

ОБЗОР МЕТОДОВ ДИНАМИЧЕСКОЙ ВИЗУАЛИЗАЦИИ СОСТОЯНИЯ ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ СИСТЕМ НА ОСНОВЕ СИНХРОНИЗИРОВАННЫХ ВЕКТОРНЫХ ИЗМЕРЕНИЙ

Применение технологии синхронизированных векторных измерений (СВИ), основанной на измерении с высокой точностью параметров электрического режима на различных объектах электроэнергетической системы (ЭЭС), позволяет значительно повысить наблюдаемость протекающих в энергосистеме процессов. Визуализация СВИ в режиме реального времени позволяет добиться повышения ситуационной осведомленности оперативно-диспетчерского персонала как в диспетчерских центрах, так и на отдельных объектах энергосистемы, позволяя диспетчерам быстрее реагировать на возникающие в системе возмущения. Существующие системы сбора данных и оперативного диспетчерского управления как зарубежных, так и отечественных производителей позволяют выполнять визуализацию СВИ и в темпе процесса, сохраняя ретроспективные данные, в случае возникновения возмущений в ЭЭС. Основные методы визуализации, как правило, включают: использование контуров (градиентного отображения) характеристик ЭЭС (углов напряжений, перетоков мощности в системе и т.д.), что может быть полезно в случае необходимости быстрой локализации возмущения в системе, размещение круговых диаграмм и индикаторов для отображения напряжения на шинах, загрузки линий электропередачи и т.д. и использование комбинированных индикаторов отображения направления перетоков мощности в системе. Среди ключевых тенденций в области визуализации измерительной информации для диспетчерского персонала стоит выделить повышение репрезентативности состояния системы за счет большей скорости обновления данных в рамках визуализируемой модели ЭЭС, и идентификацию аварийных состояний за счет обработки поступающих потоков данных от устройств СВИ в темпе процесса с последующим формированием аварийных сигналов для диспетчера.

Ключевые слова: оценка состояния, синхронизированные векторные измерения, электроэнергетическая система, визуализация состояния электроэнергетических систем.

ВВЕДЕНИЕ

В последние годы в высоковольтных электрических сетях 220 кВ и выше все большее распространение получают системы синхронизированных векторных измерений (СВИ), которые на основе систем спутниковой навигации GPS/ГЛОНАСС позволяют осуществлять измерения не только амплитуд тока и напряжения, но и их взаимного фазового сдвига. Данные системы позволяют производить измерения векторов (амплитуды и фазы) токов и напряжений, причем делают это сразу для всей территории Единой Энергетической Системы (ЕЭС). Частота обновления СВИ обычно составляет 50 раз за секунду и это существенно чаще, чем у традиционных SCADA-систем телеизмерения режимных параметров, когда измерения обновлялись один раз за 1-5 секунд. Эксплуатация ЭЭС требует обработки больших объемов данных и их предоставления диспетчерам в той форме, которая может быть легко использована и интерпретирована как с учетом функциональных взаимосвязей между отдельными параметрами, характеризующими режим работы ЭЭС, так и с учетом географического расположения отдельных элементов ЭЭС. Все более широкое распространение устройств синхронизированных векторных измерений (УСВИ), в том числе за счет создания Системным Оператором ЕЭС (СО ЕЭС) Системы мониторинга переходных режимов ЕЭС России (СМНР), позволяет реализовать более детальное визуальное представления режима работы ЭЭС [1,2].

Графическое отображение состояния энергосистем впервые обсуждалось в контексте визуализации решений по распределению нагрузки с использованием систем IBM System/360 [3]. Дополнительная работа над методами визуализации продолжалась на протяжении 1970-1990-х годов. В частности, в [4] представлен краткий обзор современных методов визуализации, разработанных до середины 1990-х годов. С тех пор были проведены существенные исследования в области визуализации динамических процессов ЭЭС, причем акцент, как правило, ставился на повышении ситуационной осведомленности диспетчеров [5].

Существующие подходы к визуализации состояния ЭЭС в первую очередь укрупненно разделяют на те, что используют двумерное пространство, и те, в которых применяется трехмерная система координат [6]. При этом вопрос выбора величин и методов визуализации актуален и для первой, и для второй категории.

Методы визуализации, которые рассматриваются в литературе, как правило, включают: использование цветных градиентных контуров характеристик ЭЭС (углов напряжений, перетоков мощности в системе и т.д.) [5, 7–12], размещение круговых диаграмм и индикаторов для отображения напряжения на шинах, загрузки линий электропередачи и т.д. [10, 13–15] и использование комбинированных индикаторов отображения направления перетоков мощности в системе [4, 6, 10, 13–17]. Кроме того, формальная оценка показала потенциальные преимущества использования выделения значений напряжения с помощью контуров отдельных областей и анимации перетоков мощности в

системе [18, 19], что не исключает иных вариантов отображения параметров ЭЭС. В рамках данной статьи представлен обзор основных методов графического отображения состояния системы на основе как данных СВИ, так и измерений SCADA-систем.

ВИЗУАЛИЗАЦИЯ В ДВУМЕРНОМ ПРОСТРАНСТВЕ

Одним из первых методов визуализации, который оказался полезным для быстрого определения мест перегрузок/отключений в распределительных сетях, является использование круговых диаграмм, в которых процент заполнения каждой круговой диаграммы равен процентной загрузке линии [6]. Для схем с относительно небольшим количеством связей, где круговая диаграмма каждой отдельной линии может быть отображена детализированно, такой способ индикации может быть достаточно репрезентативными [6, 20]. При этом в ряде случаев целесообразно цветовое выделение отдельных частей диаграмм для акцентирования внимания на проблемных участках. В качестве основного недостатка отмеченного решения стоит выделить проблематичность динамического отображения подобных диаграмм на сложнотоположностях схемах, поскольку компромисс между созданием достаточно крупных круговых диаграмм, удобных для восприятия, но не слишком больших, чтобы не скрыть другие важные элементы, может быть труднодостижим (рис. 1).

Для отображения показателей узлов в качестве дополнения к круговым диаграммам нередко применяются столбчатые шкалы отдельных переменных, отражающие нахождение контролируемого параметра (как правило, нормированного) в заданном диапазоне (рис. 2).

Для указания направления перетоков мощности в системе возможно использование статичных или анимированных индикаторов (рис. 3). Однако, как отмечено в [6], применение отмеченного подхода для сложнотоположностей систем (рис. 4) и особенно в случае использования анимированных индикаторов приводит к повышенной утомляемости оператора и возрастанию вероятности их неправильной интерпретации.

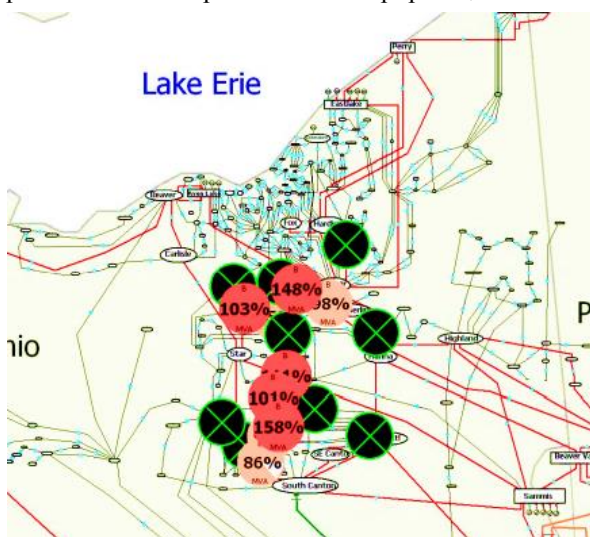


Рис. 1. Пример использования круговых диаграмм для отображения загрузки сети

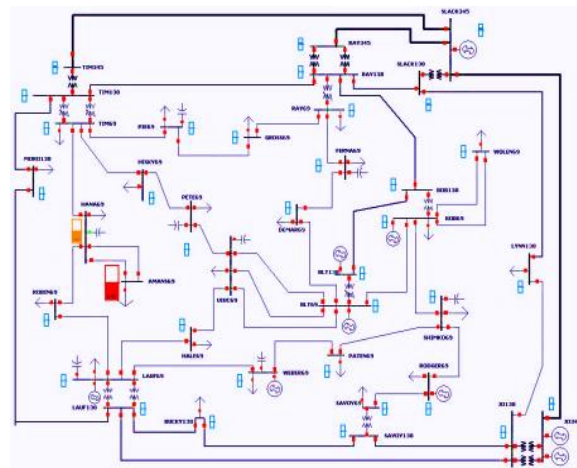


Рис. 2. Пример визуализации нормированных значений уровней напряжения с помощью индикаторов

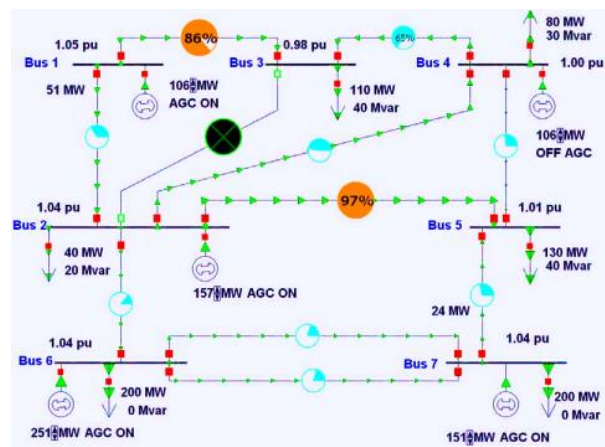


Рис. 3. Пример использования индикаторов указания направления токов по линиям



Рис. 4. Пример использования индикаторов указания направления токов по линиям крупной системы

Для отображения пространственно-распределенных, непрерывных характеристик во многих областях используются цветовые контуры. Однако их использование в электроэнергетике сопряжено с рядом особенностей. При отображении модулей или углов напряжений возникает проблема построения области условно постоянного напряжения. Шины подстанций как физические объекты дискретны и значения напряжений, полученные с использованием измерительных устройств,

соответствуют конкретной точке сети без промежуточных значений (**рис. 5**). Для решения отмеченной проблемы формируются области условно постоянных напряжений с псевдозначениями, охватывающими некоторую область вблизи точки измерения. Псевдозначения представляют собой средневзвешенное значение измерений на некоторой области, при этом различные функции усреднения дают разные области условно постоянного напряжения. Кроме того, географически близко расположенные узлы ЭЭС могут иметь различные классы напряжения, а трансформаторы с РПН вносить дискретные изменения в значения величины напряжения на шине, в то время как контурное отображение обычно подразумевает непрерывное отображение в заданном диапазоне. Данная особенность, как правило, учитывается либо отображением контуров в относительных единицах, либо отображением разных классов напряжения различными слоями [6].

Более целостную картину о состоянии энергосистемы в целом можно получить, выбрав в качестве визуализируемых величин углы или разность углов напряжений в системе. В частности, они могут быть достаточно репрезентативны в случае достижения системой пределов по устойчивости [21]. 8 января 2021 года в 14:05 по центральноевропейскому времени синхронная зона континентальной Европы была разделена на две части из-за сбоев в работе элементов сети за относительно короткий промежуток времени, визуализация углов напряжений в системе, в режиме, предшествующем этому моменту, достаточно четко отражает проблемные области (**рис. 6**).

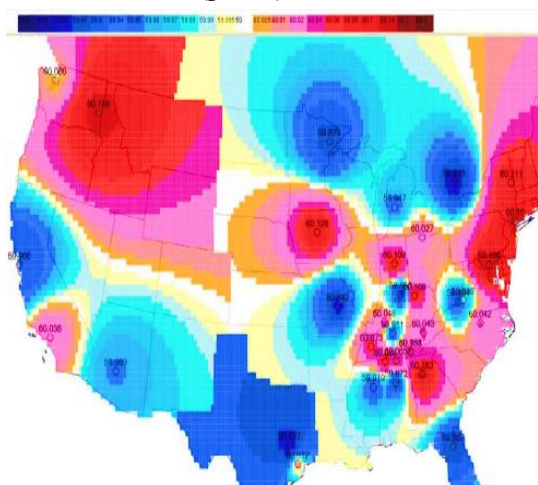


Рис. 5. Пример отображения уровней напряжений в системе с использованием контуров

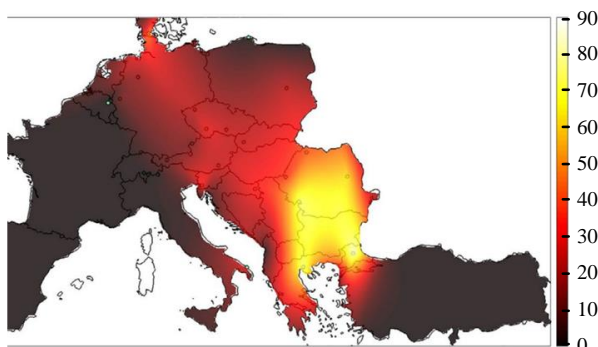


Рис. 6. Пример отображения углов напряжений в системе цветового градиента

При использовании цветовых контуров возникает вопрос выбора величин для отображения. Достаточно часто для визуализации выбирают углы напряжений. Однако в случае отображения лишь самих значений возникает проблема их интерпретации. В [10] предлагается метод визуализации, который позволит сразу увидеть существенные изменения в системе и избежать проблем, связанных с интерпретацией. Суть метода заключается в отображении контуров изменения состояния системы (вместо цветовой градации текущего состояния), как это показано на **рис. 7**. Отключение линии вызывает возмущение в системе, что отображается контурами возле фактических центров возмущения и позволяет диспетчеру провести дальнейший анализ, используя дополнительную информацию, к примеру табличный вариант отображения данных.

Помимо представления значений отдельных узлов ЭЭС, контуры также можно назначить параметрам, характеризующим режим работы линий электропередачи. В частности, возможна реализация отображения «коэффициентов передачи» при оценке влияния изменения перетоков мощности между двумя узлами ЭЭС [6]. Значение «коэффициента передачи» для каждой пары узлов в системе показывает влияние изменения перетока мощности между заданной парой узлов на каждую линию ЭЭС. Например, если для пары узлов линия имеет значение «коэффициента передачи» 10%, это означает, что 10% передаваемой мощности между этими двумя узлами будет проходить по этой линии. Таким образом, при передаче мощности 300 МВт нагрузка линии составит 30 МВт (**рис. 8**).

Помимо визуализации токов и напряжений, возможно использование контуров и для отображения иных величин. В частности, в [12] авторы использовали цветовые контуры для отображения изменения частоты в системе по данным СВИ в случае качаний активной мощности (**рис. 9**). Кроме того, использование частоты в качестве визуализируемой величины также позволяет достаточно оперативно выявить изолированно работающие части в случае деления системы (**рис. 10**) [21].

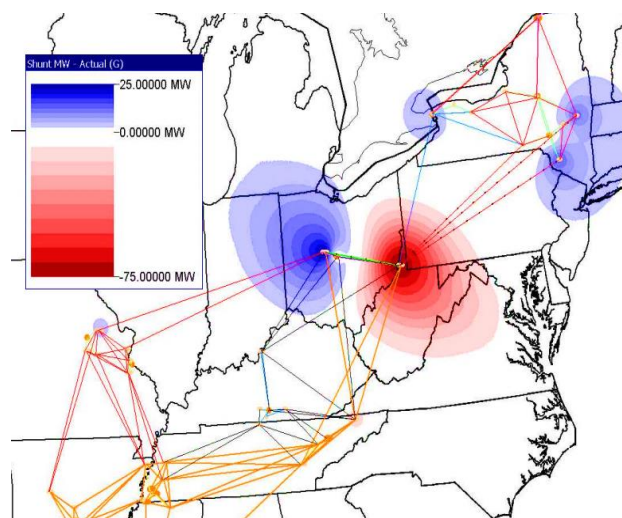


Рис. 7. Отображение возмущения в системе с использованием цветовых контуров

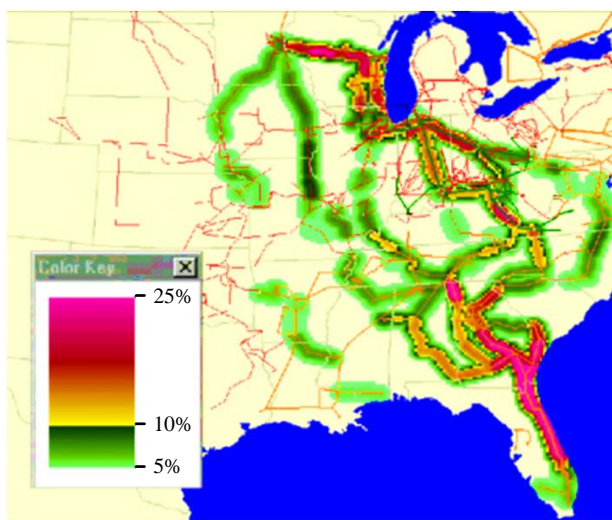


Рис. 8. Отображение коэффициентов передачи линий с помощью цветовых контуров

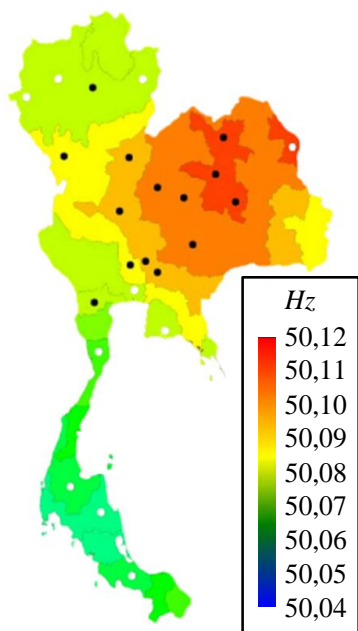


Рис. 9. Отображение частоты в системе при качаниях активной мощности

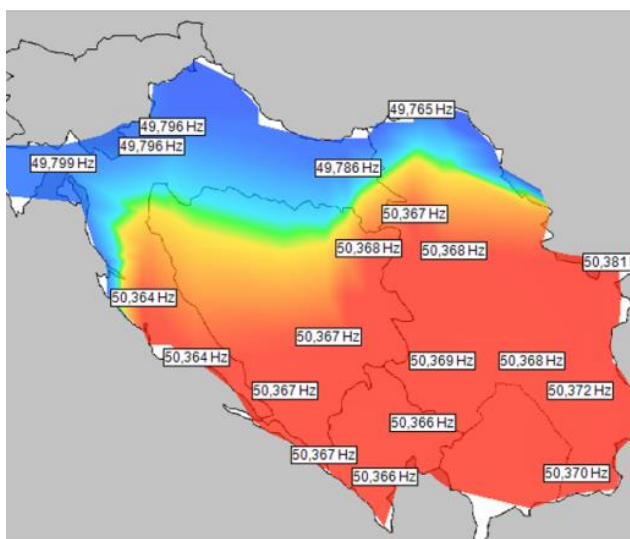


Рис. 10. Отображение частоты при делении системы

Визуализация всей системы в целом может быть дополнена детальным отображением характеристик и условий работы отдельных устройств. На уровне устройства оператору необходима подробная информация, которая может включать в себя отображение в реальном времени динамических характеристик, отражающих как текущую загрузку устройства, так и его перегрузочную способность. Как правило, для представления характеристик конкретных устройств используются линейные графики и диаграммы.

ВИЗУАЛИЗАЦИЯ СОСТОЯНИЯ ЭЭС В ТРЕХМЕРНОМ ПРОСТРАНСТВЕ

Представленные ранее методы визуализации данных могут быть весьма полезны, когда необходимо отобразить данные одного типа. Представляющая для диспетчера интерес информация может включать в себя как зависимые, так и независимые переменные, включая величины напряжения на шинах, загрузку линий электропередач, резервы мощности генерирующего оборудования, положения отпайек трансформаторов, прогнозные и фактические перетоки мощности между отдельными частями ЭЭС и т.д. При этом их динамическое отображение в рамках традиционно используемых двумерных вариантах визуализации сопряжено с ограничением как с точки зрения восприятия информации операторами программных комплексов, так и возможностями репрезентативного представления больших объемов данных, отражающих различные характеристики режима работы ЭЭС. Для более полного представления состояния ЭЭС в дополнение к традиционным двумерным моделям ЭЭС все чаще применяют отображение отдельных характеристик ЭЭС в трехмерном пространстве.

В [6] третье измерение (рис. 11) позволяет помимо информации о загрузке ЛЭП и направлении перетоков мощности динамически отобразить величину реактивной мощности, выдаваемой генерирующими установками, при этом высота цилиндров в узлах генерации пропорциональна выдаваемой реактивной мощности.

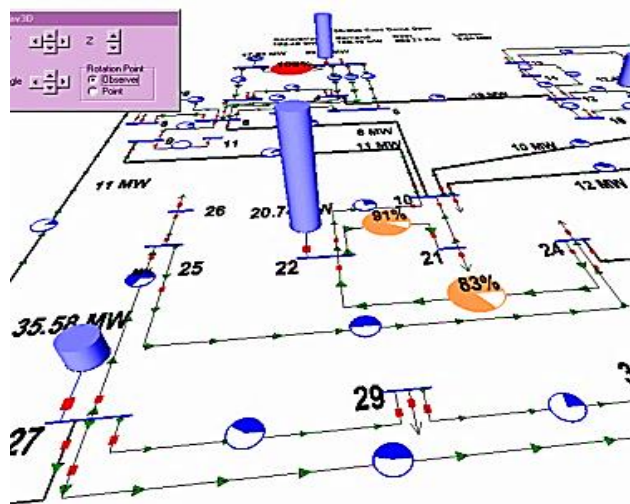


Рис. 11. Отображение величины выдаваемой реактивной мощности с использованием трехмерного отображения состояния ЭЭС

Стоит отметить, что распространение СВИ открывает ряд перспективных направлений для исследования в области визуализации данных. В [16] предлагается метод обработки данных СВИ на основе использования сингулярных чисел. Предлагаемый подход позволяет связать «входные» и «выходные» параметры ЭЭС. При этом в качестве входных данных принимаются меняющиеся во времени нагрузки/инъекции мощности в узлах, а в качестве выходных – измеренные значения углов и напряжений. Авторами предлагается подход, который позволяет отказаться от классической оценки состояния, а использовать вместо нее разложение по сингулярным числам матрицы данных СВИ для заданного промежутка времени, тем самым сокращая время для получения данных о текущем состоянии по системе в целом и, как следствие, снижая задержку между поступлением данных и их отображением. Меняя матрицу данных возможно отследить изменения поведения параметров системы в режиме реального времени. Однако отмечается, что точность метода во многом зависит от количества точек измерения СВИ. Кроме того, авторы отмечают, что большая часть измерений в энергосистеме обеспечивает лишь некое локализованное представление об условиях в конкретной точке электрической сети.

В [22] авторы предлагают использовать методы нелинейного анализа временных рядов, основанные на комбинированном применении разложения по эмпирическим модам и гильбертова анализа, для характеристики динамического поведения ЭЭС на основе СВИ. Результаты дают некоторое представление о природе временных спектральных вариаций характеристик, при этом данный метод эффективен для обнаружения и визуализации как колебательных, так и переходных процессов в энергосистеме, вызванных возмущениями.

Авторы в статье [23] описывают новый подход к оценке запаса устойчивости по напряжению на основе СВИ. Ими предлагается метод, основанный на использовании теоремы Тевенина и метода преобразования Мебиуса, для определения характеристики нагрузки в системе с последующим определением границы устойчивости по напряжению с помощью СВИ и ее представления в комплексном пространстве мощностей в реальном времени (рис. 12).

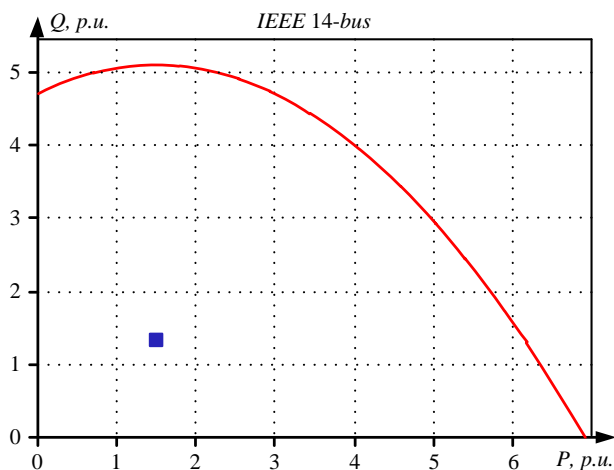


Рис. 12. Пример представления границы запаса устойчивости по напряжению

В [24] представлен метод кластеризации и визуализации данных СВИ, основанный на плотности пространственной кластеризации для приложений с шумами для визуализации и анализа данных ЭЭС. Метод помогает обнаруживать неверные данные, различные типы неисправностей, отклонения значений частоты, напряжения. Алгоритм выстраивает области с достаточно высокой плотностью однотипных данных в кластеры и обнаруживает кластеры произвольной формы в пространственных базах данных с шумом. Он определяет кластер как максимальное множество плотносвязанных точек, позволяя при этом анализировать большие объемы данных, характерные для СВИ. На рис. 13 и 14 представлены результаты выделения кластеров данных при нормальном режиме работы ЭЭС и при коротком замыкании. Полученные результаты могут быть использованы как при анализе ретроспективных данных в случае возникновения крупных возмущений, так и при мониторинге состояния системы в режиме реального времени.

В [25] представлена методология фильтрации доступных данных с целью формирования динамической модели системы в реальном времени и ее последующей визуализации. На основании полученной модели выполняется визуализация текущего состояния генерирующих установок (рис. 15), трехмерная модель показывает положение каждого генератора в соответствии с углом выбега ротора.

Кроме того, относительное значение скорости вращения ротора генератора (выше/ниже синхронной скорости) показано стрелками, которые пропорциональны числовому значению скорости, при этом обновление системы производится 60 раз в секунду, что при достаточном уровне внедрения УСВИ в системе позволяет достаточно подробно отображать текущее состояние генерирующего оборудования в системе в целом.

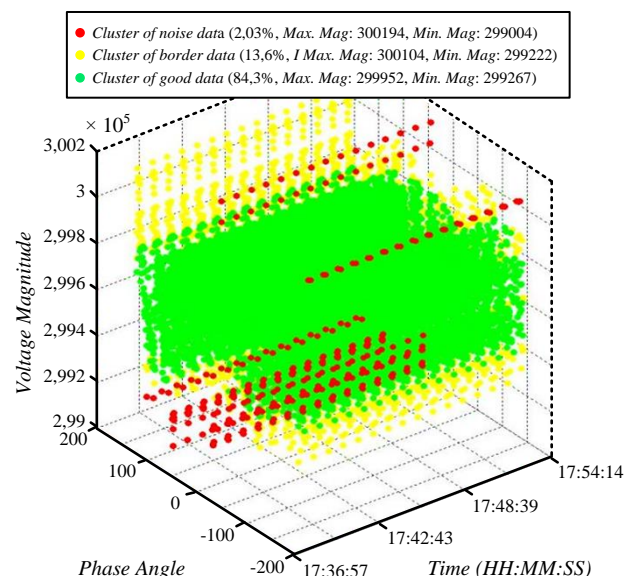


Рис. 13. Пример использования алгоритма кластеризации для данных СВИ в нормальном режиме

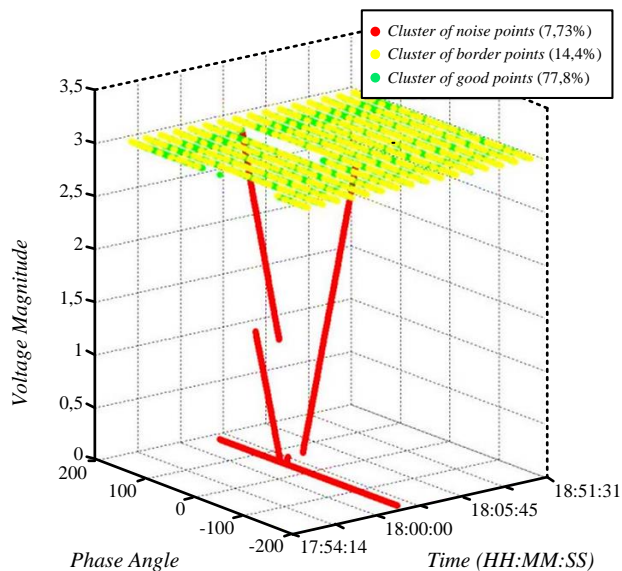


Рис. 14. Пример использования алгоритма кластеризации для данных СВВ в режиме короткого замыкания

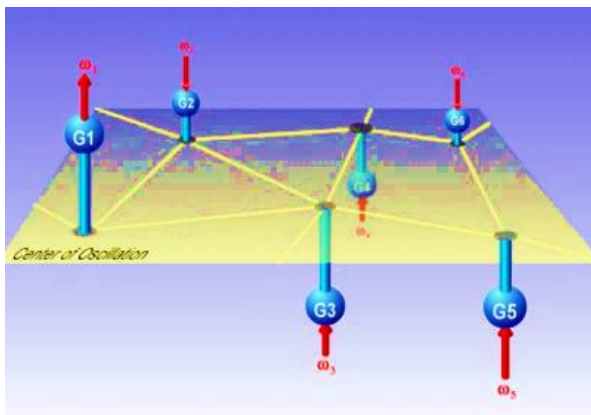


Рис. 15. Трехмерная модель визуализации текущего состояния генерирующих установок

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Современный уровень развития цифровой техники и информационных технологий позволяет передавать и обрабатывать в реальном масштабе времени значительные массивы информации, что обеспечивает возможность совершенствования систем мониторинга, защиты и управления режимами работы энергосистемы. При этом выбор отображаемых переменных наряду с алгоритмами обработки данных и способами их отображения играет решающую роль в процессе принятия решений в диспетчерских центрах. Одна из ключевых тенденций в области визуализации измерительной информации от УСВИ для диспетчерского персонала обусловлена повышением репрезентативности состояния системы за счет большей скорости обновления данных в рамках визуализируемой модели ЭЭС. Однако не менее важное направление связано с идентификацией аварийных состояний за счет обработки поступающих потоков данных от УСВИ в темпе процесса и последующим формированием аварийных сигналов для повышения ситуационной осведомленности оперативно-диспетчерского персонала в диспетчерских центрах и на отдельных объектах в рамках энергосистемы.

Представленные результаты являются итогом работ по теме «Разработка интеллектуальных алгоритмов управления энергосистемой на основе синхронизированных векторных измерений» в рамках комплексного проекта «Разработка систем управления энергосистемой с применением интеллектуальных алгоритмов и СМРР».

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Tate J.E. Event Detection and Visualization Based on Phasor Measurement Units for Improved Situational Awareness. Urbana, Illinois: University of Illinois at Urbana-Champaign, 2008.
2. Wang W. Advanced Wide-Area Monitoring System Design, Implementation, and Application. Knoxville: The University of Tennessee, 2021. 139 p.
3. Schlaepfer F., Kelly T.C., Dewey A.G. An Interactive Load Flow Program // IEEE Trans. Power Appar. Syst. 1972. Vol. PAS-91. Is. 1. Pp. 78-84. doi: 10.1109/TPAS.1972.293293.
4. Pires de Azevedo G., Sieckenius de Souza C., Feijo B. Enhancing the human-computer interface of power system applications // IEEE Trans. Power Syst. 1996. Vol. 11. Is. 2. Pp. 646-653. doi: 10.1109/59.496134
5. Weber J.D., Overbye T.J. Voltage contours for power system visualization // IEEE Trans. Power Syst. 2000. Vol. 15. Is. 1. Pp. 404-409. doi: 10.1109/59.852151
6. Visualization of Power Systems and Components. URL: https://pserc.wisc.edu/wp-content/uploads/sites/755/2018/08/S-18_Final-Report_Nov-2005.pdf. (дата обращения 02.04.2022)
7. An interactive, extensible environment for power system simulation on the PMU time frame with a cyber security application / T.J. Overbye, Z. Mao, K.S. Shetty, J.D. Weber // IEEE Texas Power and Energy Conference (TPEC). TX, USA: IEEE, 2017. Pp. 1-6. doi: 10.1109/TPEC.2017.7868264
8. Mahadev P.M., Christie R.D. Envisioning power system data: concepts and a prototype system state representation // IEEE Trans. Power Syst. 1993. Vol. 8. Is. 3. Pp. 1084-1090. doi: 10.1109/59.260890
9. Hock K.P., McGuinness D. Future State Visualization in Power Grid // IEEE International Conference on Environment and Electrical Engineering and IEEE Industrial and Commercial Power Systems Europe (IEEEIC / I&CPS Europe). Palermo: IEEE, 2018. Pp. 1-6. doi: 10.1109/IEEEIC.2018.8494435
10. Davis C.M., Tate J.E., Overbye T.J. Wide Area Phasor Data Visualization // 39th North Am. Power Symp. IEEE, 2007. Pp. 246-252. doi: 10.1109/NAPS.2007.4402318
11. Wide area power system visualization using real-time synchrophasor measurements / G. Zhang, S.Lee, R.Carroll, J.Zuo, L. Beard, Y. Liu // IEEE PES Gen. Meet. IEEE, 2010. Pp. 1-7. doi: 10.1109/PES.2010.5588188
12. Wide-area visualization tool development for displaying Thailand power grid dynamics / B. Sriraphanth, W. Wangdee, P. Phunkasem, B. Tanboonjit, S. Chumanvanichkul // International Electrical Engineering Congress (iEECON). Pattaya, Thailand: IEEE, 2017. Pp. 1-4. doi: 10.1109/IEECON.2017.8075748
13. Animated vectors for visualization of power system phenomena / J. Gronquist, W. Sethares, F.Alvarado, R. Lasseter // IEEE Trans. Power Syst. 1996. Vol. 11. Is. 1. Pp. 267-273. doi: 10.1109/59.486105
14. Design of Visualization Interface for Transmission Congestions / Y.-K Wu, X.C. Lee, C.Y. Hu, Po-En Su // Energy Procedia. 2017. Vol. 141. Pp. 432-437. doi: 10.1016/j.egypro.2017.11.056
15. Overbye T.J., Weber J. Smart Grid Wide-Area Transmission System Visualization // Engineering. 2015. Vol. 1. Is. 4. Pp. 466-474. doi: 10.15302/J-ENG-2015098

16. Using PMU Data to Increase Situational Awareness Final Project Report. https://documents.pserc.wisc.edu/documents/publications/reports/2010_reports/S-36_Final-Report_Sept-2010.pdf. (дата обращения 02.04.2022)
17. Advanced graphics zoom in on operations / M.D. Anderson, H.J. Pottinger, C.M. Schroeder, R. Adapa // IEEE Comput. Appl. Power. 1993. Vol. 6. Is. 2. Pp. 25-28. doi: 10.1109/67.207468
18. Human factor aspects of power system flow animation / D.A. Wiegmann, G.R. Essenberg, T.J. Overbye, Y. Sun // IEEE Trans. Power Syst. 2005. Vol. 20. Is. 3. Pp. 1233-1240. doi: 10.1109/TPWRS.2005.851967
19. Human factors aspects of power system voltage contour visualizations / D.A. Wiegmann, A.M. Rich, T.J. Overbye, Y. Sun // IEEE Trans. Power Syst. 2003. Vol. 18, Is. 1. Pp. 76-82. doi: 10.1109/TPWRS.2002.807060
20. Animated vectors for visualization of power system phenomena / J. Gronquist, W. Sethares, F. Alvarado, R. Lasse-ter // IEEE Trans. Power Syst. 1996. Vol. 11. Is. 1. Pp. 267-273. doi: 10.1109/59.486105
21. WAMS in the control room – a TSO perspective [Electronic resource]. URL: https://www.naspi.org/sites/default/files/2021-10/2021_oct_naspi_wg_keynote_rubesa.pdf. (дата обращения 02.04.2022)
22. Interpretation and Visualization of Wide-Area PMU Measurements Using Hilbert Analysis / A.R. Messina, V. Vittal, D. Ruiz-Vega, G. Enriquez-Harper // IEEE Trans. Power Syst. 2006. Vol. 21. Is. 4. Pp. 1763-1771. doi: 10.1109/TPWRS.2006.881153
23. Su H.-Y., Liu T.-Y. A PMU-Based Method for Smart Transmission Grid Voltage Security Visualization and Monitoring // Energies. 2017. Vol. 10(8). 1103. doi: 10.3390/en10081103
24. Using phasor data for visualization and data mining in smart-grid applications / A. Mukherjee, R. Vallakati, V. Lachenaud, P. Ranganathan // IEEE First Int. Conf. DC Microgrids (ICDCM). Atlanta, GA, USA: IEEE, 2015. Pp. 13-18. doi: 10.1109/ICDCM.2015.7152002
25. Visualization and Characterization of Stability Swings via GPS-Synchronized Data / G. Cokkinides, A. Sakis Meli-opoulos, G. Stefopoulos, R. Alaileh, A. Mohan // 40th Annual Hawaii International Conference on System Sciences (HICSS). Waikoloa, HI, USA: IEEE, 2007. Pp. 120-120. doi: 10.1109/HICSS.2007.607

Поступила в редакцию 21 марта 2022 г.

INFORMATION IN ENGLISH

DYNAMIC VISUALIZATION METHODS OF ELECTRIC POWER SYSTEM STATE BASED ON SYNCHRONIZED VECTOR MEASUREMENTS

Rustam T. Valiev

Ph.D. (Engineering), Associate Professor, Department of Automated Electric Systems, Ural Power Engineering Institute, Federal State Autonomous Educational Institution of Higher Education «Ural Federal University named after the first President of Russia B.N. Yeltsin», Yekaterinburg, Russia, <https://orcid.org/0000-0002-8603-3246>

Petr M. Erokhin

D.Sc. (Engineering), Professor, Full Professor Researcher, Department of Automated Electric Systems, Ural Power Engineering Institute, Federal State Autonomous Educational Institution of Higher Education «Ural Federal University named after the first President of Russia B.N. Yeltsin», Yekaterinburg, Russia

Andrey V. Pazderin

D.Sc. (Engineering), Professor, Head of the Department, Department of Automated Electric Systems, Ural Power Engineering Institute, Federal State Autonomous Educational Institution of Higher Education «Ural Federal University named after the first President of Russia B.N. Yeltsin», Yekaterinburg, Russia. E-mail: a.v.pazderin@urfu.ru, <https://orcid.org/0000-0003-4826-2387>

The use of synchronized vector measurement technology based on high-precision measurement of electrical regime parameters at various points of the EPS can significantly increase the observability of the processes occurring in the power system. Real-time visualization of the SVM makes it possible to achieve an increase in situational awareness of operational dispatch personnel, both in dispatch centers and at individual power system facilities, allowing responsible persons to respond faster to disturbances that arise in the system. The existing systems for data collection and operational dispatch control of both foreign and domestic manufacturers allow visualization of SVM both at the pace of the process and after the fact, keeping retrospective data, in case of disturbances in the EPS. The main visualization methods, as a rule, include: the use of contours (gradient display) of EPS characteristics (voltage angles, power flows in the system, etc.), the placement of pie charts and indicators to display bus voltage, load power lines, etc. and the use of combined indicators for displaying the direction of power flows in the system. Among the key trends in the field of visualization of measurement information for dispatching personnel, it is worth highlighting the increase in the representativeness of the system state due to a

higher data update rate within the framework of the visualized EPS model and the identification of emergency conditions due to the processing of incoming data streams from PMU at the pace of the process with subsequent alarm formation for the dispatcher.

Keywords: state assessment, synchronized vector measurements, EPS state visualization.

REFERENCES

1. Tate J.E. Event Detection and Visualization Based on Phasor Measurement Units for Improved Situational Awareness. Urbana. Illinois, University of Illinois at Urbana-Champaign, 2008.
2. Wang W. Advanced Wide-Area Monitoring System Design, Implementation, and Application. Knoxville, The University of Tennessee, 2021. 139 p.
3. Schlaepfer F., Kelly T.C., Dewey A.G. An Interactive Load Flow Program. IEEE Trans. Power Appar. Syst. 1972, vol. PAS-91, Is. 1, pp. 78-84. doi: 10.1109/TPAS.1972.293293
4. Pires de Azevedo G., Sieckenius de Souza C., Feijo B. Enhancing the human-computer interface of power system applications. IEEE Trans. Power Syst. 1996, vol. 11, Is. 2,

- pp. 646-653. doi: 10.1109/59.496134
5. Weber J.D., Overbye T.J. Voltage contours for power system visualization. IEEE Trans. Power Syst., 2000, vol. 15, Is. 1, pp. 404-409. doi: 10.1109/59.852151
6. Visualization of Power Systems and Components. Available at: https://pserc.wisc.edu/wp-content/uploads/sites/755/2018/08/S-18_Final-Report_Nov-2005.pdf (accessed 02 April 2022)
7. Overbye T.J., Mao Z., Shetye K.S., Weber J.D. An interactive, extensible environment for power system simulation on the PMU time frame with a cyber security application. IEEE Texas Power and Energy Conference (TPEC). IEEE, 2017, pp. 1-6. doi: 10.1109/TPEC.2017.7868264
8. Mahadev P.M., Christie R.D. Envisioning power system data: concepts and a prototype system state representation. IEEE Trans. Power Syst. 1993, vol. 8, Is. 3, pp. 1084-1090. doi: 10.1109/59.260890
9. Hock K.P., McGuinness D. Future State Visualization in Power Grid. IEEE International Conference on Environment and Electrical Engineering and IEEE Industrial and Commercial Power Systems Europe (IEEEIC / I&CPS Europe). IEEE, 2018, pp. 1-6. doi: 10.1109/IEEEIC.2018.8494435
10. Davis C.M., Tate J.E., Overbye T.J. Wide Area Phasor Data Visualization. 39th North Am. Power Symp. IEEE, 2007, pp. 246-252. doi: 10.1109/NAPS.2007.4402318
11. Zhang G., Lee S., Carroll R., Zuo J., Beard L., Liu Y. Wide area power system visualization using real-time synchrophasor measurements. IEEE PES Gen. Meet. IEEE, 2010, pp. 1-7. doi: 10.1109/PES.2010.5588188
12. Sriraphanth B., Wangdee W., Phunkasem P., Tanboonjit B., Chumnanvanichkul S. Wide-area visualization tool development for displaying Thailand power grid dynamics. International Electrical Engineering Congress (iEECON). IEEE, 2017, pp. 1-4. doi: 10.1109/IEEECON.2017.8075748
13. Gronquist J., Sethares W., Alvarado F., Lasseter R. Animated vectors for visualization of power system phenomena. IEEE Trans. Power Syst. 1996, vol. 11, Is. 1, pp. 267-273. doi: 10.1109/59.486105
14. Wu Y.-K., Lee X.C., Hu C.Y., Su Po-En. Design of Visualization Interface for Transmission Congestions. Energy Procedia, 2017, vol. 141, pp. 432-437. doi: 10.1016/j.egypro.2017.11.056
15. Overbye T.J., Weber J. Smart Grid Wide-Area Transmission System Visualization. Engineering, 2015, vol. 1, Is. 4, pp. 466-474. doi: 10.15302/J-ENG-2015098
16. Using PMU Data to Increase Situational Awareness Final Project Report. Available at: https://documents.pserc.wisc.edu/documents/publications/reports/2010_reports/S-36_Final-Report_Sept-2010.pdf (accessed 02 April 2022)
17. Anderson M.D., Pottinger H.J., Schroeder C.M., Adapa R. Advanced graphics zoom in on operations. IEEE Comput. Appl. Power, 1993, vol. 6, Is. 2, pp. 25-28. doi: 10.1109/67.207468
18. Wiegmann D.A., Essenberg G.R., Overbye T.J., Sun Y. Human factor aspects of power system flow animation. IEEE Trans. Power Syst. 2005, vol. 20, Is. 3, pp. 1233-1240. doi: 10.1109/TPWRS.2005.851967
19. Wiegmann D.A., Rich A.M., Overbye T.J., Sun Y. Human factors aspects of power system voltage contour visualizations. IEEE Trans. Power Syst. 2003, vol. 18, Is. 1, pp. 76-82. doi: 10.1109/TPWRS.2002.807060
20. Gronquist J., Sethares W., Alvarado F., Lasseter R. Animated vectors for visualization of power system phenomena. IEEE Trans. Power Syst. 1996, vol. 11, Is. 1, pp. 267-273. doi: 10.1109/59.486105
21. WAMS in the control room – a TSO perspective [Electronic resource]. Available at: https://www.naspi.org/sites/default/files/2021-10/2021_oct_naspi_wg_keynote_rubesa.pdf (accessed 02 April 2022)
22. Messina A.R., Vittal V., Ruiz-Vega D., Enriquez-Harper G. Interpretation and Visualization of Wide-Area PMU Measurements Using Hilbert Analysis. IEEE Trans. Power Syst. 2006, vol. 21, Is. 4, pp. 1763-1771. doi: 10.1109/TPWRS.2006.881153
23. Su H.-Y., Liu T.-Y. A PMU-Based Method for Smart Transmission Grid Voltage Security Visualization and Monitoring. Energies, 2017, vol. 10(8), 1103. doi: 10.3390/en10081103
24. Mukherjee A., Vallakati R., Lachenaud V., Ranganathan P. Using phasor data for visualization and data mining in smart-grid applications. IEEE First Int. Conf. DC Microgrids (ICDCM). IEEE, 2015, pp. 13-18. doi: 10.1109/ICDCM.2015.7152002
25. Cokkinides G., Sakis Meliopoulos A., Stefopoulos G., Alaileh R., Mohan A. Visualization and Characterization of Stability Swings via GPS-Synchronized Data. 40th Annual Hawaii International Conference on System Sciences (HICSS). IEEE, 2007, pp. 120-120. doi: 10.1109/HICSS.2007.607

Валиев Р.Т., Ерохин П.М., Паздерин А.В. Обзор методов динамической визуализации состояния электроэнергетических систем на основе синхронизированных векторных измерений // Электротехнические системы и комплексы. 2022. № 2(55). С. 47-54. [https://doi.org/10.18503/2311-8318-2022-2\(55\)-47-54](https://doi.org/10.18503/2311-8318-2022-2(55)-47-54)

Valiev R.T., Erokhin P.M., Pazderin A.V. Dynamic Visualization Methods of Electric Power System State Based on Synchronized Vector Measurements. *Elektrotechnicheskie sistemy i komplekсы* [Electrotechnical Systems and Complexes], 2022, no. 2(55), pp. 47-54. (In Russian). [https://doi.org/10.18503/2311-8318-2022-2\(55\)-47-54](https://doi.org/10.18503/2311-8318-2022-2(55)-47-54)