнала через нуль неоднозначен [2]. Основной особенностью такого способа оценки частоты является необходимость применения линейной интерполяции сигнала. На точность алгоритма оказывают влияние также и помехи в сигнале. В связи с этим необходимо осуществлять предварительную фильтрацию сигнала и сглаживание результата [3]. Все эти операции приводят к усложнению алгоритмов обработки первичной информации.

Наряду с вышесказанным существует проблема несоответствия данных о частоте в разных точках сети значениям частоты, определяемой по скорости вращения турбин. Это связано с тем, что невозможно выполнение взаимоисключающих требований о числе используемых обобщённых периодов.

Кроме способов определения частоты по нулям функции возможно определение частоты на основании быстрого преобразования Фурье на некотором временном промежутке. Но и в этом случае будут получаться результаты, где длина временного промежутка, как правило, не совпадает с длиной одного или нескольких обобщённых периодов [4]. Также для измерения частоты применяется метод наименьших квадратов, выполняющий аппроксимацию входного сигнала специальной функцией. Но в любом из приведенных методов приходится решать оптимизационную задачу, для того, чтобы определить оптимальное сочетание быстродействия, помехоустойчивости и точности. Можно получить сколь угодно высокими любые две из указанных характеристик, но в ущерб оставшейся [5].

ОСНОВНОЙ ТЕКСТ

Цифровые алгоритмы должны обеспечивать требуемую точность и быстродействие оценки частоты в различных режимах сети, но в значительной части цифровых систем РЗА продолжает использоваться метод по переходу сигнала через нуль.

Методы измерения частоты, основанные на обработке массивов дискретных значений сигнала, фиксации моментов прохождения сигнала через нуль и определении частоты по периоду изменения контролируемого параметра, требуют, чтобы обработка дискретных мгновенных значений была выполнена, как минимум, в течение одного периода. А для обеспечения требуемой точности длительность обработки должна быть

не менее чем 3-4 периода, что ограничивает их быстродействие. Кроме того, применяемые для повышения точности методы (гармонического анализа, фильтрации высших гармоник, методов аппроксимации) усложняют алгоритмы обработки первичной информации.

Точные и быстродействующие алгоритмы определения частоты нужны и для решения задач математического моделирования электрических систем в переходных процессах – для исследования переходных процессов, сопровождающихся изменениями частоты, численными методами, значения частоты необходимо иметь на каждом шаге численного интегрирования.

Системы дифференциальных уравнений переходных процессов синхронных и асинхронных машин включают уравнения движения роторов

$$T_j \frac{ds}{dt} = M_{EM} - M_M, \quad (1)$$

где T_j – постоянная инерции вращающихся масс; M_M , M_{EM} – механический и электромагнитный момент; S – скольжение

$$S = \frac{\omega_C - \omega_d}{\omega_C}, \quad (2)$$

для определения которого на каждом шаге численного интегрирования должны быть известны как частота вращения двигателя, так и частота в сети.

Совершенствование алгоритмов обработки первичных данных в направлении повышения их быстродействия и точности может быть реализовано путем перехода от мгновенных значений параметров режима трехфазной системы к их изображающим векторам.

Параметры режима (токи, напряжения и др.) трехфазной системы можно представить либо тремя векторами, вращающимися относительно начала координат с частотой сети, а мгновенные значения – проекциями этих векторов на ось времени (рис. 1,а), либо те же мгновенные значения можно получить, проектируя единый (обобщенный) вектор на три оси времени, каждая из которых совпадает с магнитной осью соответствующей фазы (рис. 1,б).

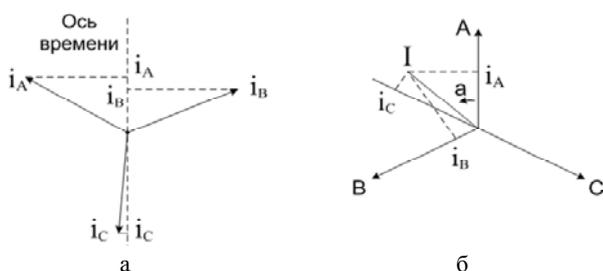


Рис. 1. Определение мгновенных значений фазных токов:
а – проекции векторов токов фаз на ось времени;
б – проекции изображающего вектора тока на оси фаз

Мгновенные значения токов фаз определяются проекциями обобщенного вектора на три оси фаз, сдвинутые на угол $2\pi/3$:

$$\begin{aligned} i_A &= I \cos \alpha; \\ i_B &= I \cos \alpha(\alpha - 2\pi/3); \\ i_C &= I \cos \alpha(\alpha + 2\pi/3), \end{aligned} \quad (3)$$

где α – угол сдвига изображающего вектора относительно оси фазы А.

Сумма квадратов проекций

$$\begin{aligned} i_A^2 + i_B^2 + i_C^2 &= I^2 \cdot (\cos^2 \alpha + \cos^2(\alpha - 2\pi/3) + \\ &+ \cos^2(\alpha + 2\pi/3)) = \frac{3}{2} I^2 \end{aligned} \quad (4)$$

откуда модуль и угол сдвига изображающего вектора относительно оси фазы А

$$\begin{aligned} I &= \sqrt{\frac{2}{3}(i_A^2 + i_B^2 + i_C^2)}; \\ \alpha &= \arccos \frac{i_A}{I}. \end{aligned} \quad (5)$$

Равенства (5) позволяют по мгновенным значениям токов фаз (на текущем шаге дискретизации измерений или расчета) однозначно определить изображающий вектор I по модулю и положению относительно осей фаз, а равенства (4) – выполнить обратное преобразование. Аналогичные соотношения справедливы и для других фазных переменных – напряжений, потокосцеплений, потоков фаз.

При переходе к обобщенным векторам упрощается и задача определения такого параметра, как мгновенная частота. Для этого необходимо по соотношениям (5) определить модуль $I(t_1)$, $I(t_2)$ и угол α_1 и α_2 изображающего вектора в моменты времени t_1 и t_2 , соответствующие, например, текущему и предыдущему шагу дискретизации. Тогда текущее мгновенное значение частоты, равное скорости вращения изображающего вектора, будет равно

$$\omega = \frac{\alpha_2 - \alpha_1}{t_2 - t_1} = \frac{\Delta \alpha}{\Delta t}. \quad (6)$$

Применяемые и рекомендуемые [6] алгоритмы для решения этой задачи основаны на выделении основной гармоники, что в значительной степени более трудоемко.

Если токи (напряжения, потокосцепления) синусоидальны, сумма токов фаз равна нулю (нет составляющих нулевой последовательности)

$$i_A + i_B + i_C = 0, \quad (7)$$

отсутствуют составляющие обратной последовательности и высшие гармоники, то в полярных координатах конец обобщенного вектора $I(\alpha)$ описывает с постоянной скоростью ω окружность, модуль обобщенного вектора равен амплитуде фазного вектора.

При наличии в параметрах режима составляющих нулевой последовательности они определяются суммой мгновенных составляющих на шаге дискретизации

$$i_0 = i_A + i_B + i_C \neq 0. \quad (8)$$

Выполнив исключение i_0 , получим мгновенные значения токов фаз

$$i'_A = i_A - i_0, \quad i'_B = i_B - i_0, \quad i'_C = i_C - i_0, \quad (9)$$

не содержащие составляющих нулевой последовательности, к которым применимы приведенные выше соотношения.

Наличие высших гармоник при представлении параметров режима обобщенными векторами проявляется в том, что появляются знакопеременные отклонения модуля обобщенного вектора, но выражения (5), (6) для определения мгновенных значений углов и скорости вращения векторов остаются в силе.

Таким образом, переход к обобщенным векторам, во-первых, выполняется достаточно просто – по соотношениям (3) – (4), а, во-вторых, позволяет определять мгновенные значения частоты на каждом шаге дискретизации (расчетов или измерений) и допускает простую форму представления и интерпретации результатов.

ВЫВОДЫ

Методы измерения частоты, основанные на фиксации моментов прохождения сигнала через нуль и определении частоты по периоду изменения контролируемого параметра, требуют дополнительной обработки первичной информации по достаточно трудоемким алгоритмам, что ограничивает их быстродействие.

При переходе от дискретных мгновенных значений параметров режима к представлению их обобщенными векторами упрощаются алгоритмы обработки первичных данных, повышается их быстродействие и эффективность использования средств измерения и моделирования в задачах диагностики и анализа режимов работы электрических систем.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Данильчук В.Н. Современная аппаратура частотных автоматик разгрузки, ввода резервов ГЭС, защит и блокировок / В.Н. Данильчук, И.Ф. Нехай, Е.А. Коломиец, В.А. Перетягко // *Электрические сети и системы*. – 2008. – № 2. – С. 45-64.
2. Гапон Д.А. Исследование точности определения частоты промышленной сети методом сканирования по АЦП / Д.А. Гапон // *Вестник НТУ "ХПИ"*. – 2010. – № 1. – С. 77-80.
3. Иванов Н.Г. Повышение надёжности алгоритма мониторинга частоты / Н.Г. Иванов // *Сборник тезисов докладов II международной научно-практической конференции "Релейная защита и автоматизация электроэнергетических систем России"*. – 2013. – С. 121-122.
4. Винничук С.Д. Анализ алгоритмов определения частоты сети для случаев переходных режимов / С.Д. Винничук // *Электрические сети и системы*. – 2012. – № 5. – С. 68-77.
5. Гриб О.Г. Измерение частоты промышленной сети как показателя качества электрической энергии / О.Г. Гриб, Р.В. Жданов, Д.А. Гапон, А.А. Зуев // *Вестник НТУ "ХПИ"*. – 2013. – № 17. – С. 45-50.
6. ГОСТ 13109-97. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения. – М.: Изд-во Стандартов, 1998.
7. Веприк Ю.Н. Базовая модель электромагнитных переходных процессов в электрических системах с несимметрией / Ю.Н. Веприк // *Восточно-Европейский журнал передовых технологий*. – 2010. – №2. – С. 37-42.
8. Кочегаров Ю.И. Измерение частоты в приборном модуле релейной защиты и автоматики "Диамант" / Ю.И. Кочегаров, Ю.В. Якименко // *Электрические сети и системы*. – 2013. – № 3. – С. 70-72.

Bibliography (transliterated): 1. Danil'chuk V.N., Nehaj I.F., Kolomic E.A., Peretjat'ko V.A. Sovremennaja apparatura chastotnyh avtomatik razgruzki, vvoda rezervov GES, zashhit i blokirovok. *Jelektricheskie seti i sistemy*, 2008, no.2, pp. 45-64. 2. Gapon D.A. Issledovanie tochnosti opredelenija chastoty promyshlennoj seti metodom skanirovanija po ACP. *Bulletin of NTU "KhPI"*, 2010, no.1, pp. 77-80. 3. Ivanov N.G. Povyshenie nadjozhnosti algoritma monitoringa chastoty. *Sbornik tezisov dokladov II mezhdunarodnoj nauchno-prakticheskoj konferencii "Relejnaja zashhita i avtomatizacija jelektroenergeticheskijh sistem Rossii"*, 2013, pp. 121-122. 4. Vinnichuk S.D. Analiz algoritmov opredelenija chastoty seti dlja sluchaev perehodnyh rezhimov. *Jelektricheskie seti i sistemy*, 2012, no.5, pp. 68-77. 5. Grib O.G., Zhdanov R.V., Gapon D.A., Zuev A.A. Izmerenie chastoty promyshlennoj seti kak pokazatelja kachestva jelektricheskoj jenerгии. *Bulletin of NTU "KhPI"*, 2013, no.17, pp. 45-50. 6. GOST 13109-97. Normy kachestva jelektricheskoj jenerгии v sistemah jelektrosnabzhenija obshhego naznachenija. Moscow, Publ. of Standarts, 1998. 7. Veprik Yu.N. Bazovaja model' jelektromagnitnyh perehodnyh processov v jelektricheskih sistemah s nesimmetriej. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 2010, no.2, pp. 37-42. 8. Kochegarov Yu.I., Jakimenko Yu.V. Izmerenie chastoty v pribornom module relejnoj zashhity i avtomatiki "Diamant". *Jelektricheskie seti i sistemy*, 2013, no.3, pp. 70-72.

Поступила (received) 27.09.2013

Веприк Юрий Николаевич¹, д.т.н, проф.,

Ганус Ольга Алексеевна¹, аспирант,

¹Национальный технический университет "Харьковский политехнический институт", кафедра передачи электрической энергии, 61002, Харьков, ул. Фрунзе, 21, тел/phone +38 099 7851261, +38 096 0283146, e-mail: gansol88@mail.ru

Yu.N. Veprik¹, O.A. Ganus¹

¹National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute" 21, Frunze Str., Kharkiv, 61002, Ukraine

Frequency control in electrical system mathematical modeling and operation control problems.

To improve the performance of primary data processing algorithms when determining frequency in problems of mathematical modeling and operation control of electrical systems, it is proposed to represent discrete instantaneous values of operating mode parameters by their generalized vectors.

Key words – power system, power quality, frequency measurement.