

DOI: 10.15593/2224-9397/2021.1.07

УДК 621.313.323

М.Б. Лащенко, Ю.В. ШевырёвНациональный исследовательский технологический университет «МИСиС»,
Москва, Россия**ВЛИЯНИЕ СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ ВОЗБУЖДЕНИЕМ
СИНХРОННОГО ДВИГАТЕЛЯ НА САМОЗАПУСК
ПРИ КРАТКОВРЕМЕННОЙ ПОТЕРЕ ПИТАНИЯ**

В настоящее время на горных предприятиях нашли применение синхронные двигатели в системах электроприводов компрессорных, вентиляторных, насосных и других установок. В процессе эксплуатации синхронных двигателей возможны аварийные ситуации, обусловленные кратковременной потерей питания, что влияет на устойчивость нормального режима работы. Одним из эффективных путей решения обеспечения устойчивости и надежности работы электрооборудования при кратковременных потерях питания является применение самозапуска электродвигателей. **Цель исследования:** исследование влияния разных систем управления возбуждением синхронного двигателя на его самозапуск при кратковременной потере напряжения для условий электроснабжения горных предприятий. **Методы:** исследование переходных процессов выполнены посредством моделирования блоков в среде Simulink математического пакета MatLab. **Результаты:** показано, что с увеличением времени срабатывания защиты и длины линии электропередачи от подстанции до синхронного двигателя возрастает время, необходимое двигателю для восстановления нормального режима работы, что может привести к выпадению синхронного двигателя из синхронизма. Установлено, что при наличии системы регулирования возбуждения по реактивной мощности требуется большее время для восстановления нормального режима работы синхронного двигателя в сравнении со случаем применения контура регулирования по току возбуждения. В отличие от синхронного электродвигателя с системой регулирования по току возбуждения синхронный электродвигатель с системой регулирования по реактивной мощности при максимальном времени перерыва питания не выпадает из синхронизма. **Практическая значимость:** заключается в использовании результатов исследований при проектировании систем электроснабжения и возможности существенно снизить неопределенность при принятии решения о применении синхронного электродвигателя для конкретных условий эксплуатации.

Ключевые слова: самозапуск, синхронный двигатель, синхронизм, длина питающей линии, система управления возбуждением, асинхронный пуск.

M.B. Lashchenov, Yu.V. Shevyrev

National University of Science and Technology MISIS, Moscow, Russian Federation

INFLUENCE OF SYNCHRONOUS MOTOR EXCITATION CONTROL SYSTEMS ON SELF-STARTING IN CASE OF SHORT-TERM POWER LOSS

Currently, at mining enterprises, synchronous motors are used in the systems of electric drives for compressor, fan, pumping and other installations. During the operation of synchronous motors, emergency situations are possible due to a short-term loss of power, which affects the stability of the normal operation. One of the effective solutions to ensure the stability and reliability of the operation of electrical equipment with short-term power losses is the use of self-starting of electric motors. **Purpose:** investigation of the influence of different control systems for the excitation of a synchronous motor on its self-start with a short-term voltage loss for the conditions of power supply of mining enterprises. **Methods:** the study of transient processes was carried out by modeling blocks in the Simulink environment of the MatLab mathematical package. **Results:** it's shown that with an increase in the protection response time and the length of the power transmission line from the substation to the synchronous motor, the time required for the motor to restore normal operation increases, which can lead to the synchronous motor falling out of synchronism. It was found that in the presence of a system for controlling excitation by reactive power, it takes more time to restore the normal operation of a synchronous motor in comparison with the case of using an excitation current control loop. In contrast to a synchronous electric motor with a field current control system, a synchronous electric motor with a reactive power control system does not fall out of synchronicity at the maximum power interruption time. **Practical relevance:** is the use of research results in the design of power supply systems and the ability to significantly reduce the uncertainty when deciding on the use of a synchronous electric motor for specific operating conditions.

Keywords: self-starting, synchronous motor, synchronism, feed line length, excitation control system, asynchronous start.

Введение

Сегодня на крупных горных предприятиях в процессе проектирования систем электроснабжения инженеры вынуждены сталкиваться с исследованием не только статических режимов работы электродвигателей, но и переходных. В процессе эксплуатации асинхронных (АД) и синхронных (СД) двигателей на крупных горных предприятиях может нарушаться устойчивость их нормального режима работы. Чтобы обеспечить их устойчивость в случае ответственных электроустановок при кратковременной потере напряжения питания применяется *самозапуск электродвигателей* [1].

Несмотря на большое количество публикаций по данной тематике, их анализ показал, что исследования самозапуска электродвигателей не потеряли своей актуальности [2–10, 12, 15–17, 19–22].

В данной статье рассмотрен процесс группового самозапуска СД, подключенных к смежным шинам с двумя источниками питания. В выполненном ранее исследовании [11] рассмотрен самозапуск толь-

ко с применением асинхронного пуска, без учета управления системой возбуждения СД. Новизна исследований в данной работе обусловлена тем, что в развитие работы [11] здесь рассмотрено влияние на процесс самозапуска СД длины и сопротивления линии электропередачи (ЛЭП), а также системы управления возбуждением СД.

Целью проведенных исследований является комплексная оценка влияния вышеуказанных параметров на качество переходных процессов. Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи: оценить влияние системы управления возбуждением СД на восстановление нормального режима работы СД; оценить влияние времени срабатывания защиты и длины ЛЭП на восстановление нормального режима работы СД. В качестве объекта исследования был взят явнополусный СД типа СДН 14-44-10У3 ($P_{\text{ном}} = 630$ кВт, $U_{\text{ном}} = 6$ кВ, $\cos\varphi_{\text{ном}} = 0,9$), который распространен на крупных горных предприятиях как привод вентилятора главного проветривания.

1. Модель синхронного двигателя

В данной статье задача моделирования систем электропривода с синхронным двигателями реализуется в среде Simulink математического пакета MatLab [13, 14, 18]. Подробно все допущения рассмотрены в работе [11]. В табл. 1 [23, 24] приведены необходимые параметры модели, полученные на основании паспортных данных явнополусного двигателя типа СДН 14-44-10У3.

Таблица 1

Параметры модели СДН 14-44-10У3

Обозначение параметра	Название параметра	Значение параметра
$U_{\text{ном}}$	Номинальное напряжение двигателя	6 кВ
$S_{\text{ном}}$	Номинальная полная мощность двигателя	700 кВА
$\cos\varphi_{\text{ном}}$	Коэффициент мощности двигателя	0,9
x_d	Синхронное индуктивное сопротивление по продольной оси	0,94 о.е
x_q	Синхронное индуктивное сопротивление по поперечной оси	0,63 о.е
x''_d	Сверхпереходное индуктивное сопротивление по продольной оси	0,3 о.е
x''_q	Сверхпереходное индуктивное сопротивление по поперечной оси	0,28 о.е
T'_{d0}	Переходная постоянная времени при разомкнутой обмотке статора	0,72 с
T''_{d0}	Сверхпереходная постоянная времени при замкнутой обмотке статора	0,37 с
R_a	Активное сопротивление статора	0,026 о.е
L_{kd}	Индуктивность рассеяния демпферной обмотки по оси d	0,188 о.е
L_{kq}	Индуктивность рассеяния демпферной обмотки по оси q	0,104 о.е
L_f	Индуктивность рассеяния обмотки возбуждения	0,37 о.е
R_f	Активное сопротивление обмотки возбуждения	0,22 о.е

2. Модели систем управления возбуждением синхронного двигателя

Исследование работ систем управления возбуждением показало, что встроенные модели статических систем возбуждения генераторов в среде Simulink имеют ряд недостатков [25, 26]. В связи с этим было принято решение реализовать следующие модели систем возбуждения в среде Simulink: одноконтурная система регулирования тока возбуждения СД и двухконтурная система регулирования реактивной мощности СД. Для реализации систем регулирования по току возбуждения и реактивной мощности в моделях применены блоки PID Controller, которые обеспечивают автоматическую настройку параметров соответствующего регулятора. Посредством блока PID Controller возможна реализация PID, PI, PD, P и I-регуляторов.

Реализация модели системы электроснабжения с синхронными двигателями и контурами регулирования тока возбуждения в среде Simulink представлена на рис. 1 и 2. В состав схемы контура регулирования тока возбуждения входят следующие блоки: тиристорный возбудитель W_{Π} с коэффициентом усиления 30 и постоянной времени, равной 0,01 с.; пропорционально-интегральный регулятор тока возбуждения W_{PI} ; блок задания тока возбуждения Vf Source.

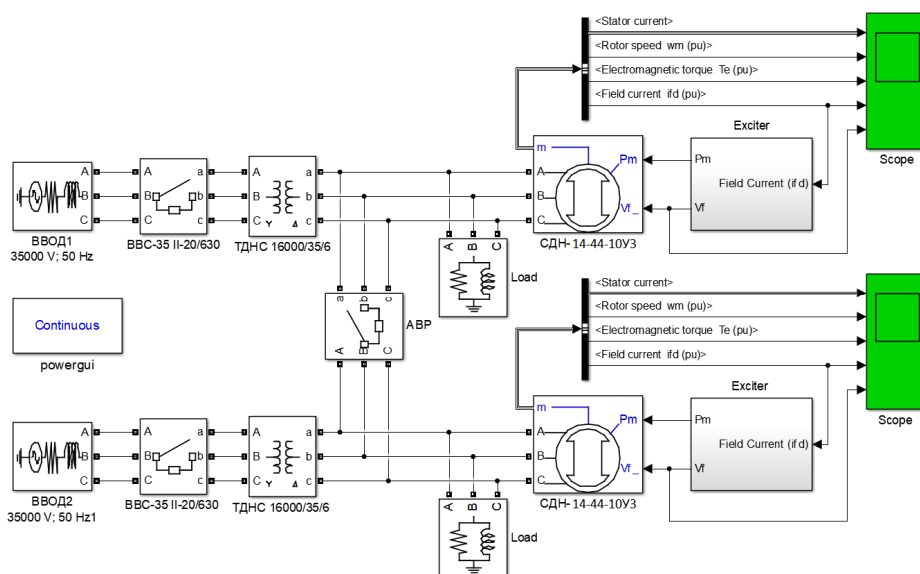


Рис. 1. Модель системы электроснабжения с синхронными двигателями, содержащими контуры регулирования тока возбуждения

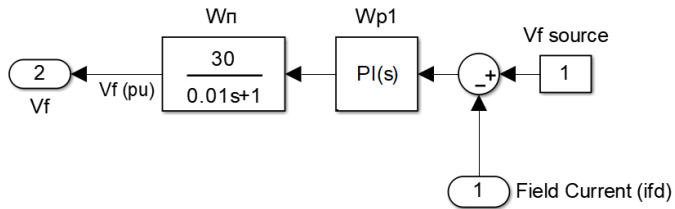


Рис. 2. Модель системы регулирования тока возбуждения

Реализация модели системы электроснабжения и контура регулирования реактивной мощности в среде Simulink представлена на рис. 3 и 4.

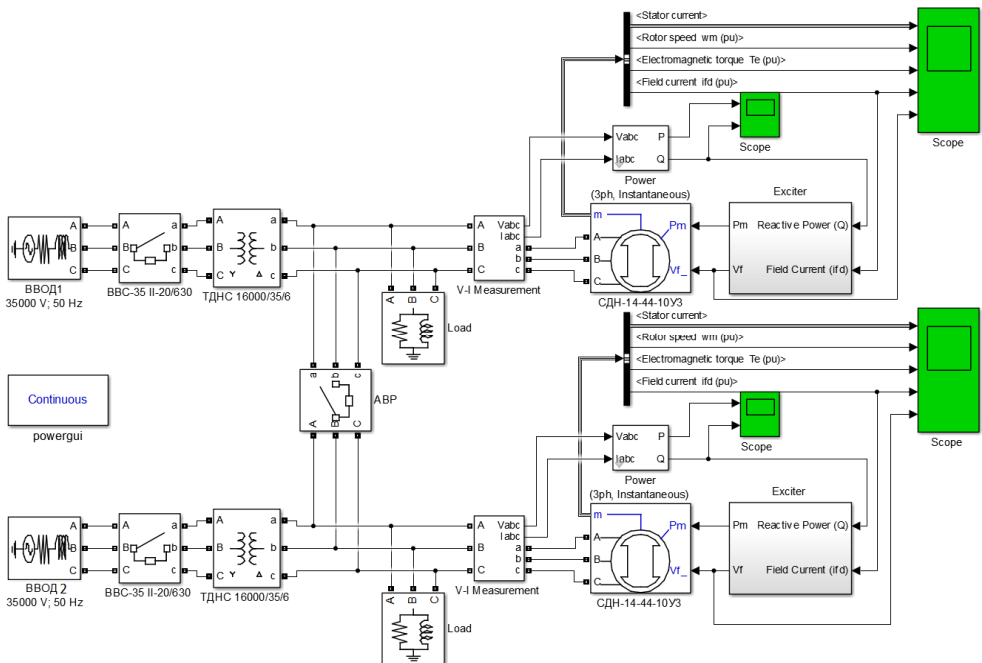


Рис. 3. Модель системы электроснабжения с синхронными двигателями, содержащими контуры регулирования реактивной мощности

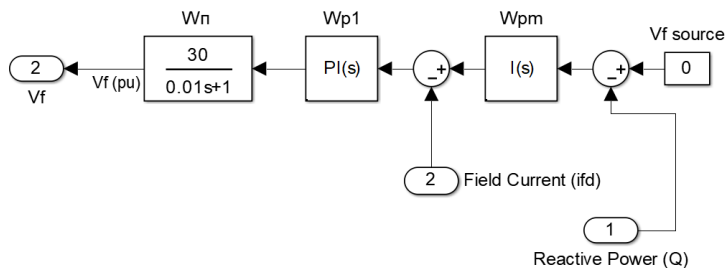


Рис. 4. Модель системы регулирования реактивной мощности

Система регулирования реактивной мощности СД выполнена двухконтурной с подчинённым регулированием координат. Внутренним контуром является контур регулирования тока возбуждения, аналогичный приведённому на рис. 2. Внешним контуром является контур регулирования реактивной мощности СД, включающий в себя I-регулятор реактивной мощности $W_{\text{рм}}$. Задание реактивной мощности осуществляется при помощи блока задания Vf Source.

Обобщенная модель системы электроснабжения горного предприятия включает в себя следующие элементы (см. рис. 1–3): трехфазные источники питания напряжением 35 кВ, представленные блоками ВВОД 1 и ВВОД 2 и реализуемые с помощью блоков Three-Phase Source; высоковольтные выключатели, представленные блоками BBC-35 II-20/630 и АВР, которые реализуются с помощью блоков Three-Phase Breaker; силовые трансформаторы представленные блоками ТДНС-16000/35/6 и реализуемые с помощью блоков Three-Phase Transformer (Two Widing); нагрузка на шинах 6 кВ, представленная блоками Load и реализуемая с помощью блоков Three-Phase Series RLC Load; измерительные приборы, представленные блоками Three-Phase V-I Measurment; осциллографы, представленные блоками Scope; явнополюсные СД, представленные элементами СДН-14-44-10У3, являющиеся блоками Synchronous Machine; блоки Exciter, которые являются блоками систем управления возбуждением.

3. Исследование самозапуска СД при потере питания

Исследование самозапуска СД рассмотрено на примере аварийного отключения одного из источников питания вследствие аварии на подстанции (ВВОД 2) и переводе всей нагрузки на другой ввод (ВВОД 1).

Кратковременная потеря напряжения реализуется следующим образом: ВВОД 2 обесточивается после начала работы СД на номинальной скорости с помощью блока BBC-35 II-20/630 соответствующей линии, время срабатывания АВР и длина ЛЭП задаются различным для результатов исследования. При исследовании режима самозапуска на модели задаются следующие времена срабатывания защиты (АВР): $t_{\text{ср1}} = 0,1$ с, $t_{\text{ср2}} = 0,3$ с, $t_{\text{ср3}} = 0,5$ с и длины линии электропередачи: $l_1 = 5$ км, $l_2 = 10$ км, $l_3 = 20$ км.

Для удобства анализа переходных процессов величины на графиках заданы в о.е. За базисные значения приняты: номинальное напря-

жение внешнего электроснабжения $U_{\text{ном}} = 35$ кВ, ток статора $I_{\text{ном}} = 67$ А, скорость двигателя $n_{\text{ном}} = 250$ об/мин.

Результаты экспериментов приведены в табл. 2. Анализ результатов опытов при наличии контура регулятора по току возбуждения показывает, что с увеличением времени срабатывания защиты от 0,1 до 0,3 с и длины ЛЭП время выхода СД на номинальную скорость после восстановления питания возрастает более чем 27 %, а при увеличении времени до 0,5 с наблюдается нарушение устойчивости.

Анализ результатов в случае применения системы регулирования реактивной мощности, приведённой в табл. 2, показывает, что с увеличением времени срабатывания защиты от 0,1 до 0,5 с и длины ЛЭП время выхода СД на номинальную скорость после восстановления питания возрастает на 24 %, но нарушения устойчивости не наблюдается при $t_{\text{срз}} = 0,5$ с. Из табл. 2 видно, что с увеличением длины ЛЭП время, необходимое для восстановления режима работы СД, увеличивается в среднем на 4 % независимо от регулятора возбуждения.

Таблица 2

Анализ результатов самозапуска

№ п/п	$t_{\text{сп}}^1$	l^2	СВ ³	Нарушение устойчивости	$T_{\text{ном}}^4$
1	0,1	5	РТВ	Нет	2,81
2	0,1	10	РТВ	Нет	2,93
3	0,1	20	РТВ	Нет	3,05
4	0,3	5	РТВ	Нет	3,37
5	0,3	10	РТВ	Нет	3,49
6	0,3	20	РТВ	Нет	3,57
7	0,5	5	РТВ	Да	–
8	0,5	10	РТВ	Да	–
9	0,5	20	РТВ	Да	–
10	0,1	5	РРВ	Нет	4,11
11	0,1	10	РРВ	Нет	4,24
12	0,1	20	РРВ	Нет	4,37
13	0,3	5	РРВ	Нет	4,68
14	0,3	10	РРВ	Нет	4,75
15	0,3	20	РРВ	Нет	4,82
16	0,5	5	РРВ	Нет	4,9
17	0,5	10	РРВ	Нет	5
18	0,5	20	РРВ	Нет	5,1

Примечание:

- 1) время восстановления питания, с;
- 2) длина ЛЭП, км;
- 3) система возбуждения (РТВ – регулятор тока возбуждения, РРВ – регулятор реактивной мощности);
- 4) время, за которое двигатель выходит на номинальную скорость после восстановления питания, с.

На основании полученных данных можно сделать вывод, что в случае применения системы регулирования по реактивной мощности по сравнению с применением системы регулирования по току возбуждения требуется большее время, необходимое двигателю для восстановления нормального режима работы, в среднем на 40 %. Причём при перерывах питания, равных 0,5 с и более, не зафиксировано выпадения СД из синхронизма с системой регулирования по реактивной мощности в сравнении с СД и системой регулирования по току возбуждения.

На рис. 5 и 6 приведены графики переходных процессов частоты вращения ротора и тока статора СД при наличии контура регулирования тока возбуждения для $t_{cp2} = 0,3$ с и $l_2 = 10$ км.

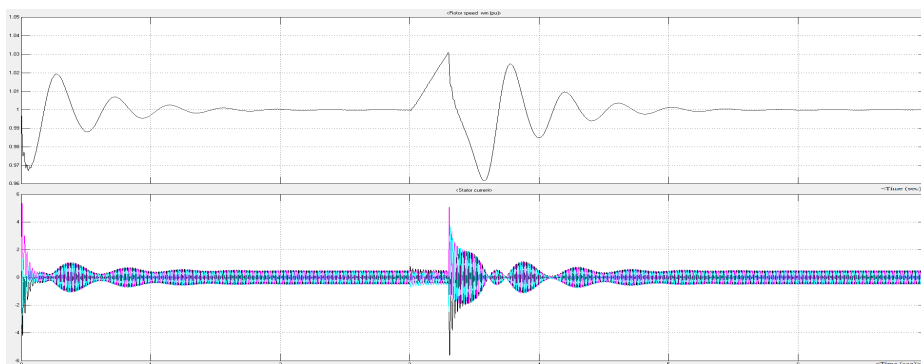


Рис. 5. Графики изменения частоты вращения ротора и тока статора при $t_{cp2} = 0,3$ с и $l_2 = 10$ км для системы регулирования тока возбуждения

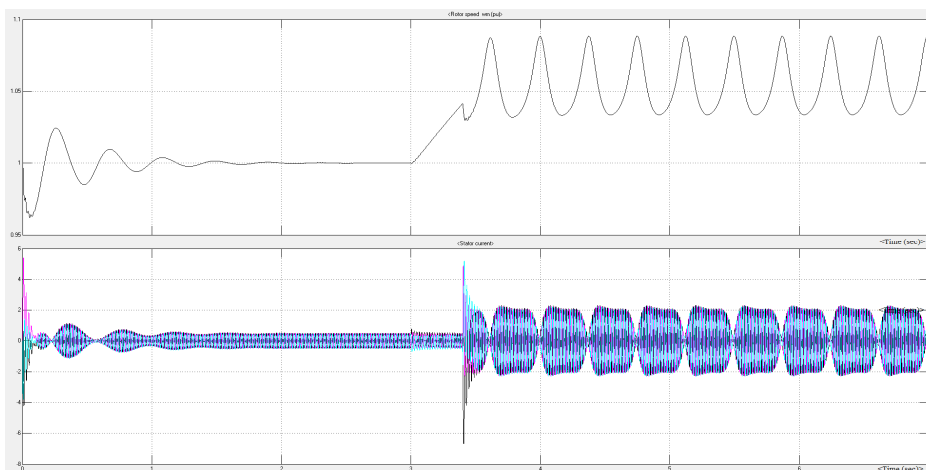


Рис. 6. Графики изменения частоты вращения ротора и тока статора при $t_{cp3} = 0,5$ с и $l_2 = 10$ км для системы регулирования тока возбуждения

На рис. 7 приведены графики переходных процессов частоты вращения ротора и тока статора СД при наличии контура регулирования реактивной мощности СД для $t_{\text{ср}2} = 0,3$ с и $l_2 = 10$ км.

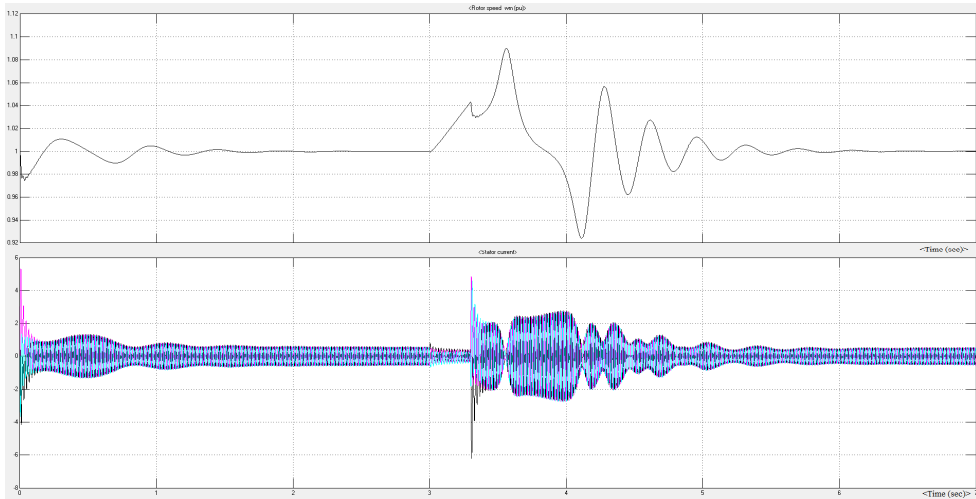


Рис. 7. Графики изменения частоты вращения ротора и тока статора при $t_{\text{ср}2} = 0,3$ с и $l_2 = 10$ км для системы регулирования реактивной мощности

На графиках приведены зависимости изменения частоты вращения ротора и тока статора от времени для следующих режимов: пуск СД, номинальный режим работы СД, самозапуск СД при кратковременной потере питания, установившийся режим.

Анализ графика изменения частоты вращения ротора и тока статора при наличии системы регулирования тока возбуждения (см. рис. 5) для заданных времен срабатывания защиты и длин линии электропередачи показывает, что при просадке напряжения питания существенно возрастает ток статора (более чем в 4 раза по сравнению с номинальным), а также имеет место просадка скорости СД.

При увеличении времени срабатывания защиты до 0,5 с двигатель не выходит на номинальную скорость и выпадает из синхронизма независимо от заданной длины ЛЭП (см. рис. 6).

Анализ переходных процессов при наличии системы регулирования реактивной мощности (см. рис. 7) для заданных времен срабатывания защиты и длин линии электропередачи показывает, что при просадке напряжения питания существенно возрастает ток статора, а также имеет место просадка скорости СД. Численные значения просадки

скорости СД в случае применения контура по реактивной мощности в среднем в 2 раза больше, чем с системой регулирования по току возбуждения.

Заключение

Практическая значимость данной работы заключается в том, что выполненные исследования направлены на повышение надежности работы синхронных электроприводов. Полученные результаты рекомендуется использовать при проектировании систем электроснабжения горных предприятий, что позволит снизить отрицательные последствия кратковременного перерыва питания для синхронных электродвигателей.

Основные выводы о проделанной работе:

1. С увеличением времени срабатывания защиты и длины ЛЭП от подстанции до СД возрастает время, необходимое двигателю для восстановления нормального режима работы, что, в свою очередь, при неконтролируемой ситуации может привести к выпадению СД из синхронизма.

2. Ток статора возрастает с увеличением времени срабатывания защиты. При отключении от сети одного или группы двигателей на шинах подстанции растет остаточная ЭДС, и при этом ток, протекающий при самозапуске СД, может превышать пусковой ток более чем в 4 раза.

3. Системе регулирования по реактивной мощности нужно больше времени для восстановления нормального режима работы СД, в среднем на 40 %, чем в случае применения контура регулирования по току возбуждения.

4. СД с системой регулирования по току возбуждения успевает выпасть из синхронизма при перерыве питания 0,5 с. В отличие от данного случая СД с системой регулирования по реактивной мощности при перерыве питания 0,5 с не выпадает из синхронизма.

Библиографический список

1. Лащенов М.Б. Влияние самозапуска мощных двигателей на систему электроснабжения // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2019. – №1. – С. 134–140.

2. Пупин В.М. Исследование режимов пуска и самозапуска электродвигательной нагрузки с целью обеспечения непрерывности технологических процессов // Промышленная энергетика. – 2006. – № 7. – С. 27–33.

3. Пупин В.М. Анализ провалов напряжения в питающих сетях предприятий и способы защиты электрооборудования // Электрооборудование: эксплуатация и ремонт. – 2011. – № 4. – С. 35–41.

4. Михалев С. В. Повышение устойчивости синхронных двигателей при кратковременной потере питания // Известия СПбГЭТУ «ЛЭТИ». – 2012. – № 10. – С. 62–68.

5. Кочетков В.В., Котенев В.И., Елькин Д.А. Математическая модель синхронного двигателя в электрической сети с нестабильным напряжением // Актуальные проблемы энергетики АПК: материалы VII Междунар. науч.-практ. конф. – 2016. – С. 105–106.

6. Жеребцов А.Л. Повышение устойчивости работы синхронных двигателей 6(10) кВ ГПА изменением способа управления тока возбуждения в послеаварийных режимах // Материалы заседания секции «Энергетика» НТС ПАО «Газпром». – 2018. – Ч. 2. – С. 27–32.

7. Степанов С.Е., Крюков О.В. Повышение устойчивости работы электроприводов центробежных нагнетателей на компрессорных станциях // Газовая промышленность. – 2014. – № 8. – С. 50–56.

8. Михалев С.В. Математическая модель для оценки устойчивости синхронных электродвигателей при кратковременной потере питания // Современное общество, образование и наука: сб. науч. тр. по материалам междунар. науч.-практ. конф. (31 июля 2013 г.). – Тамбов: Изд-во ТРОО «Бизнес-Наука-Общество». – 2013. – Ч. 5. – С. 99–103.

9. Пупин В.М., Егорова М.С. Электроснабжение Оскольского электрометаллургического комбината и повышение надежности электрообеспечения основных потребителей // Электрика. – 2008. – № 3. – С. 21–32.

10. Черных И.А., Шилов И.Г. Повышение устойчивости работы электродвигателей при провалах напряжения // Электрика. – 2006. – № 2. – С. 36–38.

11. Лащенов М.Б., Шевырев Ю.В. Исследование работы синхронного двигателя при кратковременной потере питания для условий горных предприятий // Вестник ЮУрГУ. Сер. Энергетика. – 2020. – № 1. – С. 116–122.

12. Simulation of Wound Rotor Synchronous Machine under Voltage Sag / D. Aguilar, G. Vazquez, A. Rolan, J. Rocabert, F. Corcoles // IEEE International Symposium on Industrial Electronics. – 2010. – P. 2626–2631.

13. Astrom Karl J. Advanced PID Control. – USA: ISA, 2006. – P. 446.

14. IEEE Std 421.5-2005. IEEE Recommended Practice for Excitation System. Models for Power System Stability Studies. – New-York: IEEE, 2006. – P. 85.

15. Using Phase Portraits / M. Babescu, O. Prostean, G. Prostean, I. Szeidert, C. Vasar // 6th International Conference on Electromechanical and Power Systems. – 2007.

16. Rotor Resistance Online Identification of Vector Controlled Induction Motor Based on Neural Network / B. Fan, Z. Yang, W. Xu, X. Wang // Mathematical Problems in Engineering. – 2014.

17. Boglietti A., Cavagino A., Ferrari L. Induction motor equivalent circuit including the stray load losses in the machine power balance // IEEE Transaction on Energy Conversion. – 2008. – Vol. 23. – P. 796–803.

18. Kiusalaas J. Numerical Methods in Engineering with Python. Cambridge University Press. New York. – 2010. – P. 434.

19. ANSI/IEEE Std 1547-2003 IEEE Standard for Interconnecting Distributed Resources with Electric Power Systems. – 2004.

20. Brown R.E., Hanson A.P., Willis H.L. Assessing the reliability of distribution networks // IEEE Computer Applications in Power Magazine. – 2001. – Vol. 1. – P. 44–49.

21. Charles J. Automatic High-Speed Transfer of Power Plant Auxiliary System Load – Theory and Application // Conference and Exposition in Africa. Durban, South Africa. – 2005. – P. 332–336.

22. Jantke K., Krumm R., Vieille R. High Speed Transfer System for optimized supply of energy // Elektrotechnik + Automation. – 2001. – Vol. 22. – P. 1–2.

23. Черных И.В. Моделирование электротехнических устройств в MatLab, SimPowerSystems и Simulink. – СПб.: Питер, 2007. – С. 11–34.

24. Брускин Д.Э. Электрические машины. Ч. 2. – М.: Высшая школа, 1987. – 130 с.

25. Гусев А.С. Адаптируемая математическая модель систем возбуждения синхронных машин // Известия Томск. политехн. ун-та. – 2005. – № 7. – С. 206–210.

26. Математические модели современных регуляторов возбуждения синхронных машин для расчета и анализа электромеханических переходных процессов и устойчивости энергосистем / Е.К. Лоханин, В.А. Глаголев, А.И. Скрынник [и др.] // Энергосистема: управление, конференция, образование: сб. докл. III Междунар. науч.-практ. конф. – 2008. – С. 257–262.

References

1. Lashchenov M.B. Vliianie samozapuska moshchnykh dvigatelei na sistemu elektrosnabzheniia [Influence of self-starting of powerful engines on the power supply system]. *Gornyi informatsionno-analiticheskii biulleten'*, 2019, no. 1, pp. 134-140.

2. Pupin V.M. Issledovanie rezhimov puska i samozapuska elektrodvigatel'noi nagruzki s tsel'iu obespecheniia nepreryvnosti tekhnologicheskikh protsessov [Research of modes of start-up and self-start of electric load for the purpose of ensuring continuity of technological processes]. *Promyshlennaia energetika*, 2006, no. 7, pp. 27-33.

3. Pupin V.M. Analiz provalov napriazheniia v pitaiushchikh setiakh predpriatii i sposoby zashchity elektrooborudovaniia [Analysis of voltage dips in the supply networks of enterprises and methods of protection of electrical equipment]. *Elektrooborudovanie: ekspluatatsiia i remont*, 2011, no. 4, pp. 35-41.

4. Mikhalev S.V. Povyshenie ustoichivosti sinkhronnykh dvigatelei pri kratkovremennoi potere pitaniia [Increasing the stability of synchronous motors in case of short-term power loss]. *Izvestiia Sankt-Peterburgskogo gosudarstvennogo elektrotekhnicheskogo universiteta "LETI"*, 2012, no. 10, pp. 62-68.

5. Kochetkov V.V., Kotenev V.I., El'kin D.A. Matematicheskaiia model' sinkhronnogo dvigatel'ia v elektricheskoi seti s nestabil'nym napriazheniem [Mathematical model of a synchronous motor in an electric network with unstable voltage]. *Aktual'nye problemy energetiki APK. Materialy VII Mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii*, 2016, pp. 105-106.

6. Zherebtsov A.L. Povyshenie ustoichivosti raboty sinkhronnykh dvigatelei 6(10) kV GPA izmeneniem sposoba upravleniia toka vzbuzhdeniia v posleavariinykh rezhimakh [Improving the stability of synchronous motors 6 (10) kV HPA by changing the method of controlling the excitation current in post-accident modes]. *Materialy zasedaniia seksii "Energetika" NTS PAO "Gazprom"*, 2018, part. 2, pp. 27-32.

7. Stepanov S.E., Kriukov O.V. Povyshenie ustoichivosti raboty elektroprivodov tsentrobezhnykh nagnetatelei na kompressornykh stantsiiakh [Improving the stability of centrifugal supercharger electric drives at compressor stations]. *Gazovaia promyshlennost'*, 2014, no. 8, pp. 50-56.

8. Mikhalev S.V. Matematicheskaja model' dlja otsenki ustoichivosti sinkhronnykh elektrodvigateli pri kratkovremennoi potere pitaniia [Mathematical model for assessing the stability of synchronous motors with short-term power loss]. *Sovremennoe obshchestvo, obrazovanie i nauka. Sbornik nauchnykh trudov po materialam mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii (31 July 2013)*. Tambov: TROO "Biznes-Nauka-Obshchestvo", 2013, part 3, pp. 99-103.

9. Pupin V.M., Egorova M.S. Elektrosnabzhenie Oskol'skogo elektrometallurgicheskogo kombinata i povysenie nadezhnosti elektroobespecheniia osnovnykh potrebiteli [Power supply of the Oskol electrometallurgical plant and increase of reliability of electric supply of the main consumers]. *Elektrika*, 2008, no. 3, pp. 21-32.

10. Chernykh I.A., Shilov I.G. Povysenie ustoichivosti raboty elektrodvigateli pri provalakh napriazheniia [Improving the stability of electric motors when voltage dips]. *Elektrika*, 2006, no. 2, pp. 36-38.

11. Lashchenov M.B., Shevyrev Iu.V. Issledovanie raboty sinkhronnogo dvigatelja pri kratkovremennoi potere pitaniia dlja uslovii gornyx predpriatii [Research of the Work of Synchronous Motor with a Short Power Loss]. *Vestnik Iuzhno-Ural'skogo gosudarstvennogo universiteta. Energetika*, 2020, no. 1, pp. 116-122.

12. Aguilar D., Vazquez G., Rolan A., Rocabert J., Corcoles F. Simulation of Wound Rotor Synchronous Machine under Voltage Sag. *IEEE International Symposium on Industrial Electronics*, 2010, pp. 2626-2631.

13. Astrom Karl J. Advanced PID Control. USA: ISA, 2006. 446 p.

14. IEEE Std 421.5-2005. IEEE Recommended Practice for Excitation System. Models for Power System Stability Studies. New-York: IEEE, 2006. 85 p.

15. Babescu M., Prostean O., Prostean G., Szeidert I., Vasar C. Using Phase Portraits. *6th International Conference on Electromechanical and Power Systems*, 2007.

16. Fan B., Yang Z., Xu W., Wang X. Rotor Resistance Online Identification of Vector Controlled Induction Motor Based on Neural Network. *Mathematical Problems in Engineering*, 2014.

17. Boglietti A., Cavagino A., Ferrari L. Induction motor equivalent circuit including the stray load losses in the machine power balance. *IEEE Transaction on Energy Conversion*, 2008, vol. 23, pp. 796-803.

18. Kiusalaas J. Numerical Methods in Engineering with Python. Cambridge University Press. New York, 2010, 434 p.

19. ANSI/IEEE Std 1547-2003 IEEE Standard for Interconnecting Distributed Resources with Electric Power Systems. – 2004.

20. Brown R.E., Hanson A.P., Willis H.L. Assessing the reliability of distribution networks. *IEEE Computer Applications in Power Magazine*, 2001, vol. 1, pp. 44-49.

21. Charles J. Automatic High-Speed Transfer of Power Plant Auxiliary System Load - Theory and Application. *Conference and Exposition in Africa*. Durban, South Africa, 2005, pp. 332-336.

22. Jantke K., Krumm R., Vieille R. High Speed Transfer System for optimized supply of energy. *Elektrotechnik + Automation*, 2001, vol. 22, pp. 1-2.

23. Chernykh I.V. Modelirovanie elektrotekhnicheskikh ustroystv v MatLab, SimPowerSystems i Simulink [Modeling of electrical devices in MatLab, SimPowerSystems and Simulink]. Saint Petersburg: Piter, 2007, pp. 11-34.

24. Bruskin D.E. Elektricheskie mashiny. Chast' 2 [Electrical machinery. Part 2]. Moscow: Vysshaya shkola, 1987, 130 p.

25. Gusev A.S. Adaptiruemaia matematicheskaya model' sistem vzbuzhdeniya sinkhronnykh mashin [Adaptable mathematical model of synchronous machine excitation systems]. *Izvestiya Tomskogo politekhnicheskogo universiteta*, 2005, no. 7, pp. 206-210.

26. Lokhanin E.K., Glagolev V.A., Skrynnik A.I. et al. Matematicheskie modeli sovremennykh regulirov vzbuzhdeniya sinkhronnykh mashin dlia rascheta i analiza elektromekhanicheskikh perekhodnykh protsessov i ustoychivosti energosistem [Mathematical models of modern synchronous machine excitation regulators for calculation and analysis of Electromechanical transients and stability of power systems]. *Energosistema: upravlenie, konferentsiya, obrazovanie. Sbornik dokladov III Mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii*, 2008, pp. 257-262.

Сведения об авторах

Лашенов Михаил Борисович (Москва, Россия) – аспирант кафедры «Энергетика и энергоэффективность горной промышленности» Национального исследовательского технологического университета «МИСиС» (Москва, e-mail: mixan9524@gmail.com).

Шевырёв Юрий Вадимович (Москва, Россия) – доктор технических наук, профессор, кафедры «Энергетика и энергоэффективность горной промышленности» Национального исследовательского технологического университета «МИСиС» (Москва, e-mail: uvshev@yandex.ru).

About the authors

Mikhail B. Lashchenov (Moscow, Russian Federation) – Graduate Student Department of Energy and Energy Efficiency of the Mining Industry, National University of Science and Technology MISIS (Moscow, e-mail: mixan9524@gmail.com).

Yuri V. Shevyrev (Moscow, Russian Federation) – Doctor of Technical Sciences, Professor, Department of Energy and Energy Efficiency of the Mining Industry, National University of Science and Technology MISIS (Moscow, e-mail: uvshev@yandex.ru).

Получено 18.11.2020