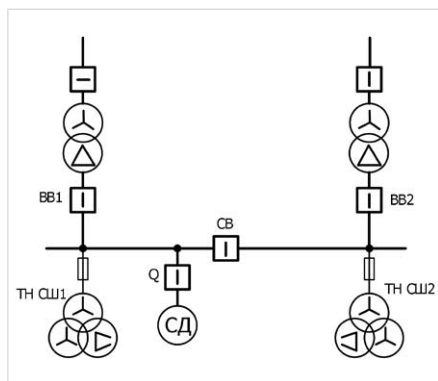


Реализация синхронного включения при БАВР

В статье рассмотрена проблема реализации синхронного включения секционного выключателя (СВ) в комплексе быстродействующего автоматического ввода резерва. Для наглядности приведены экспериментальные результаты и описание алгоритма для точного определения момента выдачи команды на включение секционного выключателя.



Одно из требований к быстродействующему автоматическому вводу резерва (далее — БАВР) — включение секционного выключателя в момент, когда вектора напряжения на «здоровой» секции шин и ЭДС обобщенного двигателя, выбегающего на секцию шин, потерявшую питание, имеют небольшое расхождение по фазе (в [1] указан диапазон до 30°). Это позволяет минимизировать значение переходного тока при включении, однако методические погрешности в определении угла и частоты в цифровых блоках и игнорирование скорости изменения частоты могут привести к нарушению этого требования.

Рассмотрим режим потери питания на секции шин №1 (СШ1), к которой подключен синхронный двигатель (далее — СД). Примем, что напряжение на «здоровой» секции шин №2 (СШ2) неизменно по модулю и частоте (рис. 1).

Уравнение движения вектора напряжения СШ2 имеет следующий вид:

$$\varphi_{СШ2} = \omega_{ном} \cdot t + \varphi_0_{СШ2}, \quad (1)$$

где $\varphi_{СШ2}$ — текущая фаза, рад;
 $\omega_{ном}$ — номинальная круговая частота (угловая скорость), рад/с;

$\varphi_0_{СШ2}$ — начальная фаза, рад,
 и представляет собой равномерное движение по окружности.

Закон движения вектора напряжения СШ1 зависит от закона выбега двигателя (см. ниже). При потере питания напряжение на СШ1 индуцируется только полем возбуждения двигателя. В этом случае частота и фаза напряжения однозначно связаны с частотой и фазой вращения ротора.

В общем виде закон выбега двигателя есть второй закон Ньютона для вращающихся тел:

$$J \frac{d^2\varphi}{dt^2} = M, \quad (2)$$

где J — момент инерции вращающихся масс, кг·м²;
 φ — угол поворота ротора относительно заранее выбранной неподвижной оси, рад;
 M — суммарный момент сил, действующий на тело, Н·м.

При двукратном интегрировании уравнения (2), в процессе нахождения зависимости $\varphi(t)$, возникает две константы, определяемые начальными условиями:

- φ_0 — начальный угол (угол в начальный момент времени), рад;
- $(d\varphi/dt)_{t=0} = \omega_0$ — начальная угловая скорость, рад/с.

Для выдачи команды на включение СВ необходимо спрогнозировать значение угла в момент времени включения выключателя, что требует знать величину угла между напряжениями — φ , значение угловой скорости — ω , и закон ее изменения во времени.

Проанализируем каждый из этих параметров.

Частота

Расчет частоты в устройствах РЗА может реализовываться различными способами [2, 3]. Примем, что алгоритм без погрешности рассчитывает мгновенную частоту, но имеет некоторое окно усреднения для повышения надежности результата (стандарт [4] регламентирует расчет частоты не более, чем за 60 мс).

Это приводит к тому, что при усреднении значений за время $T_{уср}$, при линейно меняющейся частоте, алгоритм будет давать погрешность, равную:

$$\Delta f = -f \cdot \frac{T_{уср}}{2}, \quad (3)$$

где f — скорость изменения частоты, Гц/с;
 $T_{уср}$ — время усреднения, с.

Использование частоты с погрешностью (3) при оценке угла, на который повернется вектор напряжения за время включения выключателя, приведет к погрешности по углу, равной:

$$\Delta\varphi_1 = 2\pi \cdot \Delta f \cdot T_{вкл}. \quad (4)$$

При этом действительный вектор успеет описать большую дугу, чем это следует из расчета.

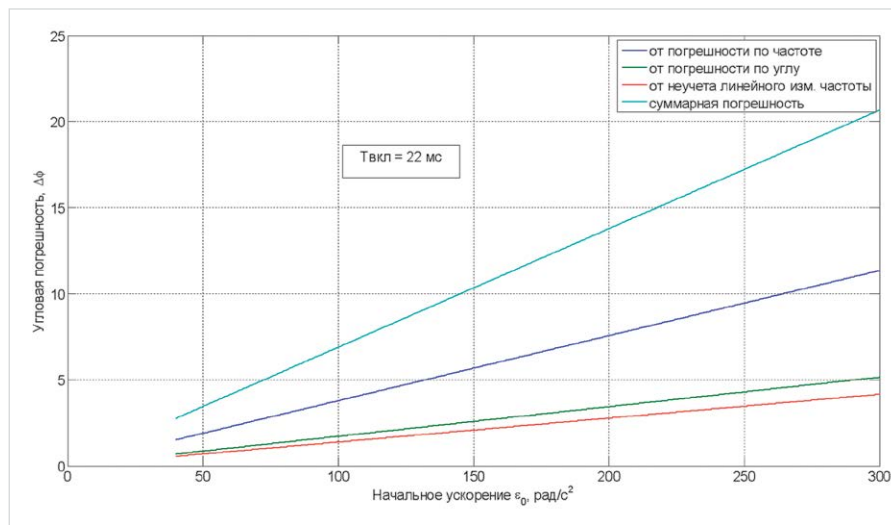


Рис. 2 — Зависимости угловых погрешностей от начального ускорения при использовании быстродействующего выключателя

Угол

Ортогональные составляющие будем вычислять с помощью разложения сигнала в ряд Фурье:

$$C = \int_{t-T}^t j y \cdot e^{-j\omega t} dt. \quad (5)$$

Так как частота входного сигнала отличается от частоты, используемой для вычисления ортогональных составляющих (см. п. Частота), функция под интегралом равна:

$$y = A \cdot \sin((\omega + \Delta\omega)t + \varphi). \quad (6)$$

Интуитивно можно ожидать что вектор уже не будет неподвижен, а начнет совершать вращение с разностной частотой $\Delta\omega$.

Точное выражение после взятия интеграла имеет вид:

$$C = A \cdot \sin\lambda \cdot \left[\frac{1}{\lambda} e^{j(\Delta\omega t + \varphi - \lambda)} - \frac{1}{2\pi + \lambda} e^{-j((2\omega + \Delta\omega)t + \varphi - \lambda)} \right], \quad (7)$$

где $\lambda = \pi(\Delta\omega/\omega)$.

Предположение оказалось верным, вектор имеет низкочастотную составляющую $\Delta\omega$. Однако, в дополнение к этому (в соответствии с АЧХ ДПФ), изменилась амплитуда вектора (в $\sin\lambda/\lambda$ раз) и добавилась высокочастотная составляющая $2\omega + \Delta\omega$.

Для темы статьи важно, что вектор в среднем всегда отстает от «реального» вектора на угол λ :

$$\Delta\varphi_2 = \pi \frac{\Delta\omega}{\omega}. \quad (8)$$

То есть, при выполнении прогноза действительный вектор уже находится чуть «дальше», чем это предполагает блок.

Закон выбега

Выбег двигателя описывается уравнением [5, 6, 7]:

$$\frac{d\hat{\omega}}{dt} = -\frac{k_{gr}}{\tau_j} [m'_0 + (1 - m'_0) \cdot \hat{\omega}^Y], \quad (9)$$

где k_{gr} — коэффициент загрузки двигателя по активной мощности;

τ_j — постоянная инерции системы «двигатель – приводной агрегат», с;

m'_0 — приведенный начальный момент сопротивления, $M_0/(k_{gr} \cdot M_{ном})$;

$\hat{\omega}$ — приведенная угловая скорость, $\omega/\omega_{ном}$.

Темп выбега определяется начальным ускорением $(d\hat{\omega}/dt)_{t=0} = -k_{gr}/\tau_j = \hat{\varepsilon}_0$. При реальных начальных ускорениях от 40 до 400 рад/с² [5] отклонение закона изменения угловой скорости (частоты) от линейного за время расчетов и усреднений в блоках РЗА мало. Но также может использоваться предположение о том, что за время включения выключателя частота не меняется. В этом случае погрешность по углу равна:

$$\Delta\varphi_3 = \varepsilon \cdot \frac{T_{вкл.}^2}{2}, \quad (10)$$

где ε — угловое ускорение (производная частоты), рад/с².

Все погрешности имеют одинаковый знак и могут привести к тому, что действительная фаза вектора в момент включения СВ будет отличаться от фазы напряжения «здоровой» СШ больше, чем допускается.

На рис. 2 приведены погрешности по углу в зависимости от значения начального ускорения при использовании быстродействующего выключателя ISM15_Shell_FT2 с электронным модулем управления CM_1501_01(4) с временем включения 22 мс [8]. На рис. 3 — то же при использовании небыстродействующего выключателя с временем включения 50 мс.

Постоянная инерции для газоперекачивающих агрегатов с электродвигателями STD-4000-2 и нагнетателем 280-12-7 равна 3,25 с [9], что позволяет вычислить начальное ускорение при выбеге — 96,6 рад/с². По графикам видно, что только методическая погрешность будет составлять 7 и 18 градусов соответственно. Учитывая цикличность расчетов блока, погрешность по углу будет еще увеличена, так как «правильный» момент выдачи команды может попасть на середину программного цикла. При больших значениях начального ускорения и выключателях, включающихся за 70—100 мс, методическая погрешность будет составлять десятки градусов!

В устройстве **БМРЗ-БАВР** производства **ООО «НТЦ «Механотроника»** применяются следующие решения для точного определения момента выдачи команды на включение секционного выключателя:

1. Устройство анализирует не только скорость, но и ускорение вращения векторов секций шин относительно друг друга.

2. Учитывается линейное изменение частоты за время включения выключателя, так как погрешность без учета этого факта зависит квадратично от времени включения.
3. Используется адаптивное изменение порядка фильтра для более быстрой реакции на изменение режима сети. Максимальная величина окна наблюдения равна половине периода, что позволяет не учитывать погрешности по углу при расчете ортогональных составляющих.
4. Предпочтительнее использование быстродействующих выключателей, так как точность прогноза на длительный промежуток времени снижается.

Список литературы

1. Устройства быстродействующего автоматического ввода резерва с тиристорным коммутатором напряжением более 1000 В. Общие технические требования. ПАО «Транснефть», 2017.
2. Иванов Н.Г., Солдатов А.В., Наумов В.А., Антонов В.И. Оценка частоты сети в цифровых системах РЗА по переходу через нуль: характеристики точности // Релейная защита и автоматизация. 2013. №4. С. 22–25.
3. Антонов В.И., Наумов В.А., Шевцов В.М. Оценка частоты электрической сети: теоретические основы и практические алгоритмы. Цифровая электротехника: проблемы и достижения. Выпуск 1. Чебоксары: РИЦ СРЗАУ, 2012. 120 с.
4. Релейная защита и автоматика. Автоматическое противоаварийное управление режимами энергосистем. Микропроцессорные устройства автоматической частотной разгрузки. Нормы и требования. М.: Системный оператор Единой энергетической системы, 2016. 19 с.
5. Крышнев Ю.В. Исследование динамики выбега синхронных двигателей с учетом характеристик приводных механизмов // Вестник Гомельского государственного технического университета им. П.О. Сухого. 2002. №3–4. С. 74–81
6. Сыромятников И.А. Режимы работы асинхронных и синхронных двигателей. М.: Энергоатомиздат, 1984. 240 с.
7. Курганов В.В., Крышнев Ю.В., Верига Б.А. Учет механической характеристики обобщенного привода в алгоритме быстродействующего самозапуска высоковольтных синхронных электродвигателей // Энергетика. Известия высших учебных заведений и энергетических объединений. 2007. №2. С. 17–33.
8. Комплекс быстродействующего АВР БАП10_ШеллFT2_1. Техническая информация. Таврида электрик, 50 с.
9. Беляев А.В. Автоматика и защита на подстанциях с синхронными и частотно регулируемые электродвигателями большой мощности. СПб: ЭПИП, 2012. Ч.1. 72 с.

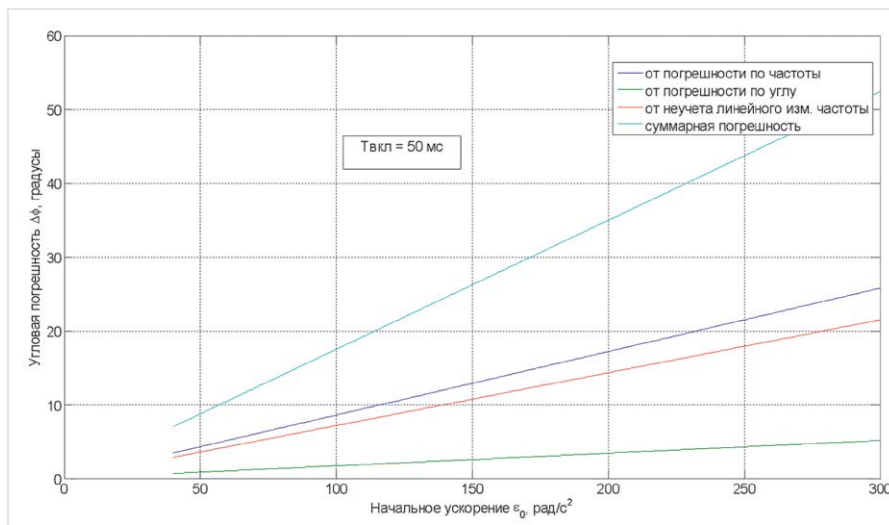


Рис. 3 — Зависимости угловых погрешностей от начального ускорения при использовании небыстродействующего выключателя