

СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ПУСКОВЫХ ОРГАНОВ БАВР В СИСТЕМАХ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ С ДВИГАТЕЛЬНОЙ НАГРУЗКОЙ

Рассмотрен способ повышения надёжности систем электроснабжения с двигательной нагрузкой при кратковременных нарушениях электроснабжения за счёт совершенствования пусковых органов быстродействующего АВР (БАВР) на основе предложенного метода ускоренного определения комплексных мгновенных значений токов и напряжений прямой и обратной последовательностей. Приведен пример успешного действия устройства БАВР с использованием предложенного подхода.

Ключевые слова: быстродействующее автоматическое включение резерва, двигательная нагрузка, пусковой орган, прямая последовательность, обратная последовательность.

Для повышения надёжности электроснабжения крупных промышленных предприятий и систем собственных нужд электростанций их питание должно осуществляться не менее чем от двух независимых источников. При наличии двух источников питания схему питающей подстанции выполняют с двумя секциями, которые для обеспечения взаимного резервирования соединяют между собой секционным выключателем (рис. 1.).

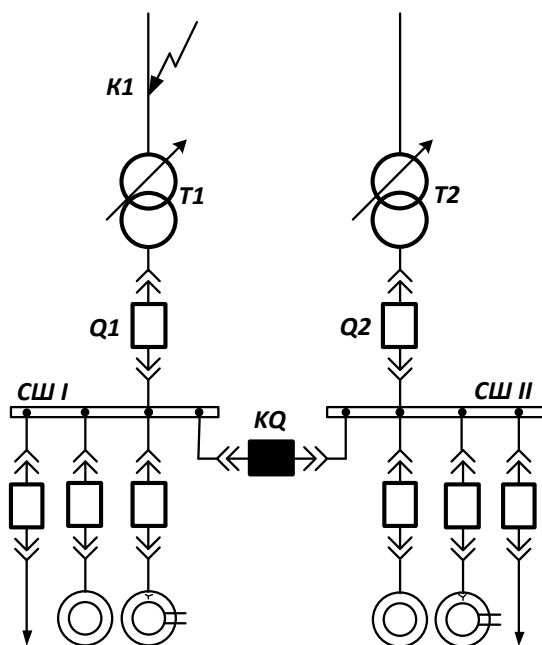


Рис. 1 Схема питающей подстанции

В нормальном режиме работы нагрузка каждой секции получает питание от своего источника, а в аварийном режиме, секция, потерявшая питание, переключается на резервный источник включением секционного выключателя (KQ). Команда на отключение выключателя рабочего питания и включение секционного подается от устройств автоматического включения резерва (АВР), в которых пусковые органы выполняют на основе контроля напряжения, частоты или угла между векторами напряжений взаиморезервируемых секций. Однако на подстанциях, питающих синхронные и асинхронные двигатели, с целью предотвращения несинхронной подачи резервного питания требуется снижение напряжения на секции до уровня, допустимого по условиям несинхронного включения, что увеличивает время перерыва питания.

Длительность перерыва питания при переключении секции на резервный источник оказывает значительное влияние на успешность самозапуска электродвигателей, так как в соответствии с [1] при снижении напряжения синхронные двигатели, нагруженные до 0.8 – 0.9 номинальной мощности уже через 0.2 – 0.4 секунды могут выпасть из синхронизма. Во время последующего восстановления питания из-за

недостаточного асинхронного момента эти электродвигатели могут не втянуться в синхронизм и отключаются защитами [2].

Целью данной работы является совершенствование пусковых органов БАВР, которые позволят сократить время перерыва питания, предотвратить выход двигателей из синхронизма и обеспечить их успешный самозапуск.

В последнее время для минимизации времени перерыва питания и глубины снижения напряжения при потере питания по какой-либо причине в системах электроснабжения с двигательной нагрузкой применяют устройства БАВР [1]. Устройства БАВР позволяют осуществить синфазную подачу резервного питания. Сущность такого подхода заключается в том, что резервное питание подается на двигатели в момент совпадения по фазе векторов остаточного напряжения на двигателях и напряжения резервного источника питания, т.е. после первого проворота вектора остаточного напряжения на шинах на 360^0 или при допустимых отклонениях по углу. Однако и в этих случаях успешный самозапуск двигателей не всегда обеспечивается.

Современный уровень развития микропроцессорных технологий и выпуск быстродействующей коммутационной аппаратуры позволяют создавать устройства БАВР с более сложными алгоритмами, которые позволяют выполнить подачу резервного питания до достижения углом между векторами остаточного и резервного напряжений значений менее $40^0 - 60^0$, что в большинстве случаев позволяет предотвратить нарушение динамической устойчивости двигательной нагрузки.

Известен ряд способов [3 - 6] построения логики пускового органа БАВР на основе анализа параметров системы в режиме реального времени. Логика работы пускового органа БАВР при этом строится на сравнении уровней напряжений на взаиморезервируемых секциях, сравнении угла между напряжениями или токами основной и резервной секций, контроле направления тока или активной мощности на вводах основной и резервной секций. Ряд этих способов включает в себя также

измерение и преобразование комплексных действующих значений напряжений и токов в комплексные напряжения и токи прямой и обратной последовательности.

В соответствии с [7] значения токов и напряжений прямой и обратной последовательностей рассчитывают по следующим формулам:

$$\bar{X}_{PP} = \frac{1}{3} \cdot (\bar{X}_A + a \cdot \bar{X}_B + a^2 \cdot \bar{X}_C), \quad (1)$$

$$\bar{X}_{OB} = \frac{1}{3} \cdot (\bar{X}_A + a^2 \cdot \bar{X}_B + a \cdot \bar{X}_C). \quad (2)$$

где: $a = e^{j \frac{2\pi}{3}}$ - фазовый множитель;

$\bar{X}_A, \bar{X}_B, \bar{X}_C$ - векторы комплексных действующих значений токов или напряжений по фазам.

Алгоритм, который позволяет выполнить измерение вращающегося вектора и представить его в комплексной форме, согласно [8], основывается на двух выборках синусоидального сигнала $x(t)$ известной частоты ω , взятых через интервал времени h , и на решении системы уравнений (3) и (4), из которой находят амплитуду X_m и фазу φ этого сигнала.

$$x(t) = X_m \cdot \cos(\omega \cdot t + \varphi), \quad (3)$$

$$x(t+h) = X_m \cdot \cos(\omega \cdot (t+h) + \varphi). \quad (4)$$

Значение амплитуды и фазы измеряемого сигнала из решения системы уравнений (3) и (4) по известным двум выборкам t_1 и t_2 имеет вид:

$$X_m = \frac{1}{\sin(\omega \cdot h)} \sqrt{x(t_2)^2 - 2 \cdot x(t_2) \cdot x(t_1) \cdot \cos(\omega \cdot h) + x(t_1)^2}, \quad (5)$$

$$\varphi = \arccos \frac{x(t_1)}{X_m} - \omega \cdot t_1. \quad (6)$$

Если принять выборки сигнала через время h , соответствующее углу поворота вектора на 90^0 , то из выражений (3) и (4) следует более простое выражение для определения X_m :

$$X_m = \sqrt{x(t)^2 + x(t+h)^2}. \quad (7)$$

Однако, недостатком такого подхода является то, что выборки косинусоидального сигнала, взятые через $\omega \cdot (t + h) = 90^\circ$ приводят к замедлению реакции пусковых органов БАВР на возникновение аварийного режима. При значениях h , соответствующим углам менее 90° , усложняются расчётные выражения для определения амплитуды X_m и угла φ вектора.

Поэтому рассмотрим другой подход к определению векторов мгновенных комплексных значений токов (напряжений).

Как известно, вектор, представленный в комплексной плоскости, в любой момент времени имеет проекции на реальную и мнимую оси (рис.2), которые соответственно равны:

$$x_\alpha(t) = X_m \cdot \cos(\omega \cdot t + \varphi), \quad (8)$$

$$x_\beta(t) = X_m \cdot \sin(\omega \cdot t + \varphi). \quad (9)$$

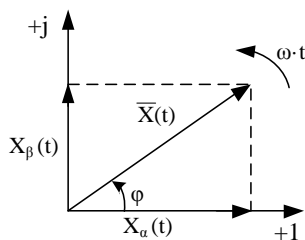


Рис. 2 Вектор $\bar{X}(t)$, представленный в комплексной плоскости

Тогда, выражение для $\bar{X}(t)$ может быть записано в следующем виде:

$$\begin{aligned} \bar{X}(t) &= x_\alpha(t) + j \cdot x_\beta(t) = X_m \cdot e^{j(\omega \cdot t + \varphi)} = \\ &= X_m \cdot \cos(\omega \cdot t + \varphi) + j \cdot X_m \cdot \sin(\omega \cdot t + \varphi). \end{aligned} \quad (10)$$

Определим мгновенные комплексные значения вектора (10) на основе двух мгновенных значений (рис.3), взятых через время h , порядка одной миллисекунды, соответствующее углам менее 20° , и который не требует определения амплитудного значения X_m , так как амплитуду измеряемого сигнала можно принять неизменной на интервале времени h .

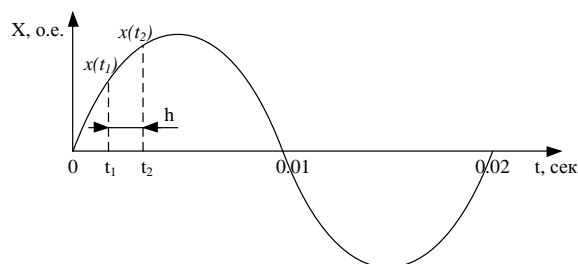


Рис. 3 Измерение мгновенных значений

Обозначим через $x(t_1)$ мгновенное значение измеряемой величины на предыдущем шаге, а через $x(t_2)$ на текущем шаге. Предположим, что $x(t_1)$ и $x(t_2)$ являются проекциями соответствующего вектора комплексного действующего значения на реальную ось в комплексной плоскости, тогда:

$$x_\alpha(t_1) = X_m \cdot \cos(\omega \cdot t_1 + \varphi) = x(t_1), \quad (11)$$

$$x_\alpha(t_2) = X_m \cdot \cos(\omega \cdot t_2 + \varphi) = x(t_2). \quad (12)$$

Для определения проекции вектора на мнимую ось выразим $x_\alpha(t_2)$ через $x_\alpha(t_1)$ с учётом того, что $t_2 = t_1 + h$:

$$\begin{aligned} x_\alpha(t_2) &= X_m \cdot \cos(\omega \cdot t_1 + \varphi + \omega \cdot h) = \\ &= X_m \cdot \cos(\omega \cdot t_1 + \varphi) \cdot \cos(\omega \cdot h) - \\ &- X_m \cdot \sin(\omega \cdot t_1 + \varphi) \cdot \sin(\omega \cdot h). \end{aligned} \quad (13)$$

Подставив из (11) в выражение (13) вместо $X_m \cdot \cos(\omega \cdot t_1 + \varphi)$, измеренное на предыдущем шаге значение $x_\alpha(t_1)$, получим:

$$\begin{aligned} x_\alpha(t_2) &= x_\alpha(t_1) \cdot \cos(\omega \cdot h) - \\ &- X_m \cdot \sin(\omega \cdot t_1 + \varphi) \cdot \sin(\omega \cdot h). \end{aligned} \quad (14)$$

Из выражения (14) найдём синусную составляющую вектора $x_\beta(t_1)$ как:

$$\begin{aligned} x_\beta(t_1) &= X_m \cdot \sin(\omega \cdot t_1 + \varphi) = \\ &= \frac{x_\alpha(t_1) \cdot \cos(\omega \cdot h) - x_\alpha(t_2)}{\sin(\omega \cdot h)}. \end{aligned} \quad (15)$$

Зная косинусную (11) и синусную (15) составляющие вектор комплексного действующего значения можно представить в виде:

$$\begin{aligned}\bar{X}(t) &= X_m \cos(\omega \cdot t + \varphi) + jX_m \sin(\omega \cdot t + \varphi) = \\ &= x_\alpha(t_1) + j \frac{x_\alpha(t_1) \cos(\omega \cdot h) - x_\alpha(t_2)}{\sin(\omega \cdot h)}.\end{aligned}\quad (16)$$

Определив по (16) для всех трех фаз комплексы векторов мгновенных значений токов или напряжений, подставим их в (1) и (2) и, после преобразования, получим мгновенные значения комплексов прямой и обратной последовательностей:

$$\bar{X}_{PP}(t) = \frac{1}{2} \cdot [(x_\alpha^A - x_\beta^{BC}) + j \cdot (x_\beta^A + x_\alpha^{BC})], \quad (17)$$

$$\bar{X}_{OB}(t) = \frac{1}{2} \cdot [(x_\alpha^A + x_\beta^{BC}) + j \cdot (x_\beta^A - x_\alpha^{BC})], \quad (18)$$

$$\text{где: } x_\beta^{BC} = \frac{x_\beta^B - x_\beta^C}{\sqrt{3}}, \quad (19)$$

$$x_\alpha^{BC} = \frac{x_\alpha^B - x_\alpha^C}{\sqrt{3}}. \quad (20)$$

Амплитуды векторов прямой и обратной последовательностей найдём для момента времени $\tau = 0.5 \cdot (t_1 + t_2)$

$$|\bar{X}_{PP}(\tau)| = \frac{1}{2} \cdot \sqrt{(x_\alpha^A - x_\beta^{BC})^2 + (x_\beta^A + x_\alpha^{BC})^2}, \quad (21)$$

$$|\bar{X}_{OB}(\tau)| = \frac{1}{2} \cdot \sqrt{(x_\alpha^A + x_\beta^{BC})^2 + (x_\beta^A - x_\alpha^{BC})^2}. \quad (22)$$

Фазы векторов прямой и обратной последовательностей можно определить по формулам:

$$\varphi_{PP}(\tau) = \arccos \left[\frac{(x_\alpha^A - x_\beta^{BC})}{|\bar{X}_{PP}(\tau)|} \right] - \omega \cdot \tau, \quad (23)$$

$$\varphi_{OB}(\tau) = \arccos \left[\frac{(x_\alpha^A + x_\beta^{BC})}{|\bar{X}_{OB}(\tau)|} \right] - \omega \cdot \tau. \quad (24)$$

Коэффициент несимметрии тока или напряжения может быть определён по следующей формуле:

$$K_{HEC} = \frac{|\bar{X}_{OB}(\tau)|}{|\bar{X}_{PP}(\tau)|}. \quad (25)$$

Разработанный алгоритм позволяет получить мгновенные значения амплитуд и фаз прямой и обратной последовательностей на основе двух измеренных мгновенных фазных значений в режиме реального времени, а также определить угол между векторами тока и напряжения прямой (обратной) последовательностей, а следовательно и направление мощности по знаку косинуса этого угла:

$$\Delta \varphi_{PP}(\tau) = \varphi_{I_{PP}}(\tau) - \varphi_{U_{PP}}(\tau), \quad (26)$$

$$\Delta \varphi_{OB}(\tau) = \varphi_{I_{OB}}(\tau) - \varphi_{U_{OB}}(\tau). \quad (27)$$

Такой подход позволяет сократить время действия пускового органа БАВР на появление аварийного режима в питающей сети.

Приведем пример обеспечения успешного действия разработанного способа БАВР применительно к системе электроснабжения с двигательной нагрузкой (рис. 1), в которой используются трансформаторы Т1 и Т2 мощностью 16000 кВА, а к секциям подключены постоянная (мощностью 2 МВт) и двигательная нагрузки (асинхронный двигатель мощностью 4000 кВт и синхронный двигатель 10000 кВт). Разработанное устройство БАВР [9] включает в себя измерение напряжений и токов прямой последовательности и определение углов между токами прямой последовательности основного и резервного источников питания и напряжениями прямой последовательности основного и резервного источников питания. Логическая схема работы такого устройства БАВР представлена на рис.4.

Приведем результаты моделирования возникшего двухфазного короткого замыкания в точке К1 (рис. 1) и переключения питания секции, потерявшей питание вследствие короткого замыкания, с помощью устройства БАВР на резервный источник. Короткое замыкание возникло в момент времени $t_1=2,3$ с, отключение вводного выключателя секции происходит в момент времени $t_2=2,39$ с, а включение секционного выключателя в момент времени $t_3.=2,49$ с.

Результаты моделирования были получены с помощью математической модели, в которой трансформаторы и двигатели были описаны полными дифференциальными уравнениями, а логическая часть была записана в соответствии с рис. 4.

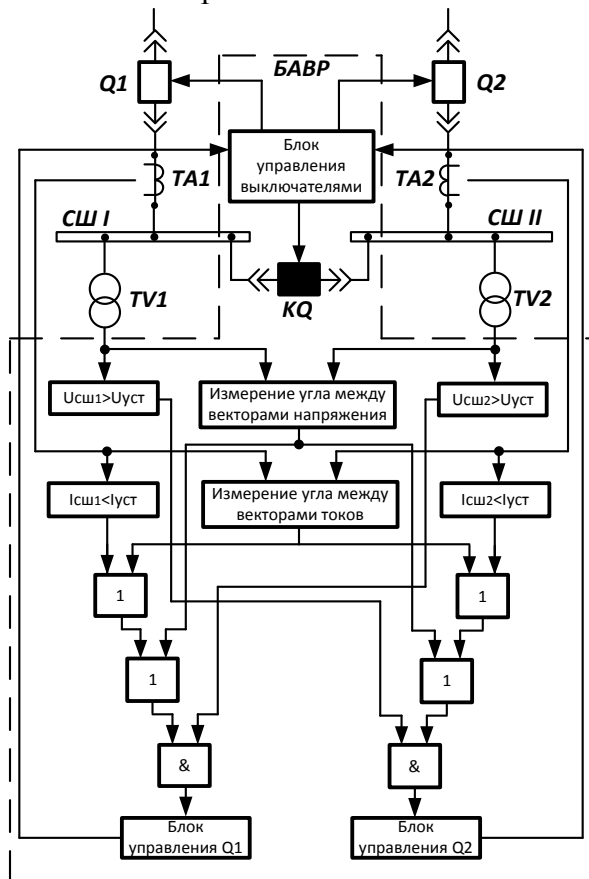


Рис. 4. Логическая схема устройства БАПР

На рис. 5 – рис. 9 приведены графики изменения токов на вводах секций СШ I и СШ II (рис 1.), напряжений на секциях, а также скорости вращения роторов асинхронного и синхронного двигателей. На рис. 10 – рис. 14 приведены графики изменения токов прямой последовательности на вводе секции и угла между ними и напряжения прямой последовательности на секциях. В качестве коммутационного аппарата выбраны вакуумные выключатели ВВ/TEL – 6 (10). Полное время отключения выключателя, согласно [10], принято 0.07 с, а время включения 0.1 с. Время реакции пускового органа БАПР, реагирующего на фазовый сдвиг между токами прямой последовательности на вводах секций (рис. 14), составило 0.02 с. Таким образом, цикл переключения на резервный источник питания составил 0.19 с.

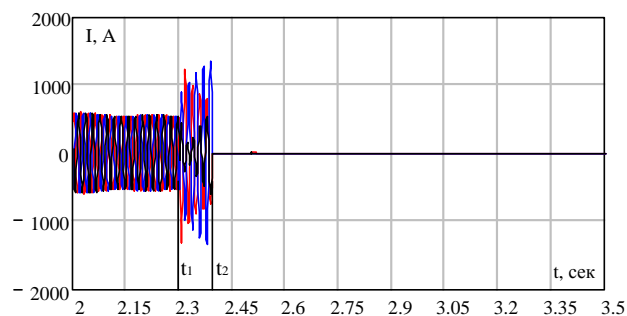


Рис. 5. График изменения токов на вводе СШ I

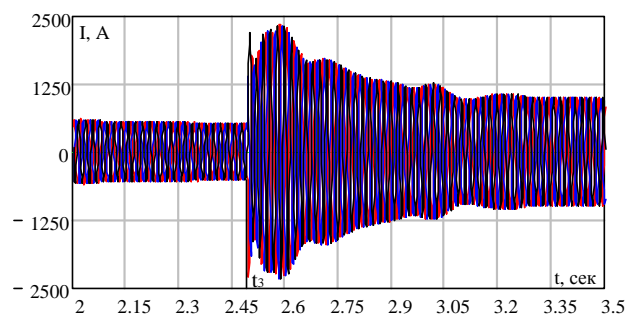


Рис. 6. График изменения токов на вводе СШ II

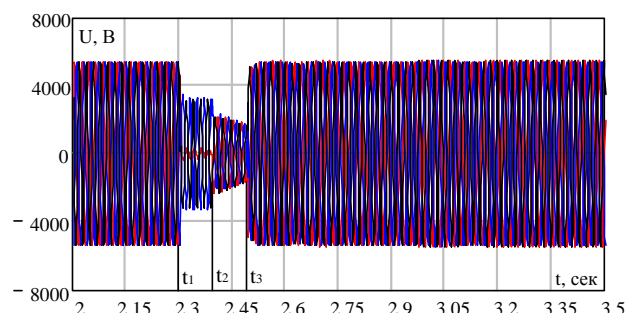


Рис. 7. График изменения напряжений на СШ I

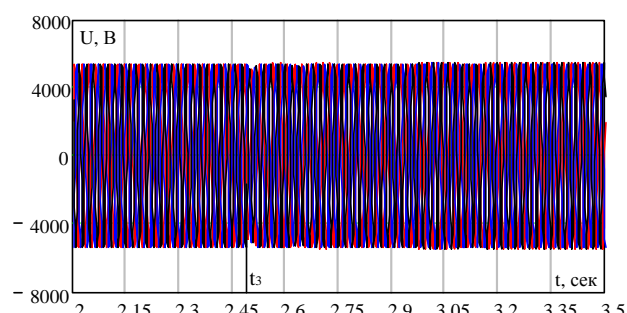


Рис. 8. График изменения напряжений на СШ II

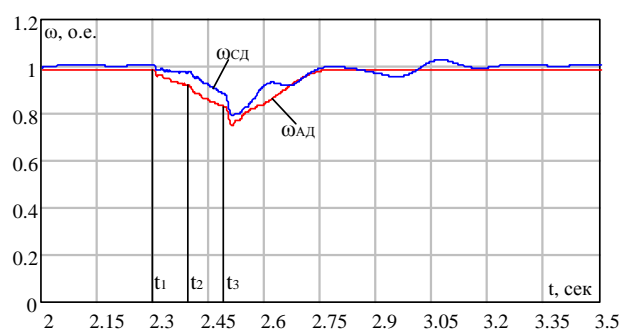


Рис. 9. График изменения скорости вращения ротора асинхронного и синхронного двигателей

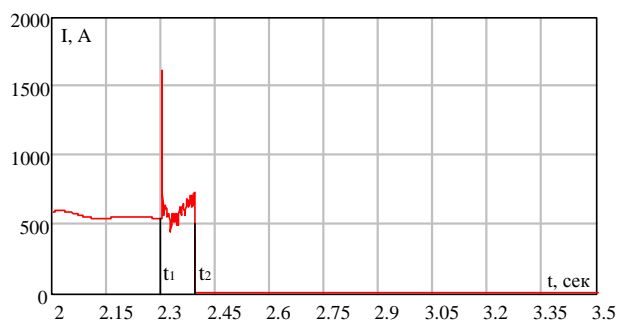


Рис. 10. График изменения токов ПП СШ I

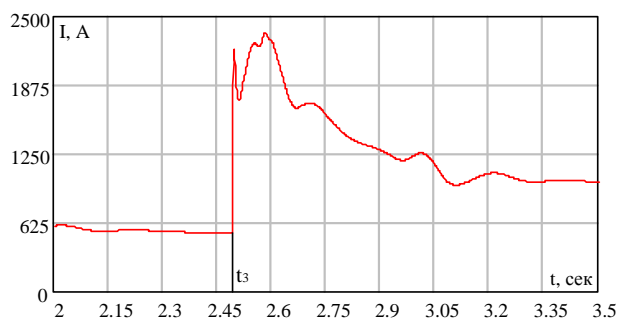


Рис. 11. График изменения токов ПП СШ II

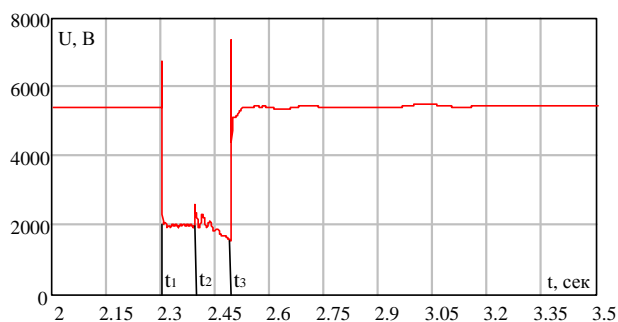


Рис. 12. График изменения напряжений ПП на СШ I

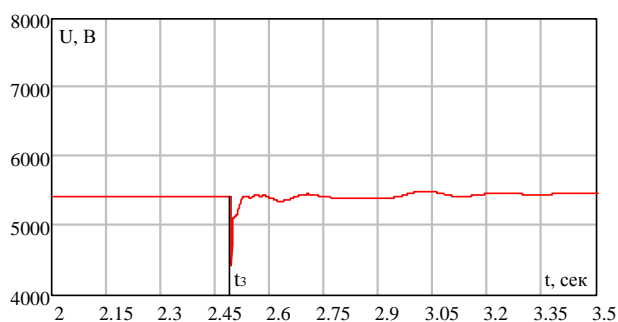


Рис. 13. График изменения напряжений ПП на СШ II

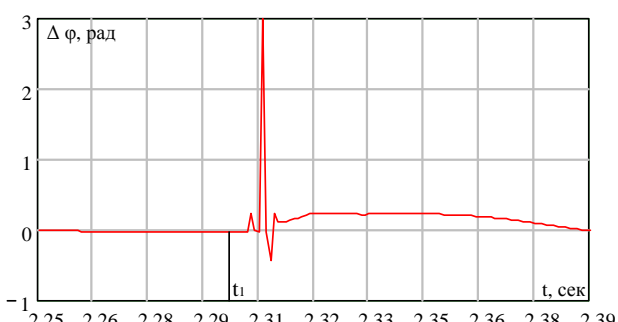


Рис. 14. График изменения угла между токами ПП

Таким образом, ускоренное действие БАВР достигается при внешних коротких замыканиях за счёт контроля фазового сдвига между векторами токов прямой последовательности на вводах секций, питающихся от основного и резервного источников питания, а при потере питания за счет контроля фазового сдвига между векторами напряжений прямой последовательности на секциях, что позволяет обеспечить успешный самозапуск электродвигателей.

Разработан способ определения мгновенных комплексных значений токов (напряжений) прямой и обратной последовательностей по двум значениям сигнала, измеренным через 1 миллисекунду. При этом выходные значения амплитуд и фаз векторов представлены в виде постоянных сигналов в режиме реального времени.

Результатами моделирования подтверждена эффективность разработанного БАВР в системах электроснабжения с синхронными и асинхронными двигателями

ЛИТЕРАТУРА

1. Гребченко Н.В. Совершенствование быстродействующего АВР в системах электроснабжения с синхронными двигателями: дис. кандидата технических наук: 05.14.02 / Гребченко Николай Васильевич. – Д., 1985. – 237 с.
2. Слодарж М.И. Режимы работы, релейная защита и автоматика синхронных электродвигателей / М. И. Слодарж. – М.: Энергия, 1977. – 216 с.
3. Киреева Э. Современные устройства быстродействующего АВР / Э. Киреева, В. Пупин, Д. Гумиров // Главный энергетик. – 2005. - № 11. – С.23 – 25.
4. Никулов И. Комплекс БАВР Быстродействие повышает надёжность электроснабжения / И. Никулов, В. Жуков, В. Пупин // Новости электротехники. – 2012. - №4. – С. 2 – 4.
5. Патент на изобретение 2326481(13) С1, Российская федерация, МПК H02J 9/06 Способ автоматического включения резервного электропитания потребителей и устройство для его

- осуществления / Цырук С.А., Гамазин С.И., Пупин В.М., Козлов В.Н., Павлов А.О.; заявитель и правообладатель Государственное образовательное учреждение высшего профессионального образования "Московский энергетический институт (технический университет)" (ГОУВПО "МЭИ(ТУ)"). - № 2006139086/09; заявка 07.11.2006; опубл. 07.11.2006
6. Патент на изобретение 2447565(13) С1, Российская федерация, МПК H02J 9/00 Способ автоматического включения резервного электропитания потребителей и устройство для его осуществления / Гамазин С.И., Жуков В. А., Куликов А.И., Пупин В.М., Цырук С.А.; заявитель и правообладатель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования "Национальный исследовательский университет "МЭИ" (ФГБОУ ВПО "НИУ МЭИ"). - № 2011105886/07; заявка 17.02.2011; опубл. 17.02.2011.
7. Бессонов Л. А. Теоретические основы электротехники / Л. А. Бессонов. – М.: Высшая школа, 1996. – 638 с.
8. Шнеерсон Э.М. Цифровая релейная защита / Э. М. Шнеерсон. – М.: Энергоатомиздат, 2007. – 549 с.
9. Патент на полезную модель 80430, Украина МПК8 H02J 9/00., Способ автоматического включения резервного электропитания потребителей / Сивокобыленко В.Ф., Деркачев С.В.; заявитель и правообладатель ГВУЗ «Донецкий национальный технический университет»; заявка u201214451; опубл. 27.05.2013.
10. Эксплуатация вакуумных выключателей ВВ/TEL-6(10) // [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://forca.ru/instrukcii-ro-ekspluatacii/podstancii/ekspluataciya-vakuumnyh-vyklyuchatelei-bb/tel-610.html>

Сивокобыленко В.Ф.¹, Деркачев С. В.²

¹ Д-р техн. наук, професор, завідувач кафедри «Електричні станції» Донецький національний технічний університет, Україна

² Аспірант, Донецький національний технічний університет, Україна

СПОСІБ ПІДВИЩЕННЯ ШВИДКОДІЇ ПУСКОВОГО ОРГАНУ АВТОМАТИЧНОГО ВКЛЮЧЕННЯ РЕЗЕРВА

Розглянуто спосіб підвищення надійності систем електропостачання з двигуновим навантаженням при короткочасних порушеннях електроживлення за рахунок вдосконалення пускових органів швидкодіючого АВР на основі запропонованого методу прискореного визначення комплексних миттєвих значень струмів та напруг прямої та зворотної послідовності. Наведено приклад успішної дії пристрою швидкодіючого АВР з використанням запропонованого підходу.

Ключові слова: швидкодіюче автоматичне включення резерву, двигунові навантаження, пусковий орган, пряма послідовність, зворотна послідовність

Sivokobilenko V.F.¹, Derkachov S.V.²

¹ Professor, Doctor of Technical Sciences, head of department «Electric stations» Donetsk National Technical University, Ukraine

² Postgraduate, Donetsk National Technical University, Ukraine

METHOD FOR INCREASING FAST-ACTING OF AUTOMATIC TRANSFER SWITCH

Considered the method for reliability increasing of electrical power supply system with motor load at short-time power failure by improvement of fast-acting ATS starting element based on introduced method of definition complex momentary value of direct and inverse sequences of currents and voltages. The example of the fast-acting ATS successful operation with using of the offered approach is given.

Keywords: fast-acting automatic transfer switch, motor load, starting element, direct sequence, inverse sequence.

REFERENCE

1. Grebchenko N.V. Sovershenstvovanie byistrodeystvuyushego AVR v sistemah elektrosnabzheniya s sinhronnyimi dvigatelyami: dis. kandidata tehnikeskikh nauk: 05.14.02 / Grebchenko Nikolay Vasilevich. – D., 1985. – 237 s.
2. Slodarzh M.I. Rezhimy raboty, reley'naya zaschita i avtomatika sinhronnykh elektrodvigateley / M. I. Slodarzh. – M.: Energiya, 1977. – 216 s.
3. Kireeva E. Sovremennyye ustroystva byistrodeystvuyushego AVR / E. Kireeva, V. Pupin, D. Gumirov // Glavnyy energetik. – 2005. - № 11. – S.23 – 25.
4. Nikulov I. Kompleks BAVR Byistrodeystvie povyishaet nad'yozhnost elektrosnabzheniya / I. Nikulov, V. Zhukov, V. Pupin // Novosti elektrotehniki. – 2012. - №4. – S. 2 – 4.
5. Patent na izobretenie 2326481(13) C1, Rossiyskaya federatsiya, MPK H02J 9/06 Sposob avtomaticheskogo vklyucheniya rezervnogo elektropitaniya potrebiteley i ustroystvo dlya ego osuschestvleniya / Tsyruk S.A., Gamazin S.I., Pupin V.M., Kozlov V.N., Pavlov A.O.; zayavitel i pravoobladatel Gosudarstvennoe obrazovatelnoe uchrezhdenie vyisshego professionalnogo obrazovaniya "Moskovskiy energeticheskiy institut (tehnikeskiy universitet)" (GOUVPO "MEI(TU)").-№2006139086/09; zayavka 07.11.2006; opubl. 07.11.2006.
6. Patent na izobretenie 2447565(13) S1, Rossiyskaya federatsiya, MPK H02J 9/06 Sposob avtomaticheskogo vklyucheniya rezervnogo elektropitaniya potrebiteley i ustroystvo dlya ego osuschestvleniya / Gamazin S.I., Zhukov V. A., Kulikov A.I., Pupin V.M., Tsyruk S.A.; zayavitel i pravoobladatel Federalnoe gosudarstvennoe byudzhethnoe obrazovatelnoe uchrezhdenie vyisshego professionalnogo obrazovaniya "Natsionalnyy issledovatel'skiy universitet "MEI" (FGBOU VPO "NIU MEI"). - № 2011105886/07; zayavka 17.02.2011; opubl. 17.02.2011.
7. Bessonov L. A. Teoreticheskie osnovy elektrotehniki / L. A. Bessonov. – M.: Vysshaya shkola, 1996. – 638 s.
8. Shneerson E.M. Tsifrovaya reley'naya zaschita / E. M. Shneerson. – M.: Energoatomizdat, 2007. – 549 s.
9. Patent na poleznuyu model 80430, Ukraina MPK8 N02J 9/00., Sposob avtomaticheskogo vklyucheniya rezervnogo elektropitaniya potrebiteley / Sivokobylenko V.F., Derkachev S.V.; zayavitel i pravoobladatel GVUZ «Donetskiy natsionalnyy tehnikeskiy universitet»; zayavka u201214451; opubl. 27.05.2013.
10. Ekspluatatsiya vakuumnykh vyklyuchateley BB/TEL-6(10) // [Elektronnyy resurs]. Rezhim dostupa: <http://forca.ru/instrukcii-po-ekspluatatsii/podstancii/ekspluatatsiya-vakuumnykh-vyklyuchatelei-bb/tel-610.html>