

УДК 519.233.22

Функциональные особенности построения вакуумного коммутационного аппарата синхронного действия*

Е.В. ПРОХОРЕНКО

630073, РФ, г. Новосибирск, пр. Карла Маркса, 20, Новосибирский государственный технический университет, кандидат технических наук, доцент. E-mail: prokhorenko@corp.nstu.ru

В работе рассматриваются принципы построения модели электромеханического фазного модуля синхронного вакуумного коммутационного аппарата как объекта управления и его конструктивных особенностей при влиянии внешних факторов на динамику работы аппарата. Анализируются принципы построения системы управления в виде распределенной структуры и централизованной САУ. Структура вакуумного коммутационного аппарата как объекта управления рассматривается на основе оригинальных конструкций фазных модулей с вакуумной дугогасительной камерой и электромагнитным приводом прямого действия в его составе. Устройство фазного модуля позволяет на его основе строить системы с различным количеством коммутируемых фаз и их различным пространственным положением. Рассматриваются функциональные схемы системы автоматического управления коммутационным аппаратом синхронного действия централизованного и распределенного типа. Описывается математическая модель электромеханической системы фазного модуля оригинальной конструкции с целью постановки задачи распределенного управления, обеспечивающего механизм синхронизации моментов коммутации объекта, воздействий внешних возмущений, в том числе механического износа системы.

Ключевые слова: синхронный вакуумный коммутационный аппарат, структура фазного модуля, модель фазного модуля, электромагнитный привод прямого действия, централизованная система управления, распределенная система управления, механический износ, синхронная коммутация

DOI: 10.17212/1814-1196-2017-1-169-178

ВВЕДЕНИЕ

Важным этапом построения адекватной математической модели физического объекта синхронного вакуумного коммутационного аппарата является выбор принципов построения его электромеханической части, обеспечивающей возможность реализации алгоритмов синхронной коммутации при реализации системы автоматического управления фазными модулями. При этом

* Статья получена 01 ноября 2016 г.

особенно важно обеспечить динамические характеристики системы [1–3, 6–8] с необходимой точностью в силу того, что механизмы синхронизации при коммутации в вакууме в области средних напряжений работают с упреждающим воздействием по предыдущим значениям, т. е. являются так называемыми экстраполяторами. В известных моделях не учитывается [4, 5] влияние внешних факторов, таких как механический износ и температура. Особенно важно при построении адекватной модели такого рода механизмов учитывать внешние воздействия, приводящие к изменению их параметров.

1. СХЕМА ПОСТРОЕНИЯ ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКОЙ ЧАСТИ КАК ОБЪЕКТА УПРАВЛЕНИЯ

Для постановки задачи синтеза системы автоматического управления вакуумным выключателем синхронного действия целесообразно рассмотреть особенности конструкции аппарата и особенности функционирования его электромеханической системы. При синхронной коммутации реализуется принцип независимой пофазной компоновки, при которой допускается как однофазная, так и многофазная работа аппарата с различным пространственным положением фазных полюсов. Примером этого может быть несколько схем его практического использования в различных электротехнических установках (рис. 1).

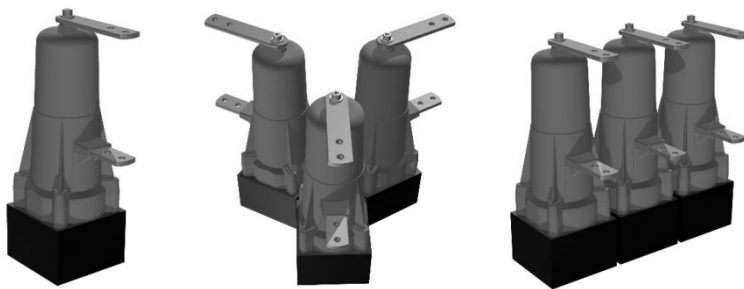


Рис. 1. Примеры пространственного положения фазных полюсов коммутационного аппарата

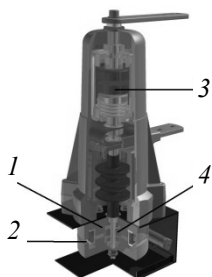


Рис. 2. Фазный модуль в разрезе с приводом прямого действия:

1 – привод; 2 – магнитный зазор-состояние «отключено»; 3 – вакуумная дугогасительная камера; 4 – пружинный узел поджатия/отключения

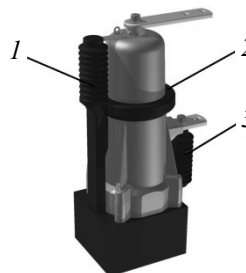
Фазный модуль представляет собой электромагнитный привод прямого действия, расположенный соосно тяговому изолятору и вакуумной дугогасительной камере (ВДК) (рис. 2). При этом привод приводит в действие главные контакты ВДК и фиксирует их в замкнутом состоянии. Отключение происходит с помощью пружины отключения при снятии напряжения с обмоток

привода либо при подаче на них импульса обратной полярности в случае привода с магнитной защелкой.

Датчики главных цепей тока и напряжения в некоторых случаях возможно интегрировать в конструкцию для обеспечения минимальных массо-габаритных показателей (рис. 3).

Рис. 3. Пример интеграции датчиков тока и напряжения в фазный модуль вакуумного коммутационного аппарата:

1, 3 – датчики напряжения главной цепи;
2 – датчик тока главной цепи



В соответствии с вышеизложенными особенностями конструкции аппарата как объекта управления функциональную схему можно представить в общем виде двумя вариантами:

- 1) распределенная система управления независимых фазных модулей, функционирующих независимо друг от друга, но объединенных в одно пространство управления;
- 2) централизованная многоканальная система управления.

2. ФУНКЦИОНАЛЬНАЯ СХЕМА СИСТЕМЫ АВТОМАТИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ КОММУТАЦИОННЫМ АППАРАТОМ СИНХРОННОГО ДЕЙСТВИЯ

Для формирования систем управления многополюсным коммутационным аппаратом предложена система, функциональная схема которой представлена на рис. 4.

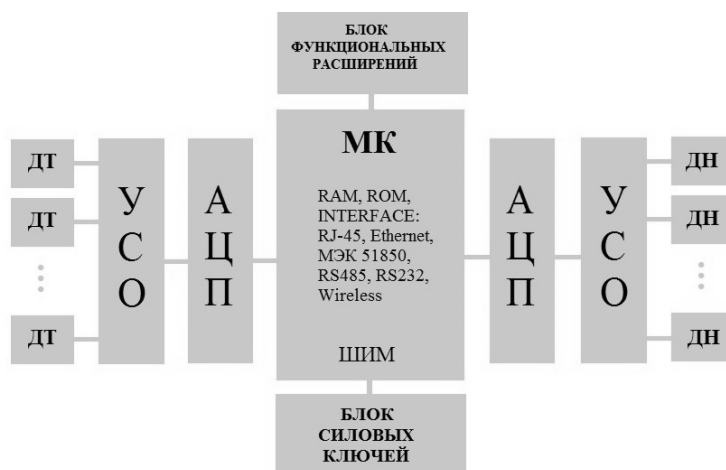


Рис. 4. Функциональная схема централизованной системы управления многополюсным выключателем синхронного действия

Здесь на основе анализа существующих решений систем управления вакуумными коммутационными аппаратами, в том числе синхронного действия [10–19], представлен многополюсный вариант САУ с дополнительными функциональными блоками. Необходимо отметить, что впервые предложен вариант крейтовой системы автоматического управления вакуумного выключателя с отличительными особенностями функциональных узлов, а именно: микроконтроллерный блок (МК) имеет отличие в том, что вместе со стандартным ШИМ-контроллером функционирует множество интерфейсов, в частности беспроводной (Wireless), классический Ethernet, промышленный интерфейс RS485 с протоколом Modbus RTU и интерфейс «цифровых подстанций», построенный по стандартам МЭК 61850. Это позволяет легко интегрировать САУ в цифровые системы с дальнейшим перспективным развитием распределенной системы автоматического управления подстанционными присоединениями в режиме синхронизма с главными цепями тока и напряжения объектов электроэнергетики, таких как распределительные подстанций, газопоршневые и газотурбинные генерирующие установки, многообмоточные печные трансформаторы и т. д. В качестве первичных измерителей токов ДТ и напряжений ДН в зависимости от динамических диапазонов и решаемых задач используются различные типы датчиков (датчики Холла, трансформаторные, Роговского). Крейтовая система позволяет использовать тот тип устройства сопряжения с объектом УСО, который необходим при работе с соответствующим датчиком. Система аналого-цифрового преобразования АЦП содержит необходимое количество каналов преобразования для необходимого количества датчиков многополюсного выключателя. **Блок функциональных расширений** позволяет интегрировать САУ в различные схемы вторичной коммутации, взаимодействовать с различными типами релейных защит и в частном случае реализовывать дополнительные функции цифровых, аналоговых и дискретных входов и выходов, визуализации, необходимых для интегрированной реализации алгоритмов релейной защиты и автоматики в решении «цифровых подстанций». **Блок силовых ключей** содержит необходимое количество каналов управления электромагнитными приводами прямого действия, в типовом случае их три.

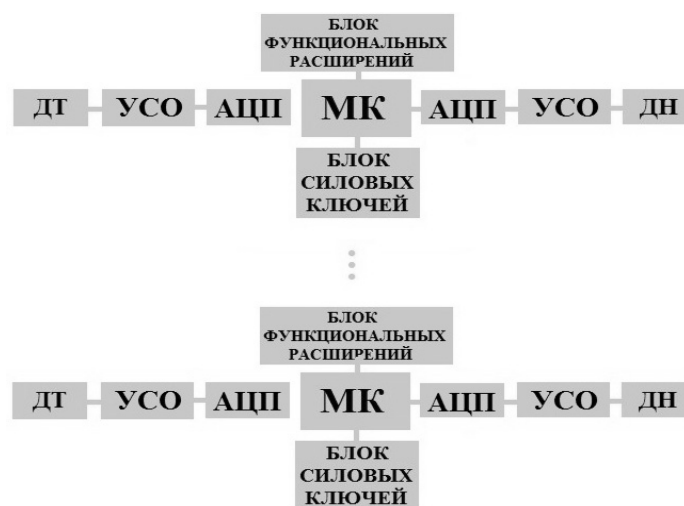


Рис. 5. Структурная схема распределенной системы управления многополюсным выключателем синхронного действия

На рис. 5 представлена структурная схема распределенной системы управления многополюсным выключателем синхронного действия. В ней присутствуют типовые узлы системы: ДТ, УСО, АЦП, МК, блок силовых ключей и блок функциональных расширений. Каждый блок системы имеет микропроцессорный модуль управления с интерфейсными связями.

3. МОДЕЛЬ ФАЗНОГО МОДУЛЯ СИНХРОННОГО ВАКУУМНОГО КОММУТАЦИОННОГО АППАРАТА

При анализе циклов работы коммутационного аппарата выявлены следующие основные участки кривой t_i перемещения главных контактов фазного модуля выключателя $S(t)$.

1. Участок включения с выделенным на нем временем трогания t_{tr} , временем движения подвижного контакта главной цепи t_{0-1} и временем, характерным для переходных процессов во время ударных воздействий при замыкании электромагнитного привода прямого действия и главной контактной группы выключателя t_{1-2} .

2. Участок удержания во включенном состоянии t_{2-3} .

3. Участок выключения, характеризуемый временем перемещения главной контактной группы в положение «отключено» t_{4-5} и временем движения контактной группы в положение «отключено» t_{5-6} .

4. Участок удержания в отключенном состоянии t_{off} .

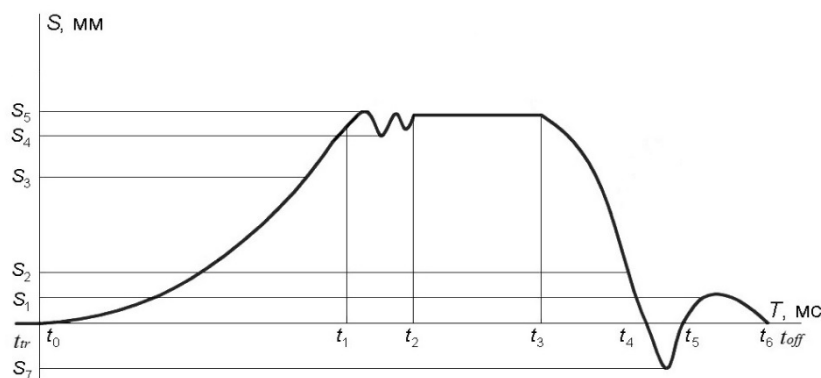


Рис. 6. Циклограмма работы фазного модуля вакуумного выключателя с приводом прямого действия

Необходимым фактором для обеспечения синхронизации коммутационного аппарата с сетью являются моменты времени перехода через «ноль» тока и напряжения главной цепи. В действительности процесс коммутации главной контактной группы коммутационного аппарата должен осуществляться в окрестности этих переходов с точностью 300 мкс. При времени собственного срабатывания выключателя на включение 30 мс, на отключение 10 мс очевидно, что при промышленной частоте 50 Гц процесс коммутации осуществляется по интерполированным (предсказанным) моментам времени синхронизации [3]. Это делает достаточно актуальной точность прогнозирования динамики электромеханической системы в зависимости от различных факторов внешних возмущений. К внешним возмущениям целесообразно

относить следующие факторы M_i , характеризующие соответствующими коэффициентами:

- 1) температура внешней среды T_{oe} ;
- 2) температура обмоточных структур T_{ws} ;
- 3) механический износ контактной группы $J_{cg}(n, i)$, где n – число циклов коммутации, i – амплитудное значение тока главной цепи в момент коммутации;
- 4) механический износ привода $J_d(n)$;
- 5) электромагнитные помехи через индуктивные и емкостные связи V_{ic} , имеющие, как правило, импульсный характер и случайную природу.

В результате модель может быть записана следующим образом:

$$\begin{cases} \frac{di}{dt} = \left[(U(t) + V_{ic}) - i(t)R(T_{ws}) - \frac{\partial \Psi(i, \delta)}{\partial \delta} \frac{d\delta}{dt} \right] / \left[\frac{\partial \Psi(i, \delta)}{\partial i} \right], \\ \frac{d^2 \delta}{dt^2} = (F_\delta(i, \delta) + F_{в.к} - F_{тр}(T_{oe}) - J_d(n) - F_{упр} - F_T - F_{доп}) / m, \\ \delta = \delta_0 + J_{cg}(n, i), \\ n. \end{cases}$$

В представленной модели функции потокоцепления $\Psi(i, \delta)$ и электромагнитного усилия. Здесь влияние вихревого тока в предложенной модели не учитывается; $U(t)$ – напряжение обмотки электромагнитного привода, В; $i(t)$ – ток обмотки, А; R – активное сопротивление обмотки, Ом; $F_{тр}$ – сила трения, Н; $F_{доп}$ – дополнительная сила воздействия на якорь, Н; $F_{упр}$ – характеристика усилия возвратной пружины; $F_{в.к}$ – постоянное усилие, действующее на подвижный контакт вакуумной дугогасительной камеры, Н; F_T – сила тяжести, Н; m – масса подвижных частей, кг; δ – величина зазора, мм; n – число циклов включения/отключения.

Модель в системе Mathlab, представленная на рис. 7–9, исследована в работах [1, 3] и дополнена блоком внешних возмущений. Это позволяет максимально точно описать реальный физический объект в виде имитационной модели. Динамические характеристики фазного модуля представлены на рис. 9 и 10.

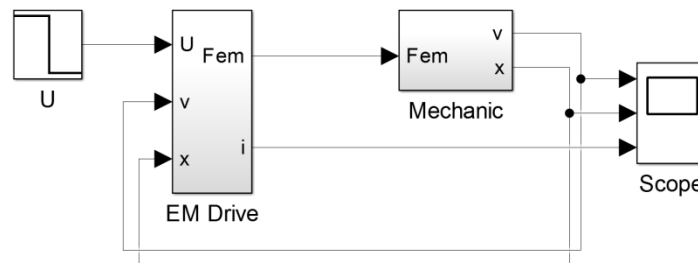


Рис. 7. Модель электромеханической системы фазного модуля

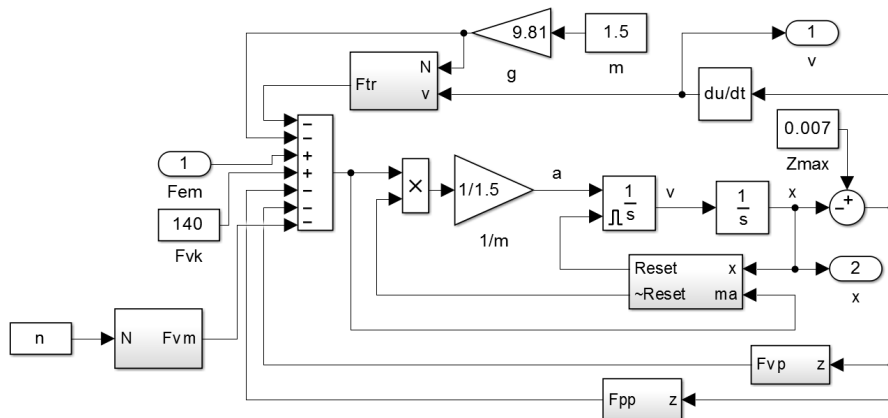


Рис. 8. Часть модели описывающая механическое состояние системы

В части модели, описывающей механическое состояние системы, добавлен блок внешних возмущений с параметром количества срабатываний N . На рис. 9 и 10 представлены зависимости тока $i(t)$ обмоток электромагнита и кривой перемещения подвижных контактов главной цепи фазного модуля $x(t)$ в зависимости от величины параметра N .

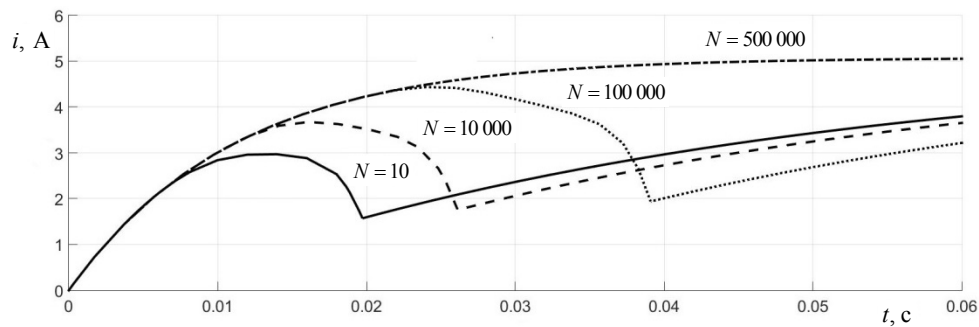


Рис. 9. Результаты моделирования кривой тока в обмотках привода фазного модуля

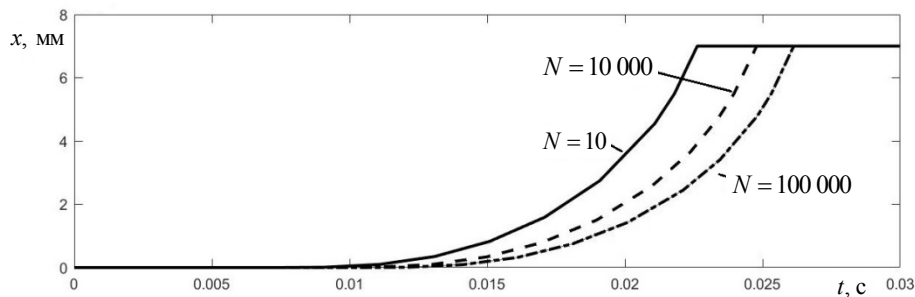


Рис. 10. Результаты моделирования кривой перемещения подвижных контактов главной цепи фазного модуля

Блок внешних возмущений, введенный в имитационную модель, оказывает достаточно большое влияние на динамику процессов коммутации главной контактной группы фазного модуля вакуумного выключателя. На прак-

тике результат моделирования можно использовать в прогнозировании ресурса электромеханической части вакуумного коммутационного аппарата, это улучшит эксплуатационные показатели изделия в целом.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Прохоренко Е.В., Норбоев Б.Р. Разработка и исследование математической модели электромеханической системы синхронного вакуумного выключателя // Мехатроника, автоматизация, управление. – 2009. – № 12. – С. 25–29.
2. Прохоренко Е.В., Лебедев И.А. Исследование возможности создания вакуумного выключателя для синхронного отключения ненагруженных трансформаторов // Электро. – 2010. – № 3. – С. 40–44.
3. Shevtsov D., Pavluchenko D., Prohorenko E. The basic principles of controlled switching and synchronous vacuum circuit breaker application in local distribution network // Applied Mechanics and Materials. – 2015. – Vol. 698: Electrical Engineering, Energy, Mechanical Engineering – EEM. – P. 743–748.
4. Патент 2432635 Российская Федерация. Синхронный вакуумный коммутационный аппарат / Е.В. Прохоренко, И.А. Лебедева, С.И. Одокиенко. – № 2010121938/07; заявл. 28.05.2010; опубл. 27.10.2011, Бюл. № 30.
5. Патент 133969 Российская Федерация. Вакуумный выключатель / Е.В. Прохоренко, С.И. Одокиенко, Б.Р. Норбоев. – № 2013122317/07; заявл. 14.05.2013; опубл. 27.10.2013, Бюл. № 30.
6. Гордон А.В., Сливинская А.Г. Электромагниты постоянного тока. – М.: Энергоиздат, 1960. – 448 с.
7. Yuan K., Chen S.A. New algorithm for coupled solutions of electric, magnetic, and mechanical system in dynamic simulation of solenoid actuators // IEEE Transactions on Magnetics. – 1990. – Vol. MAG-26, N 3. – P. 1189–1197.
8. Чалый А.М. Создавая новые стандарты электрооборудования // Новости электротехники. – 2006. – № 2.
9. Вакуумные дуги: теория и приложения: пер. с англ. / под ред. Дж. Лафферти. – М.: Мир, 1982. – 432 с.
10. Белкин Г.С. Применение самоуправляемых аппаратов (аппаратов, обладающих «интеллектом») для коммутации цепей высокого напряжения // Электротехника. – 2005. – № 12. – С. 5–9.
11. Ma S., Cai Z., Wang J. Research on synchronous breaking technology of vacuum circuit breaker // 23rd International Symposium on Discharges and Electrical Insulation in Vacuum. – Bucharest, 2008. – Vol. 1. – P. 161–164.
12. Synchronous controlled switching by vacuum circuit breaker (VCB) with electromagnetic operation mechanism / K. Horinouchi, M. Tsukima, N. Tohya, T. Inoue, H. Sasao // Proceedings of the 2004 IEEE International Conference on Electric Utility Deregulation, Restructuring and Power Technologies. – Hong Kong, 2004. – P. 529–534.
13. Optimizing weighted kernel function for support vector machine by genetic algorithm / H.-N. Nguyen, S.-Y. Ohn, S.-H. Chae, D.H. Song, I. Lee // MICAI 2006: Advances in Artificial Intelligence. – Berlin; Heidelberg: Springer, 2006. – P. 583–592. – (Lecture Notes in Computer Science; vol. 4293).
14. Controlled switching of HVAC circuit-breakers. Guide for application lines, reactors, capacitors, transformers / CIGRE WG 13.07 // Electra. – 1999. – N 183. – P. 43–73; 1999. – N 185. – P. 37–57.
15. Controlled switching of HVAC circuit-breakers. Planning, specification and testing of controlled switching systems / CIGRE WG 13.07 // Electra. – 2001. – N 197. – P. 23.
16. Controlled switching of HVAC circuit-breakers. Benefits of controlled / CIGRE WG A3.07 // Electra. – 2004. – N 217. – P. 37.
17. Controlled switching of HVAC circuit-breakers. Guidance for further application including unloaded transformer switching, load and fault interruption and circuit-breaker uprating / CIGRE WG A3.07. – [S. l.]: CIGRE, 2004. – 55 p. – (Technical Brochure; 263).
18. Fang C.-E., Zhou C.-M., Zou J.-Y. Statistical characteristic analysis and self-adaptation control of synchronous circuit breaker // High Voltage Apparatus. – 2006. – Vol. 42 (3). – P. 183–185.

19. Development of 550 kV and 362 kV synchronous switching gas circuit breakers / H. Kohyama, K. Wada, H. Ito, M. Hidaka, S. Billings, T. Sugiyama, H. Yamamoto // 2001 IEEE/PES Transmission and Distribution Conference and Exposition. – Atlanta, Georgia, 2001. – Vol. 2. – P. 597–602.

Прохоренко Евгений Валерьевич, кандидат технических наук, заведующий кафедрой систем сбора и обработки данных Новосибирского государственного технического университета. Основное направление научных исследований – синтез систем управления. Имеет более 30 публикаций, в том числе 5 патентов. E-mail: prokhorenko@corp.nstu.ru

Functional features of designing a vacuum switching unit of synchronous action

E.V. PROKHORENKO

Novosibirsk State Technical University, 20, K. Marx Prospekt, Novosibirsk, 630073, Russian Federation, K. Sc. (Eng.), head of the Department. E-mail: prokhorenko@corp.nstu.ru

In this work the principles of constructing models of an electromechanical single-phase synchronous module of a vacuum switching unit as a control object and its structural characteristics under the influence of external factors on the dynamics of the unit are presented. The construction principles of the control system in the form of distributed and centralized structures are analyzed. The vacuum structure of a switching unit as an object of control is considered based on original designs of phase modules with a vacuum-arc chute and an electromagnetic drive of direct action in its structure. The device phase module allows building on its basis systems with various numbers of switched phases and their various spatial positions. Functional schemes of the automatic system of control by the switching unit of synchronous action of the centralized and distributed types are studied. A mathematical model of an electromechanical single-phase system module of an original design is described to set the task of distributed control providing synchronization mechanisms of object switching moments and the impacts of external disturbances including mechanical wear system.

Keywords: simultaneous vacuum switching unit, phase structure of the module, phase module module, electromagnetic drive of direct action, centralized control system, distributed control system, mechanical wear, synchronous switching

DOI: 10.17212/1814-1196-2017-1-169-178

REFERENCES

1. Prokhorenko E.V., Norboev B.R. Razrabotka i issledovanie matematicheskoi modeli elektromekhanicheskoi sistemy sinkhronnogo vakuumnogo vyklyuchatelya [Design and research of mathematical model of synchronous vacuum circuit-breaker electromechanical system]. *Mekhatronika, avtomatizatsiya, upravlenie – Mechatronics, Automation, Control*, 2009, no. 12, pp. 25–29.
2. Прохоренко Е.В., Лебедев И.А. Исследование возможности создания вакуумного выключателя для синхронного отключения ненагруженных трансформаторов [Study on the possibility of creating a vacuum switch for simultaneous disconnection of unloaded transformer]. *Электро. Электротехника, электроэнергетика, электротехническая промышленность – Elektro. Elektrotehnika, elektroenergetika, elektrotehnicheskaya promyshlennost'*, 2010, no. 3, pp. 40–44.
3. Shevtsov D., Pavluchenko D., Prohorenko E. The basic principles of controlled switching and synchronous vacuum circuit breaker application in local distribution network. *Applied Mechanics*

* Received 10 February 2017.

and Materials, 2015, vol. 698. Electrical Engineering, Energy, Mechanical Engineering – EEM 2014, pp. 743–748.

4. Prokhorenko E.V., Lebedeva I.A., Odokienko S.I. *Sinkhronnyi vakuumnyi kommutatsionnyi apparat* [Synchronous vacuum switching device]. Patent RF, no. 2432635, 2011.

5. Prokhorenko E.V., Odokienko S.I., Norboev B.R. *Vakuumnyi vyklyuchatel'* [Vacuum switch]. Patent RF, no. 133969, 2013.

6. Gordon A.V., Slivinskaya A.G. *Elektromagnitny postoyannogo toka* [Direct current solenoids]. Moscow, Energoizdat Publ., 1960. 448 p.

7. Yuan K., Chen S.A. New algorithm for coupled solutions of electric, magnetic, and mechanical system in dynamic simulation of solenoid actuators. *IEEE Transactions on Magnetics*, 1990, vol. MAG-26, no. 3, pp. 1189–1197.

8. Chalyi A.M. Sozdavaya novye standarty elektrooborudovaniya [Creating new standards of electrical equipment]. *Novosti elektrotehniki – The News of Electrical Engineering*, 2006, no. 2.

9. Lafferty J.M., ed. *Vacuum arcs: theory and application*. New York, Wiley, 1980 (Russ. ed.: *Vakuumnye dugi: teoriya i prilozheniya*. Translated from English. Moscow, Mir Publ., 1982. 432 p.).

10. Belkin G.S. Primenenie samoupravlyaemykh apparatov (apparats, obladayushchikh "intellektom") dlya kommutatsii tsepei vysokogo napryazheniya [Smart systems in switching high-voltage circuits]. *Elektrotehnika – Russian Electrical Engineering*, 2005, no. 12, pp. 5–9. (In Russian)

11. Ma S., Cai Z., Wang J. Research on synchronous breaking technology of vacuum circuit breaker. *23rd International Symposium on Discharges and Electrical Insulation in Vacuum*, Bucharest, 2008, vol. 1, pp. 161–164.

12. Horinouchi K., Tsukima M., Tohya N., Inoue T., Sasao H. Synchronous controlled switching by vacuum circuit breaker (VCB) with electromagnetic operation mechanism. *Proceedings of the 2004 IEEE International Conference on Electric Utility Deregulation, Restructuring and Power Technologies*, Hong Kong, 2004, pp. 529–534.

13. Nguyen H.-N., Ohn S.-Y., Chae S.-H., Song D.H., Lee I. Optimizing weighted kernel function for support vector machine by genetic algorithm. *MICAI 2006: Advances in Artificial Intelligence. Lecture Notes in Computer Science*. Berlin, Heidelberg, Springer, 2006, vol. 4293, pp. 583–592.

14. Controlled switching of HVAC circuit-breakers. Guide for application lines, reactors, capacitors, transformers. CIGRE WG 13.07. *Electra*, 1999, no. 183, pp. 43–73, 1999, no. 185, pp. 37–57.

15. Controlled switching of HVAC circuit-breakers. Planning, specification and testing of controlled switching systems. CIGRE WG 13.07. *Electra*, 2001, no. 197, p. 23.

16. Controlled switching of HVAC circuit-breakers. Benefits of controlled. CIGRE WG A3.07. *Electra*, 2004, no. 217, p. 37.

17. Controlled switching of HVAC circuit-breakers. Guidance for further application including unloaded transformer switching, load and fault interruption and circuit-breaker uprating. CIGRE WG A3.07. *Technical Brochure*, 263, 2004. 55 p.

18. Fang C.-E., Zhou C.-M., Zou J.-Y. Statistical characteristic analysis and self-adaptation control of synchronous circuit breaker. *High Voltage Apparatus*, 2006, vol. 42 (3), pp. 183–185.

19. Kohyama H., Wada K., Ito H., Hidaka M., Billings S., Sugiyama T., Yamamoto H. Development of 550 kV and 362 kV synchronous switching gas circuit breakers. *2001 IEEE/PES Transmission and Distribution Conference and Exposition*, Atlanta, Georgia, 2001, vol. 2, pp. 597–602.