

СТАТИСТИЧЕСКИ РАВНОВЕСНЫЕ СОСТОЯНИЯ НАГРУЗКИ В ЗАДАЧЕ ИДЕНТИФИКАЦИИ СТАТИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК НАГРУЗКИ

А.С. Тавлинцев, А.А. Суворов

*Уральский федеральный университет им. первого Президента России Б.Н. Ельцина,
г. Екатеринбург*

Расчёт и анализ установившихся режимов энергосистем является одной из основных решаемых в процессе проектирования и эксплуатации электрических систем задач. При составлении алгебраических уравнений описания установившегося режима энергосистемы электрические нагрузки на подключенные к шинам подстанций моделируются в виде некоторого уравнения, связывающего номинальные параметры нагрузки и расчётные значения параметров установившегося режима. Задание в математической модели корректных уравнений нагрузки позволяет уменьшить погрешность оценки параметров установившегося режима.

В настоящей работе предлагается один из возможных подходов к выявлению массивов данных, относящихся к близким статическим характеристикам нагрузки по напряжению. Предложено понятие статистически равновесного состояния нагрузки для решения задачи идентификации статической характеристики нагрузки. Обсуждается дальнейшее направление развития данной идеи в части обработки экспериментальных данных.

Ключевые слова: статическая характеристика нагрузки, статическая характеристика нагрузки по напряжению, регулирующий эффект нагрузки.

Введение

Под установившимся режимом энергосистемы понимают такой режим, при котором параметры энергосистемы в комплексной форме практически не изменяются в течение времени. Это позволяет при расчётах установившихся режимов (УР) перейти от решения систем дифференциальных уравнений к решению систем алгебраических уравнений.

Математическое моделирование электрической нагрузки в задаче расчёта и анализа УР сопряжено с рядом трудностей, связанных с выбором оптимального вида модели и оценкой параметров выбранной модели. Обычно выбор того или иного вида математической модели нагрузки зависит от поставленных целей расчётных и аналитических задач. Существенное влияние на результаты выбора вида математической модели нагрузки могут оказать имеющиеся в распоряжении эксперта данные, на базе анализа которых можно принять решение в пользу той или иной модели и выполнить оценку параметров этой модели.

В общем случае, если составить уравнения УР внутренней электрической системы узла нагрузки в количестве, необходимом для учёта каждого отдельного электроприёмника и электрической связи между ними, то можно получить исчерпывающие сведения о параметрах УР. Следовательно, возможно вычислить потребление активной и реактивной мощности узла нагрузки в зависимости от расчётных значений параметров УР. Однако для достаточно крупных узлов нагрузки число таких

уравнений может быть значительным, и практическое применение такого подхода для расчёта величины потребляемой мощности узлом нагрузки представляется затруднительным. Следует также отметить, что даже если составить такую систему уравнений, то выполнить сбор информации о режимах работы каждого отдельного электроприёмника практически неосуществимо. Это обусловлено не столько трудностями сбора и передачи информации, сколько значительной неопределённостью в прогнозе режима работы отдельных электроприёмников.

Отсюда логично было предположить, что с увеличением количества электроприёмников в составе узла нагрузки должна существенно возрастать сложность и неопределённость свойств электрической системы и, как следствие, не представляется возможности при анализе графика изменения потребляемой мощности совместно с уровнем питающего напряжения найти какую-либо закономерность. Однако в действительности при весьма большом количестве электроприёмников проявляются новые закономерности.

Эти закономерности обусловлены именно наличием большого числа отдельных электроприёмников, каждый из которых имеет свой график потребления электрической энергии в зависимости от суточного ритма жизнедеятельности людей, и не могут быть сведены к чисто электрическим системам уравнений. Специфической особенностью здесь является то, что эти закономерности теряют значимость при переходе к рассмотрению электрических систем небольшой размерности, с не-

большим числом электроприёмников (иначе – с небольшим числом степеней свободы). Таким образом, несмотря на то, что величина потребления мощности узла нагрузки в зависимости от уровня питающего напряжения подчиняется тем же законам электротехники, что и электрические системы с небольшим числом электроприёмников, наличие большего числа степеней свободы как раз и приводит к появлению качественно новых закономерностей.

Актуальность и научная значимость вопроса

Наиболее достоверные статические характеристики обычно получают на основе экспериментальных данных. Решению проблемы обработки экспериментальных данных посвящено достаточно большое количество работ [1–7].

В процессе обработки экспериментальных данных возникает целый ряд вопросов, которые требуют тщательной проработки. К таким вопросам можно отнести оценку погрешности и доверительного интервала идентифицированных уравнений статических характеристик нагрузки (СХН), оценку практической применимости полученных уравнений, а также разработку алгоритмов обработки данных измерений. При этом одна из наиболее важных задач здесь – установление области применимости результатов анализа экспериментальных данных при идентификации СХН узла нагрузки.

Определение статистически равновесного состояния нагрузки

Необходимость постановки и решения задачи обобщения конкретных расчётно-экспериментальных результатов идентификации математической модели нагрузки, полученных в процессе проведения натурных экспериментов, при определённых значениях различных влияющих факторов, на другие интервалы времени представляет значительную трудность. Это обусловлено в значительной степени тем, что единичный эксперимент даёт результат, описывающий процессы, происшедшие в данном фрагменте энергосистемы в момент времени его выполнения. Вследствие этого полученный на основе единичного эксперимента результат может представлять низкую практическую ценность.

С целью решения проблемы распространения результатов идентификации математической модели нагрузки на другие моменты времени исследования установившихся режимов данного фрагмента энергосистемы в настоящей работе предлагается ввести понятие *статистически равновесного состояния* СХН. Переходя к рассмотрению сущности статистически равновесного состояния нагрузки, необходимо ввести также понятие *фазового пространства*.

Пусть рассматриваемая электрическая система имеет S степеней свободы, иначе – уровень электропотребления характеризуется S обобщёнными координатами q_i , где индекс i изменяется от 1 до S . Тогда можно считать, что в данный момент времени состояние этой системы будет определяться значениями S координат q_i . Пусть исследуемая энергосистема содержит N узлов нагрузки. При этом каждый j узел нагрузки имеет своё собственное фазовое пространство, число измерений s_j которого соответствует количеству параметров отдельных электроприёмников, формирующих данный узел нагрузки. Каждая точка этого фазового пространства соответствует определённому сочетанию режимов работы каждого отдельного электроприёмника. С течением времени режимы работы отдельных электроприёмников изменяются, соответственно – изображающая состояние системы точка фазового пространства будет описывать в нём некоторую линию.

Рассмотрим теперь некоторый j узел нагрузки, а именно его внутреннюю электрическую систему. Допустим, что шины бесконечной мощности соответствуют питающим шинам данного узла нагрузки. Выделим условно из этой внутренней электрической системы некоторую достаточно малую, по сравнению со всей системой, часть, но при этом содержащую весьма большое количество отдельных электроприёмников. Такие относительно малые части внутренней электрической системы узла нагрузки назовём *подсистемами*.

Каждая подсистема, в свою очередь, также электрическая система, испытывающая воздействия со стороны соседних подсистем. Вследствие огромного числа степеней свободы остальных подсистем их взаимодействия будут иметь достаточно сложный характер. По причине этого состояние каждой подсистемы будет изменяться в течение времени весьма сложным образом.

Точную оценку параметров УР каждой подсистемы возможно выполнить только путём расчёта для всей внутренней электрической системы узла нагрузки с учётом напряжения на питающих шинах, что, как уже отмечалось ранее, связано с рядом трудностей. С другой стороны, сложный процесс изменения состояния подсистем, который делает практически неприменимыми известные методы расчёта параметров УР, даёт возможность подойти к решению данной задачи с использованием методов математической статистики.

Основной идеей этого подхода является то, что, в силу сложности взаимодействия подсистем, за достаточно длительный промежуток времени выделенная подсистема узла нагрузки побывает во всех возможных своих состояниях.

Существенным для статистического анализа является то обстоятельство, что статистическое распределение параметров данной подсистемы узла нагрузки не зависит от начального состояния

какой-либо другой подсистемы того же узла нагрузки. Это является следствием того факта, что влияние начального состояния будет в течение достаточно большого промежутка времени совершенно нивелировано влиянием остальных, гораздо более обширных частей системы. Более того, статистическое распределение не зависит также от начального состояния самой выделенной подсистемы, поскольку она со временем проходит через все возможные состояния, причём каждое из них может быть выбрано в качестве начального. В связи с этим статистическое распределение для подсистем можно найти, не решая задачи оценки параметров УР всей системы.

Поиск статистического распределения для любой подсистемы узла нагрузки и будет являться основной задачей статистического анализа. При этом необходимо отметить, что исследуемый узел сам является подсистемой большой энергосистемы.

Если указанная задача решена и статистическое распределение подсистемы известно, то можно определить вероятности различных значений параметров УР. Также становится возможным вычислить среднее значение любого параметра, получающееся путём умножения его возможных значений на соответствующие вероятности и интегрирования по состояниям.

Вычисление среднего значения с помощью функции распределения практически исключает необходимость отслеживания изменения истинного значения параметра q_i во времени с целью определения его среднего значения.

Необходимо отметить, что вероятностный характер полученных результатов не лежит в самой природе функционирования отдельных электро-

приёмников, а связан лишь с недостаточным количеством информации, которая потребовалась бы для решения задачи оценки параметров УР внутренней электрической системы узла нагрузки.

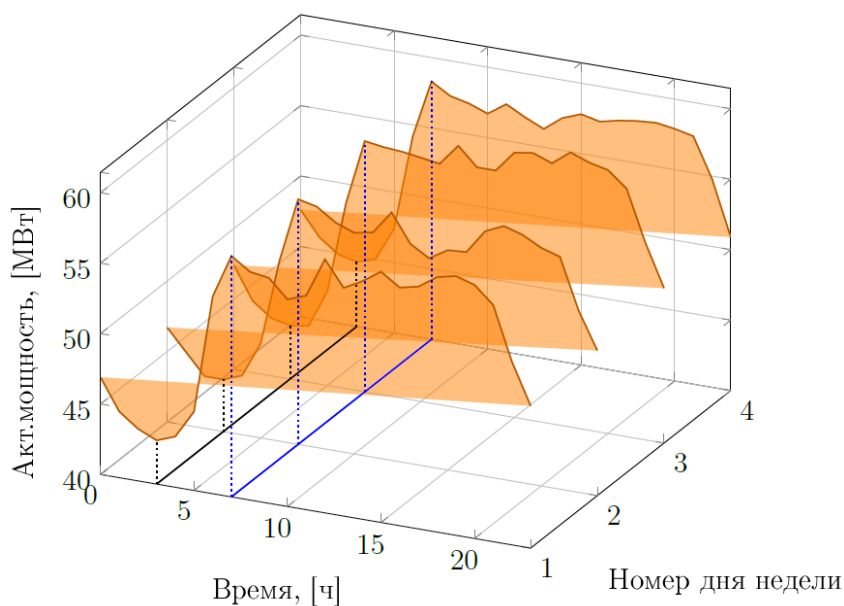
Вследствие ритмичности электропотребления (суточной, недельной, годовой) проблему недостатка данных измерений параметров режима для одного и того же статистически равновесного состояния можно решить путём группировки данных измерений за однотипные сутки для одних и тех же интервалов времени, как представлено на рисунке. При этом если для одного и того же небольшого интервала времени однотипных дней недели группировать измерения напряжения, активной и реактивной мощности, то эти величины будут меняться слабо и очень редко будут испытывать заметные отклонения. При этом речь идёт о параметрах, описывающих исследуемый узел нагрузки в целом, а не его отдельные подсистемы.

Такая группировка данных измерений может предоставить несколько новых возможностей:

- использование текущих замеров параметров электрического режима для идентификации и (или) верификации СХН;
- оценка временных интервалов применимости идентифицированных СХН;
- поставка и решение задачи прогнозирования СХН.

Проблема неоднозначности статических характеристик нагрузки

Одной из основных проблем при решении задачи идентификации математической модели нагрузки является их неоднозначность. Под неоднозначностью в данном случае понимается соответ-



Пример суточных графиков нагрузки для шин 6 кВ ПС 110/35/6 кВ, питающей коммунально-бытовую нагрузку (60 %) и промышленную нагрузку (40 %)

стве одному и тому значению суммарной мощности, потребляемой узлом нагрузки, и модулю питающего напряжения множества СХН.

Природа этой неопределённости кроется в том, что при выполнении практических расчётов в качестве исходной информации выступают массивы измерений напряжения, активной и реактивной мощности, потребляемой данным узлом нагрузки. Эти данные измерений по своей сути являются агрегированными параметрами, описывающими электрический режим во внутренней электрической сети комплексного узла нагрузки. При этом отсутствует взаимно однозначное соответствие между параметром – агрегатором и его компонентами. В общем случае без привлечения дополнительной информации о режимах работы единичных электроприёмников и включённом состоянии внутренних сетевых элементов комплексного узла нагрузки уменьшить эту неопределённость не представляется возможным.

Это можно проиллюстрировать на примере активной мощности. Пусть P_i – активная мощность, потребляемая i -м узлом нагрузки в момент времени t . Тогда можно записать

$$P_i = \sum_{j=1}^{H_i} p_j + \sum_{k=1}^{M_i} \Delta p_k(\{p_j\}),$$

где P_i – активная мощность i -го узла нагрузки; p_j – мощность потребляемая j -м электроприёмником в составе i -го узла нагрузки; $\Delta p_k(\{p_j\})$ – потери активной мощности в k -м внутреннем сетевом элементе узла нагрузки; H_i – количество единичных электроприёмников в i -м узле нагрузки; M_i – количество внутренних сетевых элементов i -го узла нагрузки.

Следовательно, подбирая различные сочетания мощностей единичных электроприёмников $\{p_j\}$, с учётом потерь $\Delta p_k(\{p_j\})$ можно добиться того, что параметр P_i будет постоянным. Это эквивалентно некоторой поверхности в фазовом подпространстве электрических параметров узла нагрузки. При этом каждой точке этой поверхности будет соответствовать своя уникальная статическая характеристика нагрузки по напряжению. Вследствие того, что данная поверхность является непрерывной, то мощность множества СХН будет равна мощности континуума. Другим словами каждому конкретному значению активной мощности P_i при данном уровне напряжения на питающих шинах соответствует бесконечное количество СХН.

В такой постановке решение задачи идентификации СХН на основе экспериментальных данных нецелесообразно, так как результаты оценки параметров математической модели нагрузки для каждой точки этой поверхности будут уникальными. Это обусловлено тем, что оценка параметров

УР для всех возможных комбинаций включённого состава единичных электроприёмников и режимов их работы, а также состояния сетевых элементов не представляется осуществимой на основе экспериментальных данных.

С другой стороны, при наличии достаточно большого количества измерительной информации практическую значимость приобретает задача идентификации некоторой наиболее вероятной СХН по напряжению для статистически равновесных состояний узла нагрузки. С этой точки зрения СХН по напряжению приобретает вероятностный смысл. Тогда для решения задачи идентификации математической модели нагрузки необходимо находить в массивах измерительной информации такие статистически равновесные состояния параметров комплексного узла нагрузки, при этом не рассматривая периоды релаксации (интервалы времени перехода от одного статистически равновесного состояния к другому).

При достаточном количестве исходной информации о данном статистически равновесном состоянии становится возможным разработать алгоритм для идентификации математической модели нагрузки и оценки доверительных интервалов данной модели. Это ставит перед исследователем несколько новых задач:

- прогнозирование вида и параметров математической модели нагрузки на основе уже известных данных измерений агрегированных параметров установившегося режима комплексного узла нагрузки;
- оценка доверительных интервалов идентифицированной математической модели нагрузки;
- разработка алгоритмов статистической идентификации математической модели нагрузки.

Заключение

В настоящее время основными способами получения достоверной информации о виде математической модели нагрузки являются экспериментальные исследования в реальных энергосистемах. В процессе натурных экспериментов данные измерений могут быть получены как в ходе активного вмешательства исследователя в нормальный ритм функционирования энергосистемы, так и пассивное наблюдение за текущими параметрами режима работы отдельных элементов энергосистемы.

В процессе обработки данных измерительной информации необходимо выявить статистически равновесные состояния параметров узлов нагрузки. Для выявления статистически равновесных состояний узлов нагрузки представляется возможным использовать математические методы кластеризации данных.

Исследование статистически равновесных состояний нагрузки предоставляет возможность для оценки доверительных интервалов полученных статических характеристик нагрузки и формиро-

вания критериев возможности распространения полученных результатов на другие интервалы времени и области напряжений.

В случае если статистически равновесные состояния узлов нагрузки имеют суточную (недельную, годовую) цикличность, то становится возможным осуществить постановку и решение задачи прогнозирования вида и коэффициентов математической модели нагрузки. Результаты полученные в процессе выполнения прогнозов можно практически использовать для выполнения расчётов УР для решения проектных и эксплуатационных задач.

Литература

1. W. G. C4.605. *Modeling and Aggregation of Loads in Flexible Power Networks*. – 2014.
2. Горбунова, Л.М. *Экспериментальные исследования режимов энергосистем* / Л.М. Горбунова, М.Г. Портной, Р.С. Рабинович. – М.: Энергоатомиздат, 1985. – 448 с.
3. Панкратов, А.В. *Экспериментальное определение статических характеристик нагрузки электроэнергетических систем* / А.В. Панкратов, В.И. Полищук, Н.Л. Бацева // *Вестник ЮУрГУ*.

Серия «Энергетика». – 2015. – Т. 15, № 1. – С. 11–20.
DOI: 10.14529/power150102

4. *Учет статических характеристик нагрузки при расчетах режимов энергосистем* / Д.Н. Дадонов, В.Г. Гольдштейн, Е.А. Кротков, М.М. Птичкин // *Известия высших учебных заведений. Электромеханика*. – 2011. – № 3. – С. 35–37.

5. Фишов, А.Г. *Использование спорадических нарушений режима для определения крутизны статических характеристик узлов нагрузок* / А.Г. Фишов, Д.А. Мышлянников // *Научные проблемы транспорта Сибири и Дальнего Востока*. – 2014. – № 3. – С. 176–180.

6. *Определение статических характеристик нагрузки по напряжению в электрических сетях с комплексной нагрузкой* / А.А. Шульпин, А.Ю. Мурзин, О.А. Бушуева и др. // *Вестник Ивановского государственного энергетического университета*. – 2014. – № 6. – С. 22–30.

7. *Методика идентификации статических характеристик нагрузки по результатам активного эксперимента* / А.В. Панкратов, Ю.В. Хрущев, Н.Л. Бацева, В.И. Полищук, А.С. Тавлинцев // *Известия Томского политехнического университета*. – 2014. – № 4 (325). – С. 164–175.

Тавлинцев Александр Сергеевич, магистр техники и технологии, старший преподаватель, кафедра «Электрические системы и сети», Уральский федеральный университет им. первого Президента России Б.Н. Ельцина, г. Екатеринбург; a.s.tavlintsev@urfu.ru.

Суворов Антон Алексеевич, канд. техн. наук, доцент, кафедра «Электрические системы и сети», Уральский федеральный университет им. первого Президента России Б.Н. Ельцина, г. Екатеринбург; anton.suvorov@urfu.ru.

Поступила в редакцию 27 марта 2017 г.

DOI: 10.14529/power170203

STATISTICALLY EQUILIBRIUM STATES OF LOAD IN THE PROBLEM OF STATIC LOAD CHARACTERISTICS IDENTIFICATION

A.S. Tavlintsev, a.s.tavlintsev@urfu.ru,

A.A. Suvorov, anton.suvorov@urfu.ru

*Ural Federal University named after the first President of Russia B.N. Yeltsin,
Ekaterinburg, Russian Federation*

Calculation and analysis of the power grids steady-state modes is one of the main problems addressed in the process of electrical systems design and operation. When formulating algebraic equations for the steady-state power system description, electrical loads connected to the substation buses of the are modeled in the form of some equation linking the nominal load parameters and the calculated values of steady-state parameters. The task in the correct mathematical model equations of load allows one to reduce the error estimation of power system steady-state parameters.

In this paper we propose one possible approach to identify data sets pertaining to close static characteristics of the load voltage. The article proposed the concept for a statistically equilibrium load state to solve the problem of static load characteristics identification. The paper discussed the future direction for the idea development in terms of experimental data processing.

Keywords: static load characteristics, static load characteristics of voltage, power regulation coefficient of load.

References

1. C4.605 W. G. Modeling and Aggregation of Loads in Flexible Power Networks. 2014.
2. Gorbunova L.M., Portnoy M.G., Rabinovich R.S. *Eksperimental'nye issledovaniya rezhimov energosistem* [Experimental Power System Research]. Moscow. Energoatomizdat Publ., 1985. 448 p.
3. Pankratov A.V., Polishchuk V.I., Batseva N.L. [Measurement-based Approach for Identification of Static Load Models of Electric Power Systems]. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Power Engineering*, 2015, vol. 15, no. 1, pp. 11–20. (in Russ.). DOI: 10.14529/power150102
4. Dadonov D.N., Goldshteyn V.G., Krotkov E.A., Ptichkin M.M. [Accountability of Static Load Models in Calculation of Electrical Power System Modes]. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Electromekhanika* [The Bulletin of Higher Education Establishment. Electro mechanics], 2011, no. 3, pp. 35–37. (in Russ.)
5. Fishov A.G., Myshlyannikov D.A. [Application of Sporadic Modes Disturbances for Identification of Static Load Model Steepness]. *Nauchnye problemy transporta Sibiri i Dalnego Vostoka* [Research Issues of Siberia and Russian Far East Transport], 2014, no. 3, pp. 176–180. (in Russ.)
6. Shul'pin, A.A., Murzin A.Yu., Bushueva O.A., Kuleshov A.I., Baldov S.V., Meshkova Yu. S., Kormilitsyn D.N. [Identification of Static Load Models in Electrical Networks with a Complex Load]. *Vestnik Ivanovskogo gosudarstvennogo energeticheskogo universiteta* [The Bulletin of Ivanovo State Power Engineering University], 2014, no. 6, pp. 22–30. (in Russ.)
7. Pankratov A.V., Khrushchev Yu.V., Batseva N.L., Polishchuk V.I., Tavlintsev A.S. [Technique for Load Static Characteristics Identifying Based on Experimental Data]. *Izvestiya Tomskogo politekhnicheskogo universiteta* [The Bulletin of Tomsk Polytechnic University], 2014, no. 4 (325), pp. 164–175.

Received 27 March 2017

ОБРАЗЕЦ ЦИТИРОВАНИЯ

Тавлинцев, А.С. Статистически равновесные состояния нагрузки в задаче идентификации статических характеристик нагрузки / А.С. Тавлинцев, А.А. Суворов // Вестник ЮУрГУ. Серия «Энергетика». – 2017. – Т. 17, № 2. – С. 23–28. DOI: 10.14529/power170203

FOR CITATION

Tavlintsev A.S., Suvorov A.A. Statistically Equilibrium States of Load in the Problem of Static Load Characteristics Identification. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Power Engineering*, 2017, vol. 17, no. 2, pp. 23–28. (in Russ.) DOI: 10.14529/power170203