



ОТКРЫТАЯ НАУКА  
издательство

Международный журнал информационных технологий и  
энергоэффективности

Сайт журнала:

<http://www.openaccessscience.ru/index.php/ijcse/>



УДК 621.311

## БЕЗОПАСНОСТЬ КРУПНЫХ ЭНЕРГОСИСТЕМ

**Хрусталева М.С., <sup>1</sup>Павлов А.В.**

*ФГБОУ ВО "ТВЕРСКОЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ", Тверь, Россия (170026, Тверская область, город Тверь, наб. Афанасия Никитина, д.22), e-mail: <sup>1</sup>sokolhawk98@gmail.com*

В статье рассматривается доступность динамической электросети. Теория объясняется на примере двухзонной энергосистемы, представленной агрегированной моделью колебаний. Количество отказов является критерием для принятия решений по управлению резервированием, повышающим доступность системы при возникновении сбоев из-за потери оборудования. Критерий позволяет включать формальные показатели неопределенностей, связанных с диагностикой неисправностей в режиме реального времени, а также формальные показатели эффективности контроля. Также исследовано влияние наличия несущей конструкции современной электросети на доступность самой электросети, с акцентом на сеть единиц измерения. Акцент сделан на признании растущей потребности в диагностике и контроле в режиме реального времени в современной энергосистеме.

Ключевые слова: Энергосистема, безопасность энергосистемы, надежность энергосистемы, отключение электроэнергии, динамическая безопасность, устойчивость энергосистемы.

## SECURITY OF LARGE POWER SYSTEMS

**Khrustaleva M.S., <sup>1</sup>Pavlov A.V.**

*TVER STATE TECHNICAL UNIVERSITY, Tver, Russia (170026, Tver region, Tver city, Afanasiya Nikitin embankment, 22), e-mail: <sup>1</sup>sokolhawk98@gmail.com*

The article discusses the number of failures, how this affects the availability of a dynamic power grid. The theory is explained on the example of a two-zone power system represented by an aggregated oscillation model. The number of failures is a criterion for making redundancy management decisions, increasing the availability of the system in the event of failures due to loss of equipment. The criterion makes it possible to include formal indicators of uncertainties associated with real-time fault diagnosis, as well as formal indicators of control efficiency. The influence of the presence of the supporting structure of a modern electrical network on the availability of the electrical network itself is also investigated, with an emphasis on the network of units of measurement. Emphasis is placed on the recognition of the growing need for real-time diagnostics and control in the modern power system.

Keywords: Power system, power system security, power system reliability, power outages, dynamic security, power system stability.

Реструктуризация энергосистемы [1] подразумевает более высокую степень взаимосвязанности, в том числе использование возобновляемых источников энергии, и большую зависимость от информационных технологий в несущей структуре сети, где, среди многих компонентов, размещаются новые устройства управления и контроля. Сложность, неопределенность и уязвимость, сопровождающие новые возможности, усиливают потребность в формальном исследовании доступности, которое также должно учитывать

доступность растущей поддерживающей структуры и учитывать последствия решений, принимаемых в режиме реального времени.

Несмотря на замечательные достижения последних нескольких десятилетий в усилиях по повышению безопасности и надежности электрических сетей, только за последний 5 лет (2018-2023 г.г.) произошло семь крупных отключения электроэнергии в Мире [2]:

1. Венесуэла – 7 марта 23 июля 2019 года, пострадавших 30 млн. человек;
2. Аргентина, Парагвай, Уругвай – 16 июня 2019 года, пострадавших 48 млн. человек;
3. Индонезия – 4-5 августа 2019 года, пострадавших 120 млн. человек;
4. Шри-Ланка – 17 августа 2020 года, пострадавших 21 млн. человек.
5. Пакистан – 9 января 2021 года, пострадавших 200 млн. человек, что составляет  $\approx$  80% населения страны;
6. Бангладеш – 4 октября 2022 года, пострадавших 140 млн. человек, что составляет  $\approx$  80% населения страны;
7. Пакистан – 23 января 2023 г, пострадавших 230 млн. человек, что составляет  $\approx$  99% населения страны.

Автор *The Unruly Power Grid* [3] процитировал некоторые передовые исследования, которые предполагают, что крупные отключения электроэнергии неизбежны. Одна теория связывает такие события с недостаточным запасом устойчивости, поскольку преобладает стремление к максимальной отдаче от инвестиций в энергосистему, а другая — со сложностью все более взаимосвязанных систем, что находит поддержку в устоявшейся теории больших отклонений в многомерных рисках [4]. Обе теории опираются на то, что стоимость создания энергосистем, делающих редкие события еще более редкими, слишком высока, а сложность общепризнанно снижает надежность.

При анализе надежности энергосистемы для каждой из систем генерации, передачи и распределения использовалось множество отдельных показателей [5]. Кроме того, понятие безопасности использовалось для обозначения способности электроэнергетической системы выдерживать крупные изменения, например, из-за непредвиденной потери объектов системы [6]. Вероятностная структура использовалась для обеспечения унифицированной обработки стационарной устойчивости и динамической безопасности. Некоторые исследования включают гибкие системы передачи переменного тока (FACTS) в анализ надежности. Однако использование нескольких индексов и отдельного понятия безопасности указывает на то, что связь между переходным поведением, вызванным сбоями в динамической системе, и надежностью системы, на которую, по-видимому, влияет ее безопасность, не установлена должным образом. Эта связь полностью отсутствует, когда для управления резервированием оборудования используется неопределенная информация в реальном времени.

Первый тип неисправности связан с повышением безопасности при эксплуатации связано с сетевым оборудованием, таким как генераторные установки, трансформаторы, линии электропередачи и нагрузки. Конечная цель состоит в своевременном устранении этого типа отказов, насколько это возможно, за счет эксплуатации и управления резервированием оборудования, несмотря на наличие отказов второго типа.

Второй тип неисправностей связан с компонентами, находящимися в несущей конструкции сети, такими как устройства управления, обработки и измерения. Растущее присутствие новых мощных и быстрых устройств в системах и высоковольтных системах

передачи постоянного тока, а также векторных измерительных устройствах значительно расширило возможности использования и управления резервированием в энергосистеме.

Поскольку всегда ожидается восстановление работы сети, устойчивая доступность, а не надежность, принимается в качестве меры производительности сети. Доступность в устойчивом состоянии — это примерно доля времени в долгосрочной перспективе, в течение которой система работает удовлетворительно. Степень удовлетворенности может быть определена на нескольких уровнях и включать экономические факторы. В рамках стохастической модели с дискретными состояниями доступность может быть вычислена как сумма вероятностей состояний для состояний, которые классифицируются как представляющие оперативную сетку с заданным порогом производительности.

Восстановление системы зависит от того, настроена ли сеть на допустимое количество потерь оборудования. Если это так, то защитные устройства, такие как реле и автоматические выключатели [7], должны удалить неисправное оборудование до критического времени отключения, после которого межзональная синхронизация теряется.

Однако следует отметить, что помехи во время неисправности могут привести к срабатыванию защитных устройств в неповрежденном оборудовании и, таким образом, к каскадным событиям, когда защитные устройства не могут различить причины колебаний напряжения и тока. Диагностическая поддержка в сети недостаточна для изменения предварительно установленных протоколов повторного включения в режиме реального времени. Хотя ожидается, что новые схемы, которые возвращают измеренную или оцененную информацию по обширной области модернизируемой сети, будут способны выполнять более сложное управление резервированием в режиме реального времени, риски, связанные с неопределенностями в измеренной или оцененной информации, должны быть официально включены в решение. процесс.

Надлежащей мерой производительности энергосистемы является ее способность возвращаться к желаемому равновесию. Рассчитанное покрытие отказов для двухзонной системы фиксирует эффект отсроченного контроля или действий по управлению, эффект неопределенных результатов диагностики и эффект управляемости.

Тенденция к получению и обработке информации в режиме реального времени при работе современной энергосистемы делает все более важным использование измерительных устройств. Все схемы размещения носят детерминированный характер, и связь между доступностью данных измерений и доступностью сетки не установлена.

При проектировании архитектуры резервирования необходимо смоделировать доступность данных измерений. Новая проблема проектирования структуры измерительной сети формулируется как задача оптимизации, в которой цены назначаются конфигурациям системы и применяются ограничения на доступность данных.

### Список литературы

1. Chow J.H., Wu F.F., Momoh J.A. (ed). Applied mathematics for restructured electric power systems: optimization, control, and computational intelligence // Springer, USA. 2005. 233 p.
2. Список основных отключений электроэнергии: Википедия. [Электронный ресурс]. URL: [https://translated.turbopages.org/proxy\\_u/en-ru.ru.77412d65-64dc9bc5-11cd7738-74722d776562/https/en.wikipedia.org/wiki/List\\_of\\_major\\_power\\_outages](https://translated.turbopages.org/proxy_u/en-ru.ru.77412d65-64dc9bc5-11cd7738-74722d776562/https/en.wikipedia.org/wiki/List_of_major_power_outages) (дата обращения: 05.08.2023).

3. Fairley P. The unruly power grid // IEEE Spectrum. 2004. №41. PP 22–27.
4. Dembo A, Zeitouni O. Large deviations techniques and applications. Applications of mathematics // Springer-Verlag, Berlin. 1998. №38. 396 p.
5. Mountford J.D., Austria RR (1999) Keeping the lights on. IEEE Spectrum 36:34–39
6. Varaiya P., Wu F.F., Chen R. Direct methods for transient stability analysis of power systems: recent results // Proc IEEE. 1985. №73. 1703–1715
7. Anderson P.M. Power system protection // IEEE Press, New Jersey. 1998

## References

1. Chow J.H., Wu F.F., Momoh J.A. (ed). Applied mathematics for restructured electric power systems: optimization, control, and computational intelligence // Springer, USA. 2005. 233 p.
  2. List of major power outages: Wikipedia. [Online]. URL: [https://translated.turbopages.org/proxy\\_u/en-ru.ru.77412d65-64dc9bc5-11cd7738-74722d776562/https/en.wikipedia.org/wiki/List\\_of\\_major\\_power\\_outages](https://translated.turbopages.org/proxy_u/en-ru.ru.77412d65-64dc9bc5-11cd7738-74722d776562/https/en.wikipedia.org/wiki/List_of_major_power_outages) (дата обращения: 05.08.2023).
  3. Fairley P. The unruly power grid // IEEE Spectrum. 2004. №41. PP 22–27.
  4. Dembo A, Zeitouni O. Large deviations techniques and applications. Applications of mathematics // Springer-Verlag, Berlin. 1998. №38. 396 p.
  5. Mountford J.D., Austria RR (1999) Keeping the lights on. IEEE Spectrum 36:34–39
  6. Varaiya P., Wu F.F., Chen R. Direct methods for transient stability analysis of power systems: recent results // Proc IEEE. 1985. №73. 1703–1715
  7. Anderson P.M. Power system protection // IEEE Press, New Jersey. 1998
-