

ИССЛЕДОВАНИЕ И МОДЕЛИРОВАНИЕ АСИНХРОННОГО ГЕНЕРАТОРА СО СТАТИЧЕСКИМ СИНХРОННЫМ КОМПЕНСАТОРОМ STATCOM

М. Албахри, Н. Г. Чернышов, К. А. Полкунов✉

*Кафедра «Конструирование радиоэлектронных и микропроцессорных систем»,
polkunovk@yandex.ru; ФГБОУ ВО «ТГТУ», Тамбов, Россия*

Ключевые слова: асинхронный генератор; ветровая электростанция; электроэнергия; STATCOM.

Аннотация: Исследованы режимы работы компенсатора реактивной мощности STATCOM в электрических сетях с ветроэлектрическими установками. Проведено моделирование функционирования асинхронного генератора с переменной частотой посредством использования преобразователя AC/DC/AC. Доказана способность STATCOM обеспечивать динамическую стабилизацию напряжения в диапазоне 0,95...1,05 о.е. при резких изменениях скорости ветра и аварийных ситуациях, включая восстановление номинального уровня напряжения за 0,2...0,5 с после коротких замыканий. Проанализировано повышение электродинамической устойчивости энергосистемы и увеличение пропускной способности линий электропередачи на 12 – 15 % за счет оперативной компенсации реактивной мощности.

Введение

Большие запасы нефти, газа и угля и их доступность определили российскую модель развития энергетики. Так, удельная мощность возобновляемых источников энергии (**ВИЭ**) в России без учета гидроэлектростанций (**ГЭС**) практически полностью состоит из ветровых электростанций (**ВЭС**) и фотоэлектрических (**ФЭС**) установок и составила в 2021 г. 1,12 %. Однако изменения в структуре энергетического комплекса в последние годы стали более заметными: в 2020 г. впервые за 5 лет произошло снижение суммарной установленной мощности тепловых электростанций на 1320 МВт, что примерно эквивалентно увеличению установленной мощности ВИЭ на 1207 МВт. Следует отметить, что энергетический комплекс России в целом низкоуглеродный, при этом более половины удельной мощности энергосистем приходится на гидроэнергетику и атомные электростанции [1]. На глобальном уровне повышение электрической нагрузки привело к значительному увеличению мощностей по выработке электроэнергии. Кроме того, поскольку электростанции обычно располагаются далеко от центров электрических нагрузок, возможны значительные потери электроэнергии и трудности с обеспечением необходимого уровня напряжения. В связи с этим возникает необходимость установки объектов распределенной генерации (**РГ**) – небольших объектов, работающих при единичном коэффициенте мощности, таких как фотоэлектрические батареи, топливные элементы и аккумуляторы. Располагаясь вблизи центров нагрузки, они могут также способствовать решению этих проблем. Однако наиболее эффективным является включение в состав энергетиче-

ского комплекса встроенных установок [2], поэтому актуально повышение эффективности функционирования ветроэнергетической установки (**ВЭУ**) при включении в состав комплекса установки статического компенсатора реактивной мощности STATCOM [3].

Цель работы – исследование режимов работы компенсатора реактивной мощности STATCOM в электрических сетях с ветроэлектрическими установками.

Имитационная модель генератора IG со STATCOM

Методы моделирования IG (асинхронный генератор)

Предыдущие исследования столкнулись с некоторыми проблемами при моделировании интеграции системы STATCOM с асинхронными двигателями ветряной электростанции, такими как интеграция устройств защиты при нештатных рабочих ситуациях и тройных отказах или выходе из строя одной из турбин или группы турбин при увеличении скорости ветра в регионе [4]. Для решения этих задач предлагается использовать метод математического моделирования с использованием уравнений или моделирующих схем для управления электрическими конструкциями в компьютерных программах, таких как MATLAB, NEPLAN, ETAB и др. [5] В зависимости от частотного диапазона в специализированных энергосистемах в настоящее время доступны три метода моделирования для изучения систем преобразования мощности на основе преобразователей напряжения, построенных на базе IGBT-транзисторов. Для достижения приемлемой точности с частотами переключения 1620 и 2700 Гц, используемыми в данной модели, они должны быть дискретизированы с относительно небольшим времененным шагом в 5 мкс. Такая модель хорошо подходит для наблюдения за гармониками и динамическими характеристиками системы управления в течение относительно коротких периодов времени (от сотен миллисекунд до одной секунды).

В основу исследования положена дискретная усредненная модель ветрогенератора с двойным питанием ротора (DFIG), реализованная в примере power_wind_dfig_avg (дискретная усредненная модель) библиотеки MATLAB [6]. В данной модели силовые преобразователи с источником напряжения аппроксимируются эквивалентными источниками напряжения, формирующими усредненное значение переменного напряжения за период коммутации. Такой подход обеспечивает учет динамических свойств системы при возможности использования увеличенного шага интегрирования (порядка 50 мкс). Это позволяет проводить моделирование процессов длительностью до нескольких секунд, что определяет выбор данной модели для настоящего исследования.

Для анализа низкочастотных электромеханических колебаний в продолжительных временных интервалах (от десятков секунд до минут) использована непрерывная векторная модель ветрогенератора с двойным питанием ротора, представленная в примере power_wind_dfig (непрерывная векторная модель) библиотеки MATLAB [7], где синусоидальные напряжения и токи заменяются комплексными векторными величинами, фиксированными на номинальной частоте сети 50 Гц. Такой метод, широко применяемый в программных комплексах для анализа устойчивости энергосистем, обеспечивает эффективное моделирование медленных динамических процессов.

Разработка математической модели ветроэнергетической установки с интегрированным STATCOM в среде MATLAB/Simulink

При разработке математической модели ВЭУ применен асинхронный генератор с короткозамкнутым ротором (IG – *Induction Generator*). Электромагнитные процессы в генераторе описаны уравнениями Парка–Горева в среде MATLAB/Simulink. Параметры генератора представлены на рис. 1 и в табл. 1.

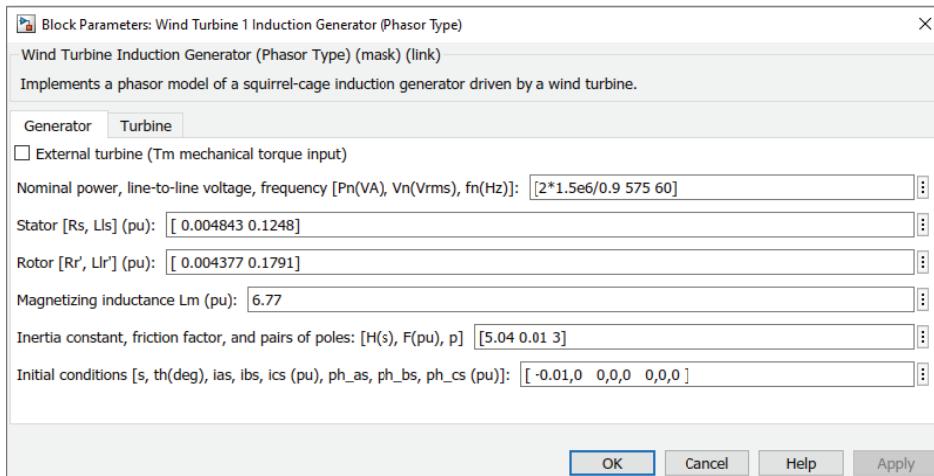


Рис. 1. Параметры генератора в MATLAB

Таблица 1

Параметры моделируемого асинхронного генератора, о. е.

Статор	Ротор	Индуктивность цепи намагничивания
$R_s = 0,004843$	$R_r = 0,004377$	$L_m = 6,77$
$L_s = 0,1248$	$L_r = 0,1791$	Коэффициент трения 0,01

Для запуска моделирования m.file в рабочей области MATLAB запускает инициализацию параметров машины. Необходимо принять меры для защиты преобразователя напряжения от аварийных режимов. Кроме того, добавление блока управления активной и реактивной мощностью дает системе больше возможностей для точного управления уровнями напряжения, особенно при возникновении электрических неисправностей всех видов посредством коммутации батареи конденсаторов.

Описание ветровой электростанции

Ветровая электростанция мощностью 9 МВт, состоящая из шести ветровых турбин мощностью 1,5 МВт, подключенных к распределительной системе 25 кВ, генерирует напряжение через фидер 25 кВ протяженностью 30 км.

Ветроэнергетические установки с асинхронным генератором двойного питания (DFIG) включают асинхронную машину с фазным ротором и двунаправленный преобразователь AC/DC/AC на IGBT-транзисторах с ШИМ-управлением. Обмотка статора подключена напрямую к сети 50 Гц, в то время как обмотка ротора присоединена через преобразователь с регулируемой частотой. Технология DFIG позволяет получать максимум энергии при низких скоростях ветра за счет регулирования скорости вращения турбины и снижения механических нагрузок при порывах ветра (рис. 2).

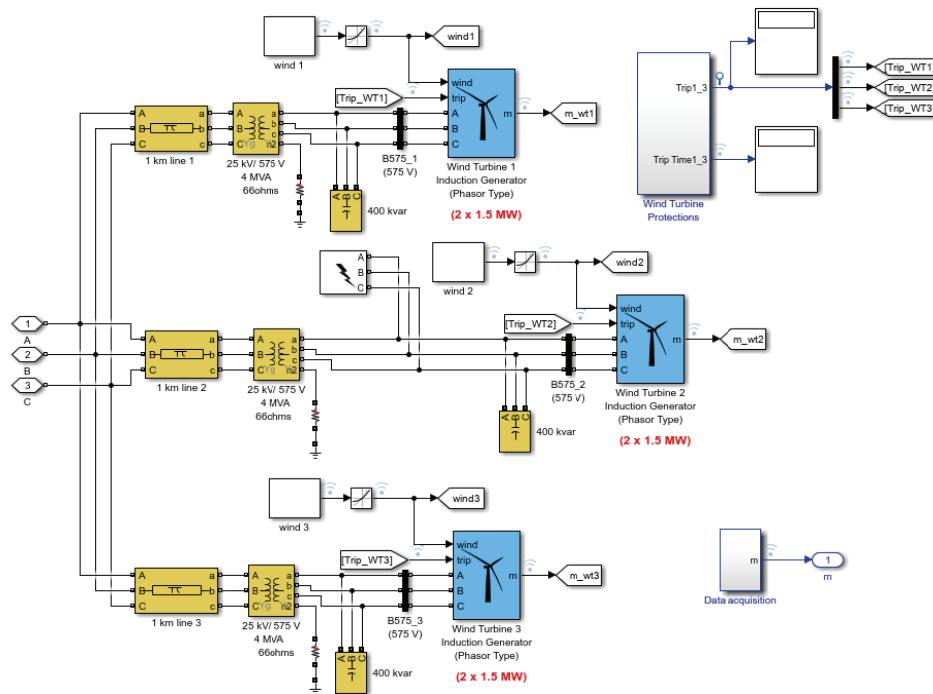


Рис. 2. Модель ветровой электростанции

Результаты моделирования работы генератора IG со STATCOM

Рассмотрим векторное моделирование ВЭС мощностью 9 МВт с использованием асинхронных генераторов с короткозамкнутым ротором (IG), приводимых в действие ветротурбинами с регулируемым шагом лопастей.

В разработанной модели (рис. 3) каждая ветротурбина оснащена IG. Обмотка статора непосредственно подключена к сети 50 Гц, а ротор механически соединен с ветротурбиной. Угол установки лопастей регулируется для ограничения выходной мощности генератора при превышении ветром номинальной скорости (9 м/с).

Для поддержания генерации скорость вращения асинхронного генератора контролируется в диапазоне, незначительно превышающем синхронную, – от 1,0 о.е. (холостой ход) до 1,005 о.е. (номинальная нагрузка). Каждая установка включает систему защиты, отслеживающую напряжение, токи и скорость вращения генератора.

Реактивная мощность асинхронного генератора частично компенсируется конденсаторными установками, подключенными к шинам низкого напряжения каждой турбины. Мощность каждой конденсаторной батареи составляет 400 квар (на турбину мощностью 1,5 МВт). Для поддержания напряжения на шине 25 кВ, близкого к 1,0 о.е., недостающая (или оставшаяся) реактивная мощность компенсируется STATCOM мощностью 3 Мвар с начальным углом управления или с начальным коэффициентом компенсации 3 %. При моделировании скорость ветра варьировалась в диапазоне 4...10 м/с. Номинальная скорость ветра, соответствующая номинальной механической мощности генератора 1,0 о.е. (3 МВт), составляет 9 м/с.

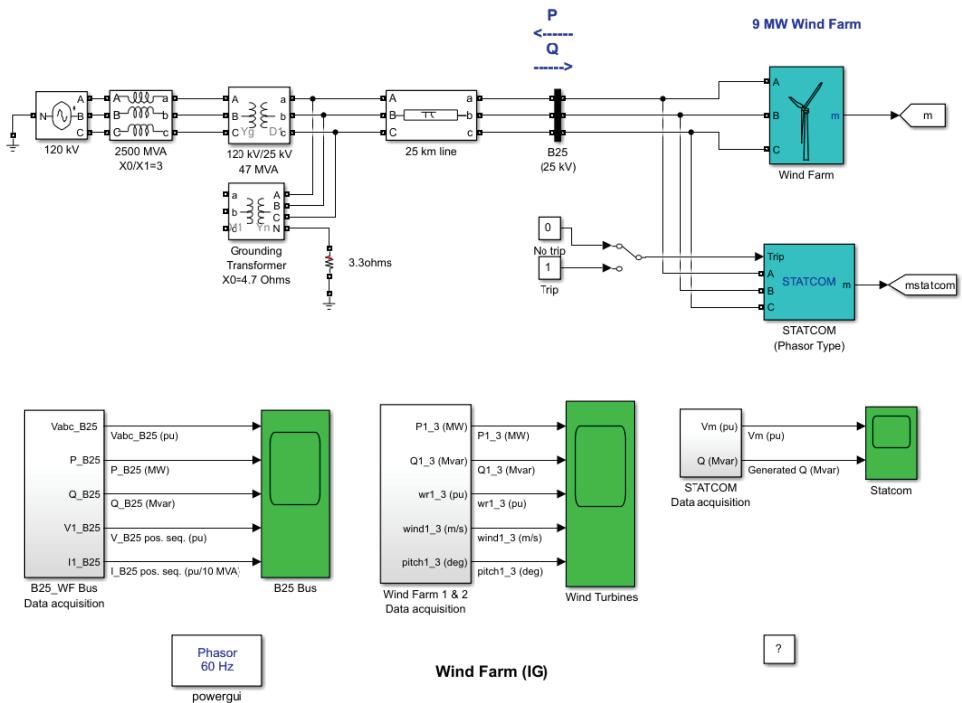


Рис. 3. Модель асинхронного генератора в MATLAB

Влияние STATCOM на стабилизацию напряжения в сети ВЭУ – результаты моделирования

Проанализируем влияние реактивной мощности STATCOM на стабилизацию сетевого напряжения ветроэнергетической установки. Выработка электроэнергии ветротурбинами существенно зависит от колебаний скорости ветра (рис. 4).

Первый этап – возмущающее воздействие в работу системы со STATCOM:

- вырабатываемая активная мощность начинает постепенно увеличиваться и достигает номинального значения 3 МВт примерно за 8 с, частота вращения турбины увеличилась с 1,0028 до 1,0047 о.е.;
- угол наклона также увеличился с 0° до 8°;
- реактивная мощность, потребляемая турбиной, возрастает с ростом активной выходной мощности и достигает 1,47 Мвар при номинальной нагрузке (1,5 МВт);
- когда скорость ветра достигает номинальной скорости 11 м/с, сумма фактической мощности, обеспечиваемой турбинами, вводимыми в коллекторные стержни, составляет 9 МВт;

Таким образом, система STATCOM поддерживает уровень напряжения от 0,98 до 0,99 о.е., обеспечивая реактивную мощность 1,62 Мвар. Динамика изменения параметров в процессе работы системы представлена на рис. 5.

Второй этап – работа системы при разделении блоков STATCOM.

Влияние STATCOM на систему отмечено при его отключении. Мгновенное снижение напряжения на коллекторной шине В до 0,91 о.е. вызывает критический рост тока нагрузки, что приводит к срабатыванию максимальной токовой защиты и отключению пары турбин через 15 с. При повторном вводе STATCOM в работу напряжение восстанавливается до 1,0 о.е. Стабильность системы в послеваварийном режиме обеспечивается генерацией реактивной мощности STATCOM 1,65 Мвар. Характеристики компенсации напряжения и реактивной мощности, предоставляемые STATCOM в различных режимах работы, показаны на рис. 6.

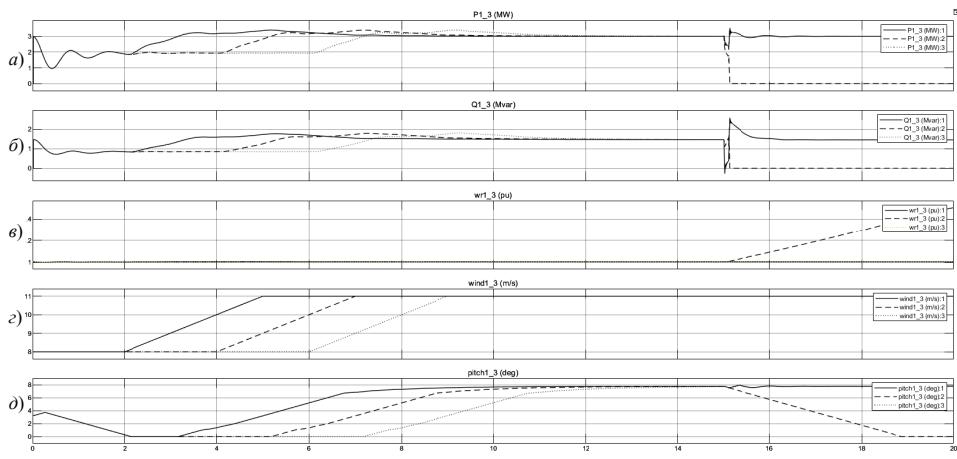


Рис. 4. Кривые работы пары турбин:

a – фактическая мощность; *б* – реактивная мощность; *в* – угловая скорость;

г – скорость ветра; *д* – угол наклона лопастей:

— первая; — вторая; - - - — третья

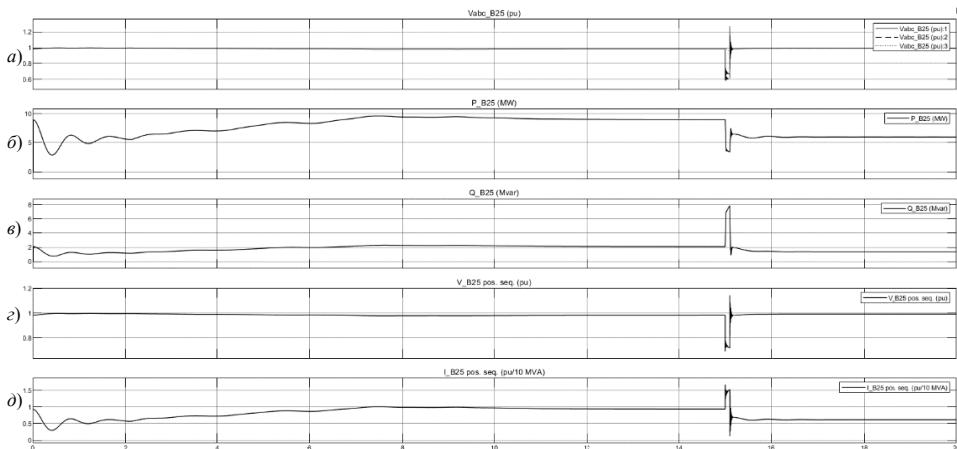


Рис. 5. Кривые линейного напряжения (а), активной (б) и реактивной (в) мощности, напряжения (г) и тока (д) соединительной шины В25, показанной на рис. 3

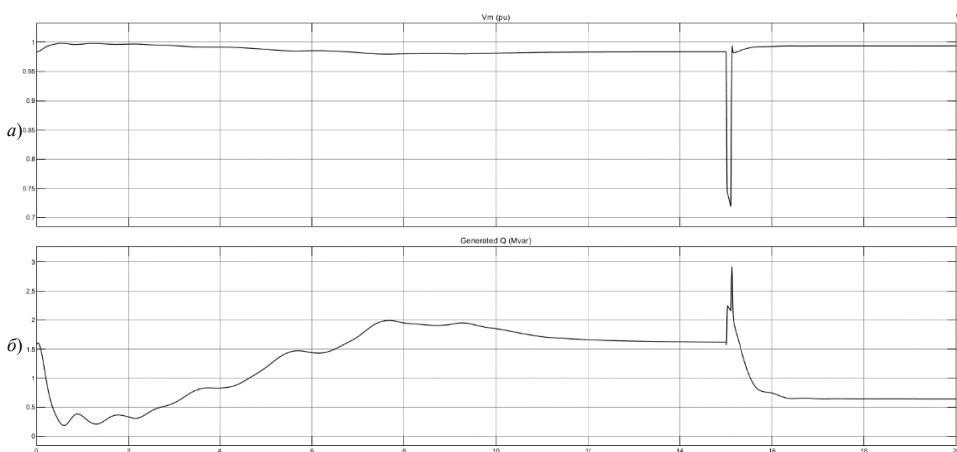


Рис. 6. Компенсация за электрическое напряжение (а) и недействительную мощность (б), предоставленные STATCOM

Исследования подтвердили, что асинхронные генераторы, особенно с двойным питанием ротора (DFIG), благодаря превосходству динамических характеристик над синхронными машинами, являются преобладающей технологией в современных ВЭУ. Компенсация реактивной мощности решает две ключевые задачи – коррекцию коэффициента мощности нагрузки и стабилизацию напряжения на распределительных шинах.

Первая задача решается повышением коэффициента мощности, особенно актуальным для крупных потребителей. Вторая – обеспечивается балансировкой реактивной мощности посредством специализированных устройств: статических компенсаторов (SVC) и статических синхронных компенсаторов (STATCOM). Последние, как представители семейства FACTS, применяются в системах передачи электроэнергии для повышения устойчивости.

Заключение

Обеспечение устойчивости энергосистем – ключевая задача при интеграции возобновляемых источников энергии наряду с традиционной генерацией. STATCOM обеспечивает превосходное регулирование напряжения по сравнению со статическими компенсаторами в условиях системных возмущений [8]. Согласно результатам моделирования, STATCOM поддерживает напряжение вблизи номинального уровня (1,0 о.е.) при интеграции мощности ветрогенераторов, а также оперативно компенсирует дисбалансы, восстанавливая номинальное напряжение за минимальное время. Благодаря таким динамическим характеристикам, как быстродействие и точность стабилизации, STATCOM демонстрирует более высокую эффективность компенсации реактивной мощности, чем тиристорные статические компенсаторы.

Повышение электродинамической устойчивости энергосистем, интегрирующих в себя ветровые электростанции, достигается применением устройств FACTS (англ. Flexible AC Transmission Systems), таких как статический синхронный компенсатор STATCOM. Динамическая модель системы реализована в MATLAB/Simulink. Для оценки влияния системы управления STATCOM на поведение энергосистемы исследованы аварийные и послеаварийные режимы, включая трехфазные короткие замыкания и скачкообразные изменения нагрузки. Результаты моделирования подтверждают эффективность STATCOM в следующих аспектах:

- повышение устойчивости (включая демпфирование мощностных колебаний);
- стабилизация напряжения в диапазоне 0,95...1,05 о.е. [9];
- рост пропускной способности линий электропередачи на 12 – 15 % [10];
- восстановление напряжения до номинала за 0,2...0,5 с после короткого замыкания благодаря генерации реактивной мощности [11].

Список литературы

1. Устинов, Д. А. Анализ влияния объектов распределенной генерации на системы защиты и режим напряжения: обзор / Д. А. Устинов, А. Р. Айсар // Безопасность труда в промышленности. – 2023. – № 2. – С. 15–20. doi: 10.24000/0409-2961-2023-2-15-20
2. Абрамович, Б. Н. Повышение эффективности автономных электротехнических комплексов нефтегазовых предприятий / Б. Н. Абрамович, И. А. Богданов // Записки Горного института. – 2021. – Т. 249. – С. 408–416. doi: 10.31897/PMI.2021.3.10
3. Влияние солнечной энергетики на развитие горнодобывающей отрасли в Республике Куба / Я. Э. Шклярский, Д. Д. Герра, Э. В. Яковleva, А. Рассылкин //

Записки Горного института. – 2021. – Т. 249. – С. 427–440. doi: 10.31897/PMI.2021.3.12

4. Kovalchuk, M. S. Modelling and control system of multi motor conveyor / M. S. Kovalchuk, S. V. Baburin // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. – 2018. – Vol. 327, No. 2. – P. 022065. doi: 10.1088/1757-899X/327/2/022065

5. Distortion Load Identification Based on the Application of Compensating Devices / Ya. Shklyarskiy, A. Skamyin, I. Vladimirov, F. Gazizov // Energies. – 2020. – Vol. 13, No. 6. – P. 1430. doi: 10.3390/en13061430

6. Wind Farm – Doubly-Fed Induction Generator (DFIG) Phasor Model : OPAL-RT TECHNOLOGIES, Inc. – URL : <https://opal-rt.atlassian.net/wiki/spaces/PSPS/pages/1551735113/Wind+Farm+-+Doubly-Fed+Induction+Generator+DFIG+Phasor+Model> (дата обращения: 10.11.2025).

7. Application examples: Plexim GmbH. – URL : <https://www.plexim.com/support/application-examples> (дата обращения: 10.11.2025)

8. Tian, L. Studies on the fault ride-through capability improvement of wind farm by using STATCOM / L. Tian, T. Wang, W. Wang // Proc. of International Conference on Advanced Power System Automation and Protection. – 2011, – No. 2. – P. 1032–1036. doi: 10.1109/APAP.2011.6180497

9. Сычев, Ю. А. Повышение качества электроэнергии в системах электроснабжения минерально-сырьевого комплекса гибридными фильтрокомпенсирующими устройствами / Ю. А. Сычев, Р. Ю. Зимин // Записки Горного института. – 2021. – Т. 247. – С. 132–140. doi: 10.31897/PMI.2021.1.14

10. Molinas, M. Low voltage ride through of wind farms with cage generators: STATCOM versus SVC / M. Molinas, J. A. Suul, T. Undeland // IEEE Transactions on Power Electronics. – 2008. – Vol. 23, No. 3. – P. 1104–1117. doi: 10.1109/TPEL.2008.921169

11. Control strategy for improving fault ride-through capability of cascaded inverter-based STATCOM / Y. Liu, K.A. Huang, G. Tang, S. Bhattacharya // IEEE Transactions on Power Delivery. – 2008. – Vol. 23, No. 4. – P. 2537–2545. doi: 10.1109/TPWRD.2008.917896

Research and Simulation of the IG Induction Generator with a Static Synchronous Compensator STATCOM

M. Albakhri, N. G. Chernyshov, K. A. Polkunov✉

Department of Radioelectronic and Microprocessor Systems Design,
nchtamb@yandex.ru; TSTU, Tambov, Russia

Keywords: asynchronous generator; wind power plant; electric power; STATCOM.

Abstract: The paper presents the finding of the research into the operating modes of the STATCOM reactive power compensator in electric grids with wind turbines. The operation of an asynchronous generator with a variable frequency was simulated using an AC/DC/AC converter. The study demonstrated the ability of STATCOM to provide dynamic voltage stabilization in the range of 0.95–1.05 p.u. during sudden

changes in wind speed and emergency situations, including restoration of the nominal voltage level within 0.2–0.5 s after short circuits. The improvement in the electrodynamic stability of the power system and the increase in transmission capacity of power lines by 12–15 % due to operational reactive power compensation were analyzed.

References

1. Ustinov D.A., Aysar A.R. [Analysis of the Impact of the Distributed Generation Facilities on Protection Systems and Voltage Mode: Review], *Bezopasnost Truda v Promyshlennosti* [Occupational Safety in Industry], 2023, no. 2, pp. 15-20. doi: 10.24000/0409-2961-2023-2-15-20 (In Russ., abstract in Eng.).
2. Abramovich B.N., Bogdanov I.A. [Improving the efficiency of autonomous electrical complexes of oil and gas enterprises], *Zapiski Gornogo Instituta* [Journal of Mining Institute], 2021, vol. 249, pp. 408-416. doi: 10.31897/PMI.2021.3.10 (In Russ., abstract in Eng.).
3. Shklyarskiy Ya.E., Guerra D.D., Iakovleva E.V., Rassõlkin A. [The influence of solar energy on the development of the mining industry in the Republic of Cuba], *Zapiski Gornogo Instituta* [Journal of Mining Institute], 2021, vol. 249, pp. 427-440. doi: 10.31897/PMI.2021.3.12 (In Russ., abstract in Eng.).
4. Kovalchuk M.S., Baburin S.V. Modelling and control system of multi motor conveyor, *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 2018, vol. 327, no. 2, pp. 022065. doi: 10.1088/1757-899X/327/2/022065
5. Shklyarskiy Ya., Skamyin A., Vladimirov I., Gazizov F. Distortion Load Identification Based on the Application of Compensating Devices, *Energies*, 2020, vol. 13, no. 6, pp. 1430. doi: 10.3390/en13061430
6. Wind Farm – Doubly-Fed Induction Generator (DFIG) Phasor Model : OPAL-RT TECHNOLOGIES, Inc., available at: <https://opal-rt.atlassian.net/wiki/spaces/PSPS/pages/1551735113/Wind+Farm+-+Doubly-Fed+Induction+Generator+DFIG+Phasor+Model> (accessed 10 November 2025).
7. Application examples : Plexim GmbH, available at: <https://www.plexim.com/support/application-examples> (accessed 10 November 2025)
8. Tian L., Wang T., Wang W. Studies on the fault ride-through capability improvement of wind farm by using STATCOM, *Proc. of International Conference on Advanced Power System Automation and Protection*, 2011, no. 2, pp. 1032-1036. doi: 10.1109/APAP.2011.6180497
9. Sychev Yu.A., Zimin R.Yu. [Improving the quality of electricity in power supply systems of the mineral resource complex by hybrid filter-compensating devices], *Zapiski Gornogo Instituta* [Journal of Mining Institute], 2021, vol. 247, pp. 132-140. doi: 10.31897/PMI.2021.1.14 (In Russ., abstract in Eng.).
10. Molinas M., Suul J.A., Undeland T. Low voltage ride through of wind farms with cage generators: STATCOM versus SVC, *IEEE Transactions on Power Electronics*, 2008, vol. 23, no. 3, pp. 1104-1117. doi: 10.1109/TPEL.2008.921169
11. Liu Y., Huang K.A., Tang G., Bhattacharya S. Control strategy for improving fault ride-through capability of cascaded inverter-based STATCOM, *IEEE Transactions on Power Delivery*, 2008, vol. 23, no. 4, pp. 2537-2545. doi: 10.1109/TPWRD.2008.917896

Forschung und Simulation eines asynchronen Generators mit einem statischen Synchronkompensator (STATCOM)

Zusammenfassung: Die Betriebsarten eines STATCOM-Blindleistungskompensators in Stromnetzen mit Windkraftanlagen sind untersucht. Der Betrieb eines Asynchrongenerators mit variabler Frequenz ist mithilfe eines AC/DC/AC-Umrichters simuliert. Die Fähigkeit des STATCOM, eine dynamische Spannungsstabilisierung im Bereich von 0,95–1,05 p.u. bei plötzlichen Windgeschwindigkeitsänderungen und in Notfallsituationen zu gewährleisten, einschließlich der Wiederherstellung des Nennspannungsniveaus innerhalb von 0,2–0,5 s nach Kurzschlüssen, ist demonstriert. Die Verbesserung der elektrodynamischen Stabilität des Stromnetzes und die Erhöhung der Übertragungskapazität der Stromleitungen um 12–15 % durch die Blindleistungskompensation sind analysiert.

Recherche et modélisation du générateur asynchrone avec compensateur synchrone statique STATCOM

Résumé: Sont étudiés les modes de fonctionnement du compensateur de puissance réactive STATCOM dans les réseaux électriques avec des installations éoliennes. Est réalisée la simulation du fonctionnement d'un générateur asynchrone à fréquence variable à l'aide d'un convertisseur AC/DC/AC. Est prouvée la capacité de STATCOM à fournir une stabilisation dynamique de la tension dans la plage de 0,95–1,05 OE avec des changements brusques de la vitesse du vent d'urgence, y compris le rétablissement de la tension nominale entre 0,2 et 0,5 s après un court-circuit. Sont analysées l'augmentation de la stabilité électrodynamique du réseau électrique et l'augmentation de la capacité des lignes de transmission de 12 à 15 % grâce à la compensation opérationnelle de la puissance réactive.

Авторы: *Албахри Мухаммед* – аспирант кафедры «Конструирование радиоэлектронных и микропроцессорных систем»; *Чернышов Николай Генрихович* – кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедрой «Конструирование радиоэлектронных и микропроцессорных систем»; *Полкунов Константин Александрович* – аспирант кафедры «Конструирование радиоэлектронных и микропроцессорных систем», ФГБОУ ВО «ТГТУ», Тамбов, Россия.