

АНАЛИЗ ПРОБЛЕМЫ МАТЕМАТИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ РЕЖИМОВ И ПРОЦЕССОВ В ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ С ФОТОЭЛЕКТРИЧЕСКИМИ УСТАНОВКАМИ

В.Е. Рудник, А.А. Суворов
ФГАОУ ВО Национальный исследовательский Томский
политехнический университет

В настоящее время во всём мире, в том числе в Российской Федерации, принят декарбонизированный вектор развития энергетического сектора, предполагающий широкомасштабную интеграцию в современные электроэнергетические системы (ЭЭС) низкоуглеродных и безуглеродных источников генерации, преимущественно функционирующих на базе возобновляемых источников энергии (ВИЭ), особенно на базе солнечной генерации [1-3]. В соответствии с отчетом международного энергетического сообщества [3] прирост установленной мощности фотоэлектрических установок (ФЭУ) только за 2020 г. составил почти 140 ГВт, а общая установленная мощность приблизилась к отметке в 800 ГВт и превысила мощность ветроэнергетических установок [3].

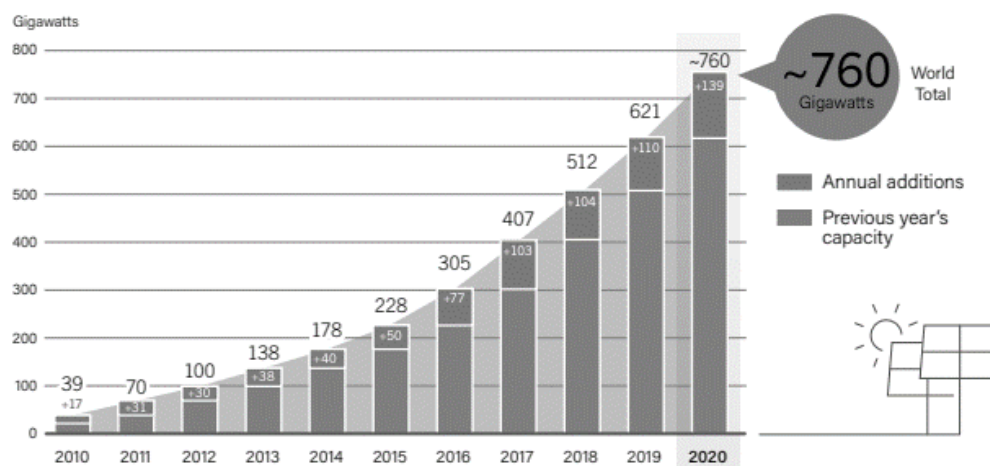


Рис. 1. Установленная мощность СЭС на конец 2020 года в мире [3]

Для фотоэлектрических устройств особенностью является их инверторное подключение, что отсекает прямое сопряжение с электроэнергетической системой [4-5]. Широкомасштабное внедрение ФЭУ с инверторами, в основном функционирующих на базе статического преобразователя напряжения, принципиально изменяют динамические свойства энергосистем из-за особенностей функционирования инвертора и его системы управления по сравнению с традиционной генерацией:

- ограниченная выдача тока ФЭУ при КЗ приводит к существенному снижению напряжения и значительному уровню колебаний после снятия КЗ, также изменение величины тока КЗ может приводить к неправильной работе релейной защиты;

- увеличение скорости переходных процессов из-за уменьшения общей инерции энергосистемы, что может послужить причиной для неправильной работы противоаварийной автоматики;
- несогласованное действие системы управления ФЭУ с системами управления другого оборудования приводит к нарастающим колебаниям режимных параметров после возмущений за счёт использования больших коэффициентов усиления;
- усугубление аварийной ситуации в ЭЭС ввиду несоответствия поведения ФЭУ требованиям их функционирования в аварийных режимах.

Обозначенные особенности приводят к существенному влиянию ФЭУ с инверторами на все существующие виды устойчивости энергосистем [6-10]. Особенно остро стоит данная проблема, когда ФЭУ внедряются в так называемые «слабые» сети. Данные сети определены в соответствии с международной терминологией [11], и характеризуются наличием слабых электрических связей в своей топологии, малой мощностью традиционных источников генерации относительно суммарной мощности нагрузки, а при их проектировании в целом не предусматривалась возможность установки значительного объема возобновляемой генерации. Именно в таких сетях в последнее время по всему миру возникают незатухающие колебания, приводящие к нарушению устойчивости как в самих энергорайонах [12], так и распространяющиеся на целые энергообъединения [13-14].

Для решения обозначенных проблем, связанных с анализом устойчивости «слабых» сетей с ФЭУ, необходима полная и достоверная информация о процессах в ФЭУ и «слабых» сетях при различных режимах их работы. Из-за известной специфики ЭЭС возможность получения необходимой информации, натурным путем невозможна, посредством физического моделирования практически невозможна (что связано с проблемой создания физических моделей большого количества электрооборудования и много-узловых систем), поэтому основным доступным способом её получения является математическое моделирование. При исследовании устойчивости традиционных ЭЭС обычно используются программно-вычислительные комплексы, основанные на расчете электромеханических переходных процессов [7]. В данных комплексах приходится прибегать к различного рода упрощениям моделей силового оборудования. Ключевым упрощением является, что в осциллограммах тока и напряжения преобладает составляющая основной частоты равная величине 50 или 60 Гц. При таком подходе высокочастотные процессы не воспроизводятся. Однако для корректного моделирования ЭЭС, в которые внедряются ФЭУ с инверторным подключением, важно учитывать высокочастотные электромагнитные процессы, которые при традиционном численном подходе к моделированию обычно игнорируются. В связи с этим по мере распространения ФЭУ, их быстрая реакция будет оказывать всё большее влияние на динамику всей энергосистемы в целом, а использование традиционного подхода к моделированию реальных ЭЭС и игнорирование высокочастотных процессов будет приводить к росту погрешности расчётов или вовсе радикальным различиям [7].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Один из вариантов решения обозначенной проблемы является методологически альтернативный комплексный подход, представляющий из себя гибридное моделирование, позволяющее для каждой стороны решаемой сложной проблемы разрабатывать и применять наиболее эффективные методы, способы и средства, объединение которых обеспечивает успешное решение проблемы в целом [15-18].

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 21-79-00129.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ:

1. Лоскутов А. Б., Куликов А. Л., Илюшин П. В. От плана ГОЭЛРО к цифровизации электроэнергетического комплекса страны // Электричество. 2020. №12. С.14-30.
2. Heard B.P., Brook B.W., Wigley T.M.L., Bradshaw C.J.A. Burden of proof: A comprehensive review of the feasibility of 100% renewable-electricity systems // Renewable and Sustainable Energy Reviews. 2017. vol. 76. pp. 1122-1133.
3. RENEWABLES 2021 GLOBAL STATUS REPORT [Электронный ресурс]. Режим доступа: https://www.ren21.net/wp-content/uploads/2019/05/GSR2021_Full_Report.pdf, свободный. – Загл. с экрана.
4. Илюшин П.В. Интеграция электростанций на основе возобновляемых источников энергии в Единую энергетическую систему России: обзор проблемных вопросов и подходов к их решению // Вестник МЭИ. 2022. № 4. С. 98—107.
5. Самойленко В.О., Трапезников Д.А., Илюшин П.В. О стандартизации и унификации принципов построения релейной защиты фотоэлектрических станций // Релейная защита и автоматизация. 2020. № 3 (40). С. 10-25.
6. Hatziaargyriou N., Milanovic J., Rahmann C., Ajarapu V., Canizares C., Erlich I., Hill D., Hiskens I., Kamwa I., Pal B., Pourbeik P., Sanchez-gasca J., Stankovic A., Cutsem T. V., Vittal V., Vournas C. Definition and Classification of Power System Stability – Revisited and Extended // IEEE transactions on power systems. 2021. vol. 36. no. 4. pp. 3271-3281.
7. Суворов А.А., Аскарлов А.Б., Рудник В.Е., Разживин И.А., Андреев М.В., Бай Ю.Д. Верификация численных расчётов электромеханических переходных процессов при оценке устойчивости электроэнергетических систем с генерирующими объектами, использующими ВИЭ // Электрические станции. 2022. № 1 (1086). С. 25-37.
8. Суворов А.А., Аскарлов А.Б., Рудник В.Е., Андреев М.В., Бай Ю.Д. Синтез и тестирование типовых структур систем автоматического управления на основе виртуального синхронного генератора для генерирующих

установок с силовым преобразователем // Электрические станции. 2022. № 3 (1088). С. 43-57.

9. Ситников С.А., Шайтор Н.М., Горпинченко А.В., Дубков Е.А. Анализ проблем энергосистемы с высокой долей солнечной генерации // Вестник ИжГТУ имени М.Т. Калашникова. 2021. Том 24, № 1.
10. Simon R. Sinsel, Rhea L. Riemke, Volker H. Hoffmann. Challenges and solution technologies for the integration of variable renewable energy sources—a review // Renewable Energy. 2020. vol. 145, pp: 2271-2285.
11. Wang W. et al., Instability of PLL-Synchronized Converter-Based Generators in Low Short-Circuit Systems and the Limitations of Positive Sequence Modeling // 2018 North American Power Symposium (NAPS), 2018, pp. 1-6.
12. Ebrahimzadeh E., et al. Harmonic stability and resonance analysis in large PMSG-based wind power plants // IEEE Transactions on Sustainable Energy, vol. 9. no. 1. pp. 12–23. 2018.
13. Huang S.H., et al. Voltage control challenges on weak grids with high penetration of wind generation: ERCOT experience // IEEE PES General Meeting, San Diego, CA. 2012. pp. 1–7.
14. Ramasubramanian Deepak, Wang Wenzong, Pourbeik Pouyan, Farantatos Evangelos, Gaikwad Anish, Soni Sachin, Chadliev Vladimir. A Positive Sequence Voltage Source Converter Mathematical Model for Use in Low Short Circuit Systems // IET Generation Transmission & Distribution. 14. 87-97.
15. Andreev M. V., Gusev A. S., Ruban N. Y., Suvorov A. A., Ufa R. A., Askarov A. B., . . . Králík T. Hybrid real-time simulator of large-scale power systems. IEEE Transactions on Power Systems. 2019. vol. 34. no. 2. pp. 1404-1415.
16. Андреев М.В., Боровиков Ю.С., Гусев А.С. и др. концепция и базовая структура всережимного моделирующего комплекса // Газовая промышленность. 2017. № 5 (752). с. 18-27.
17. Razzhivin I., Askarov A., Rudnik V., Suvorov A. A hybrid simulation of converter-interfaced generation as the part of a large-scale power system model // International Journal of Engineering and Technology Innovation, 2021, 11(4). pp. 278–293.
18. Ruban N., Rudnik V., Razzhivin I., Kievec A. A Hybrid Model of Photovoltaic Power Stations for Modelling Tasks of Large Power Systems // EEA - Electrotehnica, Electronica, Automatica. 2021. 69 (4). pp. 43–49

Научный руководитель: А. А. Суворов, к.т.н., доцент отделения электроэнергетики и электротехники инженерной школы энергетики ФГАОУ ВО НИ ТПУ.