

Метод определения эквивалентных параметров схемы замещения энергосистемы в асинхронном режиме

НАРОВЛЯНСКИЙ В.Г., НАЛЕВИН А.А.

Предлагается метод определения параметров двухмашинной эквивалентной схемы для энергосистемы при переходе к асинхронному режиму (АР). Метод позволяет выполнить анализ процесса развития аварии с переходом в АР, используя данные, полученные из осциллограмм системных регистраторов, и реализовать алгоритм выявления и предотвращения АР в реальном времени процесса для устройств локальной автоматики ликвидации АР (АЛАР). Такой анализ может представить дополнительную информацию для решения проблемы корректности выбора уставок срабатывания, а также, правильности согласования работы различных комплексов устройств АЛАР.

Ключевые слова: энергосистема, асинхронный режим, схема замещения, эквивалентные параметры, анализ

В статье излагается метод определения параметров двухмашинной эквивалентной схемы энергосистемы на основе анализа тока и напряжения, измеряемых в узле энергосистемы. Правильное решение задачи по определению эквивалентных параметров электроэнергетической системы в асинхронном режиме позволяет повысить качество настройки противоаварийной автоматики (ПА) и оценки эффективности мероприятий, направленных на сохранение устойчивости системы.

Для реализации рассматриваемого метода необходимой и достаточной является информация о величинах, непосредственно доступных для измерения в узле энергосистемы (токи и напряжения), и о параметрах электропередачи, доступных для достоверной оценки (сопротивление участка электропередачи, например, линии электропередачи). В качестве результатов расчета могут быть получены значения эквивалентных сопротивлений от узла, где проводились измерения, до узлов приложения ЭДС эквивалентных генераторов, а также значения векторов ЭДС эквивалентных генераторов.

Предлагаемый метод можно использовать для последующего разбора процесса аварии и оценки качества работы противоаварийной автоматики при наличии данных, полученных с системных регистраторов, а также для выявления асинхронного

A method is proposed of determining the parameters of a two-machine equivalent circuit for a power system as its operating conditions slide to an asynchronous mode. The method enables an accident evolving into an asynchronous operation to be analysed using data obtained from the oscillograms taken from power system recorders. It also enables an online algorithm for identifying and preventing an asynchronous operation to be developed, which can be used in local control devices intended to eliminate asynchronous operating conditions. Such an analysis can provide additional information for solving the problem of correctly selecting the actuation setpoints and also the problem of correctly coordinating the operation of different sets of devices for eliminating asynchronous operating conditions.

Key words: power system, asynchronous operating conditions, equivalent circuit, equivalent parameters, analysis

режима (АР) в темпе электромеханического процесса в результате прямого измерения параметров режима устройством противоаварийной автоматики, установленным в узле энергосистемы.

Эквивалентные параметры энергосистемы в настоящее время, как правило, определяют при анализе схемы ЭЭС в наиболее характерных конфигурациях и режимах ее работы. При этом устройства ПА работают с уставками, которые были определены на основе совокупности набора предварительно рассчитанных ситуаций, в результате чего вынуждены реагировать на каждую конкретную аварию некоторым «усредненным» образом и как следствие этого в некоторых случаях не срабатывают или срабатывают неправильно. Эквивалентные параметры, определенные устройством ПА непосредственно во время асинхронного режима, обеспечат самонастройку устройства на момент возникновения аварии и тем самым позволят повысить точность срабатывания автоматики. Анализ данных с регистраторов аварийных процессов дает возможность получить дополнительную информацию для корректного выбора уставок срабатывания и согласования работы различных комплексов устройств ПА, установленных на одной электропередаче.

Предполагается, что относительно узла, в котором регистрируются ток и напряжение, энергосистема может быть представлена двухмашинной

схемой замещения. Поскольку каждое единичное измерение локально наблюдаемых величин (напряжения и тока в узле сети) может быть использовано только в одном уравнении пространственной физической связи режимных параметров — уравнении Ома или Кирхгофа, то очевидно, что на основе этого одного измерения невозможно определить искомый эквивалент, так как число подлежащих оценке параметров превышает число уравнений связи. Не изменяет ситуацию и наличие нескольких пар измерений (выборки) в условиях неизменности режима ЭЭС, поскольку получаемые при этом уравнения связи не являются независимыми.

Принципиальное решение задачи дает дополнение уравнений пространственно-физической взаимосвязи переменных динамическими соотношениями связей параметров в различные моменты времени нестационарного режима ЭЭС.

В рассматриваемой задаче выборка, построенная на базе измерений при различном значении угла между эквивалентными генераторами (базисная выборка), дает совокупность независимых уравнений связи, совместное решение которых позволяет определить искомые эквивалентные параметры.

В процессе получения базисной выборки необходимо учитывать погрешности исходных данных, в том числе и возможность получения данных с грубыми ошибками. Объем измерений, точность, темп сбора данных и динамика ЭЭС накладывают ограничения на точность получаемых результатов и даже на возможность получения каких-либо оценок.

В [1] изложен метод решения рассматриваемой задачи для двухмашинных эквивалентов ЭЭС, в частном случае когда одна из систем может быть представлена шинами бесконечной мощности.

В статье рассмотрен расширенный метод для общего случая двухмашинного эквивалента, т.е. предполагается, что в процессе асинхронного движения могут участвовать оба эквивалентных генератора, причем каждый со своей скоростью, отличной от синхронной.

Векторы мощности в узле эквивалентной схемы.

Рассмотрим эквивалентную двухмашинную схему электропередачи, представленную на рис. 1, где Γ_1 и Γ_2 являются эквивалентными генераторами с ЭДС \dot{E}_1 и \dot{E}_2 , сопротивления \dot{Z}_1 и \dot{Z}_2 являются эквивалентными сопротивлениями от показанного на рис. 1 узла до векторов ЭДС эквивалентных генераторов.

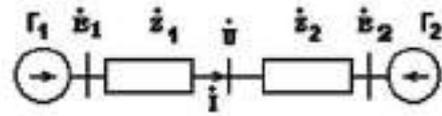


Рис. 1. Двухмашинная схема замещения ЭЭС

Пусть векторы эквивалентных ЭДС равны:

$$\dot{E}_1 = E_1 e^{ja_1(t)}; \quad \dot{E}_2 = E_2 e^{ja_2(t)}. \quad (1)$$

Выражения для наблюдаемых напряжения и тока имеют вид:

$$\dot{U} = \frac{\dot{Z}_2 \dot{E}_1 + \dot{Z}_1 \dot{E}_2}{\dot{Z}_S}; \quad (2)$$

$$\dot{I} = \frac{\dot{E}_1 - \dot{E}_2}{\dot{Z}_S}, \quad (3)$$

где $\dot{Z}_S = \dot{Z}_1 + \dot{Z}_2$.

Выражение для вектора полной мощности будем рассматривать в виде:

$$\dot{S} = \dot{U} \dot{I}^*. \quad (4)$$

Подставляя (2) и (3) в (4), получим:

$$\dot{S} = \frac{1}{\dot{Z}_S \dot{Z}_S^*} [E_1 E_2 (\dot{Z}_1 e^{-j(a_1 - a_2)} - \dot{Z}_2 e^{j(a_1 - a_2)}) + E_1^2 \dot{Z}_2 - E_2^2 \dot{Z}_1]. \quad (5)$$

Вводя определения $d = a_1 - a_2$ и $Z_S = |\dot{Z}_1 + \dot{Z}_2|$, получим:

$$\dot{S} = E_1 E_2 \frac{\dot{Z}_1}{Z_S^2} e^{-jd} - E_1 E_2 \frac{\dot{Z}_2}{Z_S^2} e^{jd} + \frac{E_1^2 \dot{Z}_2 - E_2^2 \dot{Z}_1}{Z_S^2}. \quad (6)$$

В большинстве практических случаев можно полагать, что эквивалентные ЭДС равны между собой (или немного отличаются), поэтому в частном случае, когда $|\dot{E}_1| = |\dot{E}_2| = E$

$$\dot{S} = \frac{E}{Z_S^2} (\dot{Z}_1 e^{-jd} - \dot{Z}_2 e^{jd}) + \frac{E}{Z_S^2} (\dot{Z}_2 - \dot{Z}_1). \quad (7)$$

Представляя комплексные сопротивления в экспоненциальном виде

$$\dot{Z}_1 = Z_1 e^{jq_1}; \quad \dot{Z}_2 = Z_2 e^{jq_2} \quad (8)$$

и вводя обозначения

$$\dot{m}_1 = \frac{E^2}{Z_S^2} Z_1 e^{jq_1} \quad \text{и} \quad \dot{m}_2 = \frac{E^2}{Z_S^2} Z_2 e^{jq_2}, \quad (9)$$

получим:

$$\dot{S} = \dot{m}_1 e^{-j\alpha} - \dot{m}_2 e^{j\alpha} + \dot{m}_2 - \dot{m}_1. \quad (10)$$

Это соотношение является основным уравнением рассматриваемого метода. Правую часть можно рассматривать как суперпозицию двух векторов

$$\dot{S} = \dot{c} + \dot{r}(d), \quad (11)$$

где вектор $\dot{r}(d) = \dot{m}_1 e^{-j\alpha} - \dot{m}_2 e^{j\alpha}$ представляет собой эллипс в комплексной плоскости (свойства такого эллипса подробно рассмотрены в приложении), а вектор $c = \dot{m}_2 - \dot{m}_1$ соответствует сдвигу указанного эллипса относительно начала координат комплексной плоскости.

Определение параметров эллипса мощности по результатам наблюдения. В идеальном случае для идентификации эллипса, дуга которого построена по точкам базовой выборки, можно было бы воспользоваться методом определения кривой по нескольким точкам, число которых соответствует числу неизвестных коэффициентов, однако подобный метод неработоспособен в реальных условиях при наличии погрешностей измерений. Поэтому для определения параметров эллипса используется метод наименьших квадратов (МНК) на выборке, длина которой существенно больше числа искомых параметров.

Поскольку в процессе перехода к АР параметры эквивалента энергосистемы могут изменяться во времени, то следует ограничиваться наименьшей возможной из удовлетворяющих условиям применения МНК длиной выборки. При этом на интервале выборки будем полагать неизменными значения эквивалентных сопротивлений и абсолютные значения ЭДС и, таким образом, возможное изменение параметров на всем интервале переходного процесса будем представлять как ступенчатое изменение по интервалам базовых выборок.

Вводя в рассмотрение параметры эллипса: c, d — координаты центра; a, b — большая и малая полуоси; α — угол между положительным направлением оси Ox и большой полуосью эллипса. Тогда уравнение эллипса в координатах x, y принимает вид:

$$\frac{[(x - c) \cos(\alpha) + (y - d) \sin(\alpha)]^2}{a^2} + \frac{[(y - d) \cos(\alpha) + (c - x) \sin(\alpha)]^2}{b^2} = 1.$$

Параметры эллипса определяются посредством МНК, т.е. путем минимизации невязки:

$$F(a, b, c, d, \alpha) = \sum_{i=1}^N \frac{\dot{e}_i}{\dot{e}_i} \sqrt{\frac{[(x_i - c) \cos(\alpha) + (y_i - d) \sin(\alpha)]^2}{a^2} + \frac{[(y_i - d) \cos(\alpha) + (c - x_i) \sin(\alpha)]^2}{b^2}} - \frac{\dot{u}_i}{\dot{u}_i}$$

где x_i, y_i — координаты точек годографа вектора полной мощности; N — общее число точек выборки данных.

Расчет параметров эллипса мощности. Используя выражение для угла наклона малой полуоси эллипса (см. (П-8) приложения), применим к уравнению (11) операцию поворота. Располагая направления осей эллипса параллельно осям координат комплексной плоскости и обозначив $q_0 = (q_1 - q_2)/2$, получим:

$$\dot{S} = e^{j\beta} (\dot{m}_1 e^{-j(\alpha + q_0)} - \dot{m}_2 e^{j(\alpha + q_0)}) - e^{j\beta} (\dot{m}_1 e^{jq_0} - \dot{m}_2 e^{-jq_0}).$$

Правую часть полученного выражение можно рассматривать как суперпозицию векторов центра и траектории эллипса, оси которого теперь расположены параллельно осям координат, т.е.

$$\dot{S} = \dot{c} + \dot{r}(d + q_0),$$

где

$$\dot{c} = - e^{j\beta} (\dot{m}_1 e^{jq_0} - \dot{m}_2 e^{-jq_0}); \quad (12)$$

$$\dot{r} = e^{j\beta} (\dot{m}_1 e^{-j(\alpha + q_0)} - \dot{m}_2 e^{j(\alpha + q_0)}). \quad (13)$$

Полагаем, что исходная траектория вектора мощности известна (наблюдаема) и, следовательно, известны векторы \dot{r} , наклон эллипса и значения полуосей.

Необходимо отметить, что совокупность уравнений для определения параметров эллипса дает многозначное решение и необходима некоторая дополнительная информация, которая позволит выбрать то решение, которое отвечает исследуемому процессу.

В частности при определении угла наклона дополнительным соображением является следующее: поскольку аргументы элементов двухмашинной схемы замещения имеют возможный диапазон изменения, равный $0, 90^\circ$, то и значение угла β может изменяться только в пределах от 0 до 180° , что позволяет выбрать единственное значимое решение:

$$\beta = \alpha - \rho/2,$$

где α — угол между положительным направлением оси действительных чисел и направлением большей оси эллипса.

Для численного определения величин η_1 и η_2 по выражениям (4) необходимо знать соотношение между этими параметрами, т.е. $\eta_1 > \eta_2$ или наоборот. Для этого рассмотрим выражение для вектора \dot{i} (13). Если вектор \dot{i} вращается в ту же сторону, что и вектор $e^{-j\omega t}$, то $\eta_1 > \eta_2$, иначе — $\eta_1 < \eta_2$. При этом, направление вращения вектора $e^{-j\omega t}$ можно оценить по значению угла между векторами напряжений \dot{U}_1 и \dot{U}_2 . Зная η_1 , η_2 , j и взяв некоторую произвольную точку \dot{i} выборки, можно из (13) определить разность $\alpha - \alpha_0$, затем, определив α_0 из (12), получить α .

Таким образом, на данном этапе получено значение угла α между векторами эквивалентных ЭДС и значения коэффициентов η_1 , η_2 основного уравнения (11).

Кроме этого из (П-8) и соотношения $\alpha_0 = (\alpha_1 - \alpha_2)/2$ можно определить аргументы сопротивлений ветвей:

$$\alpha_1 = \alpha + \alpha_0; \alpha_2 = \alpha - \alpha_0. \tag{14}$$

Теперь можно перейти к расчету параметров эквивалентной схемы.

Расчет параметров эквивалентной схемы. По полученным значениям η_1 , η_2 можно определить аргументы сопротивлений эквивалентной схемы, однако модули сопротивлений, равно как и модули ЭДС, пока не определены и имеющейся информации пока недостаточно для их определения.

Возможность определения указанных величин предоставляет «двухточечное» измерение вектора

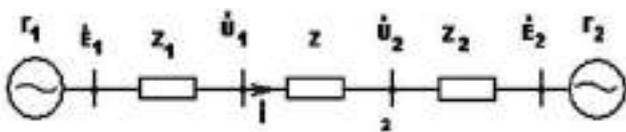


Рис. 2. Линия передачи с присоединенными эквивалентами энергосистемы

полной мощности, выполненное по концам некоторой линии передачи с заранее известными параметрами. Рассмотрим эквивалентную схему, представленную на рис. 2.

Будем полагать, что сопротивление линии Z известно с достаточной степенью точности.

Пусть имеются осциллограммы напряжения и тока, полученные на обоих концах линии или только на одном из концов, тогда напряжение на другом конце вычисляется по току и известным параметрам линии. Выражения для наблюдаемых напряжения и тока имеют вид:

$$\dot{U}_1 = \frac{\dot{Z}E_1 + \dot{Z}_1E_2}{\dot{Z}_S}; \dot{i} = \frac{E_1 - E_2}{\dot{Z}_S}; \dot{U}_2 = \frac{\dot{Z}_2E_1 + \dot{Z}E_2}{\dot{Z}_S},$$

где $\dot{Z}_S = \dot{Z} + \dot{Z}_1 + \dot{Z}_2$, $\dot{Z}_1 = \dot{Z} + \dot{Z}_2$, $\dot{Z}_2 = \dot{Z} + \dot{Z}_1$.

Теперь имеется возможность проанализировать два эллипса мощности по концам линии. В соответствии с (11) получаем систему уравнений:

$$\begin{cases} \dot{S}_1 = \dot{m}_1 e^{-j\alpha} - \dot{m}_2 e^{j\alpha} + \dot{m}_2 - \dot{m}_1; \\ \dot{S}_2 = \dot{m}_2 e^{-j\alpha} - \dot{m}_1 e^{j\alpha} + \dot{m}_1 - \dot{m}_2 \end{cases} \tag{15}$$

где

$$\begin{cases} \dot{m}_1 = E^2 \frac{\dot{Z}_1}{\dot{Z}_S^2}; \\ \dot{m}_2 = E^2 \frac{\dot{Z}_2}{\dot{Z}_S^2}; \\ \dot{m}_1 = E^2 \frac{\dot{Z}_1 + \dot{Z}}{\dot{Z}_S^2}; \\ \dot{m}_2 = E^2 \frac{\dot{Z}_2}{\dot{Z}_S^2}. \end{cases} \tag{16}$$

Определив параметры для каждого из эллипсов в соответствии с вышеизложенной методикой, получим из (16) первое и второе эквивалентные сопротивления:

$$\dot{Z}_1 = \dot{Z} \frac{\dot{m}_1}{\dot{m}_2 - \dot{m}_1}; \dot{Z}_2 = \dot{Z} \frac{\dot{m}_2}{\dot{m}_1 - \dot{m}_2}.$$

Наконец, по известному теперь значению $Z_S = |\dot{Z} + \dot{Z}_1 + \dot{Z}_2|$ получим модуль эквивалентной ЭДС:

$$E = Z_S \sqrt{\frac{\dot{m}_1}{\dot{Z}_1}}.$$

Таким образом, рассчитаны все элементы эквивалентной схемы.

Проверка метода на математической модели процесса. Для апробации метода и оценки погрешностей результатов, которые могут быть связаны как с погрешностями наблюдаемой выборки, так и с принятым допущением о равенстве эквивалентных ЭДС E_1 , E_2 , был проведен ряд численных экспериментов.

Моделью в экспериментах являлась схема рис. 2 со следующими параметрами: $\dot{Z}_1 = 5 + j60$, $\dot{Z} = 10 + j40$, $\dot{Z}_2 = 10 + j80$.

Векторы ЭДС эквивалентных генераторов в процессе асинхронного режима моделировались как $E_1 = E_1 e^{ja_1(t)}$; $E_2 = E_2 e^{-ja_2(t)}$, т.е. вектора

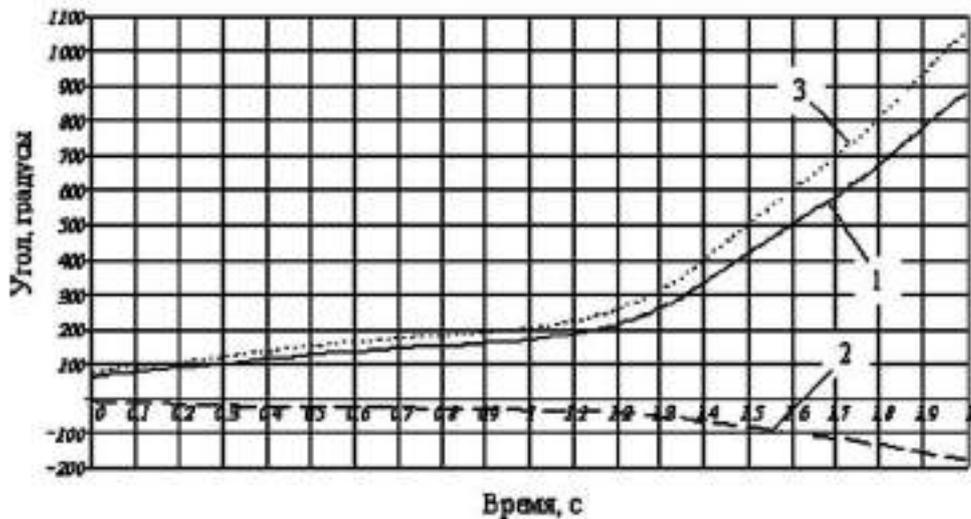


Рис. 3. Зависимости изменения углов векторов эквивалентных ЭДС (1, 2) и угла между ними (3) при АР

ЭДС эквивалентных генераторов вращаются в противоположные стороны с различными скоростями. На рис. 3 показаны зависимости изменения углов векторов \vec{E}_1 , \vec{E}_2 и угла между ними d .

Для выявления влияния на результаты предложенного метода неодинаковости значений ЭДС было реализовано изменение отношений модулей $k = |\vec{E}_1 / \vec{E}_2|$, в пределах от 0,8 до 1,22, характерных для реальных энергосистем [2].

В результате прокрутки модели были получены наборы «наблюдений» годографов векторов полной мощности \vec{S}_1 и \vec{S}_2 , в которые была введена дополнительная погрешность, описываемая нормальным законом распределения. Пример го-

дографов векторов полной мощности для одного из экспериментов изображен на рис. 4.

Полученные траектории обрабатывались с помощью МНК для определения параметров эллипсов мощности, которые в свою очередь использовались для определения эквивалентных сопротивлений Z_1 , Z_2 и угла d в соответствии с изложенным методом.

Результаты серии математических экспериментов показали, что при $k = 0,81$, $1,25$ и моделируемой погрешности в 1% погрешность определения угла находится в диапазоне от 1 до 4°, при моделируемой погрешности данных в 3% погрешность определения угла составляет от 3 до 6°, а при увеличении моделируемой погрешности до 5% погрешность определения угла достигает 9°.

Необходимо отметить, что существенное влияние на точность результатов, получаемых рассматриваемым методом, оказывает значение наблюдаемой дуги разворота углов между эквивалентными генераторами, в частности выборка, полученная при дуге менее 90°, как правило, не позволяет идентифицировать параметры эллипса при зашумлении выборки выше 1%.

Проверка метода на реальных процессах электродинамической модели. Для проверки работоспособности метода в условиях, приближенных к реальным измерениям, были использованы данные осциллограмм, полученные в процессе перехода к АР упрощенной схемы ОЭС Северо-Запада, реализованной на физической модели НИИПТ. Анализ процесса выполнялся на основе осциллограмм, представленных в формате Comtrade. Схема и параметры электродинамической модели рассмотрены в [3].

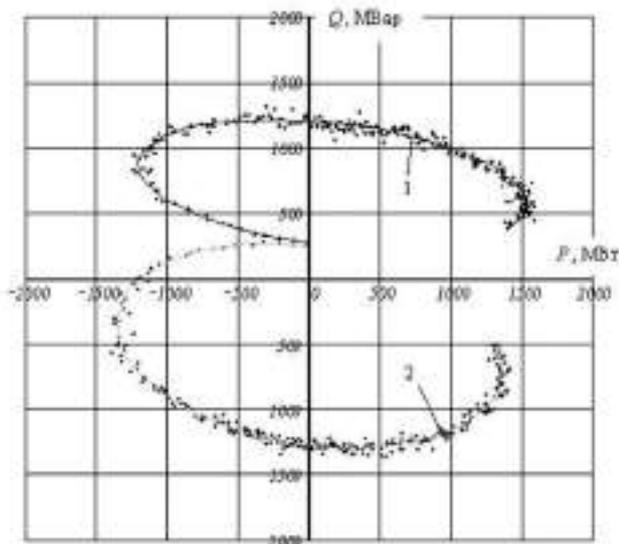


Рис. 4. Годографы векторов полной мощности: — — идеальные годографы векторов мощности; \times — выборки с внесенными моделируемыми погрешностями в 3% на уровне одного стандартного среднеквадратичного отклонения для нормального распределения

Для получения векторов использовался метод преобразования в ортогональные составляющие Фурье с интегрированием методом трапеций. Момент начала АР определялся как начало увеличения угла между векторами в конце и начале

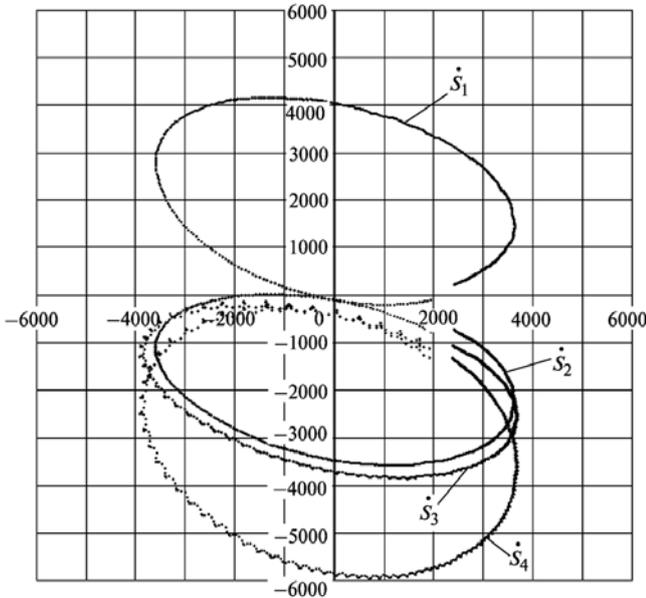


Рис. 5. Векторы полной мощности

контролируемой линии.

На основании полученных векторов напряжения тока в узлах двух линий были получены составляющие прямой последовательности тока, напряжения и векторы мощностей $\dot{S}_1, \dot{S}_2, \dot{S}_3, \dot{S}_4$, представленные на рис. 5.

Анализ траекторий позволил определить параметры полученных эллипсов мощности и как следствие — эквивалентные параметры двухмашинной схемы замещения относительно узла измерения.

Эквивалентное сопротивление от узла в сторону первого эквивалентного генератора составило $\dot{Z}_{1ЭКВ} = 2,7 + j22,23$, а в сторону эквивалентного генератора шин Ленэнерго — $\dot{Z}_{2ЭКВ} = 2,1 + j7,9$.

При этом проверочный расчет соответствия значения угла между эквивалентными генераторами значению разности углов физических датчиков углов генераторов на электродинамической модели показал, что погрешность расчетного угла не выходит за диапазон $\pm 5^\circ$.

Приложение. Характеристики эллипса в комплексной плоскости. Рассмотрим функцию в комплексной плоскости:

$$\dot{F}(d) = \dot{m}_1 e^{-jd} - \dot{m}_2 e^{jd}$$

Изображение функции представлено на рис. 6.

Вектор $\dot{F}(d)$ является эллипсом, центр которого совпа-

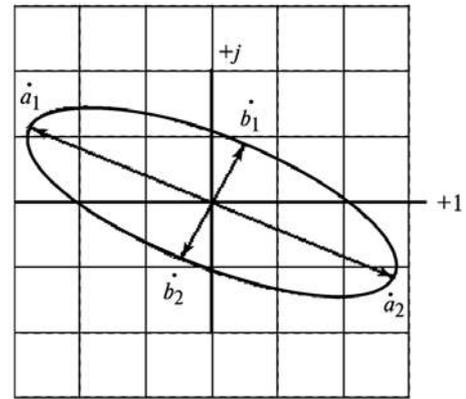


Рис. 6. Эллипс на комплексной плоскости

дает с началом координат комплексной плоскости.

Точки пересечения большой оси эллипса с самой кривой можно определить как максимальные значения вектора $\dot{F}(d)$, а соответствующие точки малой оси — как минимальные значения этого вектора.

Для определения этих точек представим слагаемые в экспоненциальном виде:

$$\dot{F}(d) = \dot{m}_1 e^{j(q_1 - d)} - \dot{m}_2 e^{j(q_2 + d)}, \tag{П-1}$$

где q_1, q_2 — аргументы параметров \dot{m}_1, \dot{m}_2 .

Квадрат модуля функции (П-1) будет иметь вид:

$$F^2(d) = \dot{m}_1^2 + \dot{m}_2^2 - 2 \dot{m}_1 \dot{m}_2 \cos(q_1 - q_2 - 2d). \tag{П-2}$$

Функция достигает максимума при $\cos(q_1 - q_2 - 2d) = -1$, т.е. при $d_{F_{\max}} = \frac{q_1 - q_2}{2} \mp \frac{p}{2} k$, где $k = 1, 2, \frac{1}{4}$, и ее значение в точке максимума равно:

$$F^2(d_{F_{\max}}) = (\dot{m}_1 + \dot{m}_2)^2$$

Длина большой полуоси эллипса

$$a = \sqrt{(\dot{m}_1 + \dot{m}_2)^2} = |\dot{m}_1 + \dot{m}_2| \tag{П-3}$$

Функция достигает минимума при $\cos(q_1 - q_2 - 2d) = 1$, т.е. при $d_{F_{\min}} = \frac{q_1 - q_2}{2} \mp p k$, где $k = 0, 1, 2, \frac{1}{4}$, и ее значение в точке минимума равно:

$$F^2(d_{F_{\min}}) = (\dot{m}_1 - \dot{m}_2)^2$$

Длина малой полуоси эллипса

$$b = \sqrt{(\dot{m}_1 - \dot{m}_2)^2} = |\dot{m}_1 - \dot{m}_2| \tag{П-4}$$

Используя полученные соотношения, можно решить обратную задачу — по имеющейся (наблюдаемой) эллиптической траектории получить абсолютные значения параметров эллипса \dot{m}_1, \dot{m}_2 .

Поскольку траектория известна, то известны и значения длины малой и большой полуосей. Для получения абсолютных значений параметров \dot{m}_1, \dot{m}_2 можно использовать следующую систему уравнений:

$$\begin{cases} a = \dot{m}_1 + \dot{m}_2; \\ b = |\dot{m}_1 - \dot{m}_2| \end{cases} \tag{П-5}$$

С учетом свойств модуля система уравнений имеет два решения:

$$m_1 = \frac{a+b}{2}, \quad m_2 = \frac{a-b}{2}, \quad \text{если } m_1 > m_2; \quad (\text{П-6})$$

$$m_1 = \frac{a-b}{2}, \quad m_2 = \frac{a+b}{2}, \quad \text{если } m_1 < m_2; \quad (\text{П-7})$$

Рассмотрим эллипс. Поскольку полученные точки $F(d_{F_{\max}})$ являются концами больших полуосей эллипса, то выражение для векторов больших полуосей имеет вид:

$$a_{1,2} = (m_1 \pm m_2) e^{j\left(\frac{\alpha}{2} + \frac{q_1 + q_2}{2}\right)}$$

Очевидно, что угол наклона малых полуосей ортогонален углу больших полуосей, следовательно

$$b_{1,2} = (m_1 - m_2) e^{j\left(\frac{\alpha}{2} + \frac{q_1 + q_2}{2}\right)}$$

откуда следует, что значение угла наклона малой полуоси эллипса соответствует среднему значению аргументов параметров m_1 , m_2 , т.е.

$$j = (q_1 + q_2)/2. \quad (\text{П-8})$$

Выводы. 1. Предложенный метод позволяет определить эквивалентные параметры относительно узла измерения в условиях асинхронного режима электроэнергетической системы. Точность определения эквивалентных параметров зависит от уровня шума входных сигналов напряжения и тока, а также от значения дуги расхождения генераторов.

2. Метод может быть использован для анализа осциллограмм и выявления причин аварий, свя-

занных с переходом в АР.

3. Применимость метода для определения рабочих уставок локальных устройств ПА определяется наблюдаемостью процесса в конкретной точке установки такого устройства и требует дальнейшего исследования.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Якимец И.В., Наровлянский В.Г., Ососков Г.А., Налевин А.А. Выявление асинхронного режима в условиях неполной информации об эквивалентных параметрах энергосистемы. — Сб. науч. трудов: Электроэнергетика России: современное состояние, проблемы и перспективы. — М.: Энергоатомиздат, 2002.
2. Гоник Я.Е. Обобщенные способы выявления асинхронного хода. — Тр. ин-та «Энергосепроект», вып. 4. — М.: Энергия, 1974.
3. Налевин А.А. Исследование и разработка адаптивных алгоритмов выявления и ликвидации асинхронного режима для использования в микропроцессорной противоаварийной автоматике электроэнергетических систем: Автореф. дис. ... канд. техн. наук. — М., 2003.

[30.11.04]

Авторы: Наровлянский Владимир Григорьевич окончил электрофизический факультет Ленинградского электротехнического института. В 1981 г. защитил кандидатскую диссертацию по специальности «Теоретические основы электротехники» в ЭНИИ им. Г.М. Кржижановского. Заведу-

К СВЕДЕНИЮ АВТОРОВ И ЧИТАТЕЛЕЙ!

Каждый автор имеет право бесплатно получить 1 экз. журнала с его статьей.

Экземпляры номеров журнала «Электричество» за последние годы можно приобрести в редакции журнала: 111250 Москва, Красноказарменная ул., 12 (ком. 303, тел. 361-9217; 361-9252); при посещении редакции звонить из бюро пропусков ВЭИ (центральная проходная) по местным номерам: 62-17, 62-52.

ющий лабораторией института «Энергосетьпроект».

***Налевин Алексей Александрович** окончил электроэнергетический факультет Московского энергетического института. В 2003 г. защитил кандидатскую диссертацию по специальности «Электростанции и электроэнергетические системы». Главный инженер проекта института «Энергосетьпроект».*