

ISSN 2664-5289

ELECTRO

SCIENTIFIC-INDUSTRIAL JOURNAL

ENERGETICS
TECHNICS
MECHANICS
+ CONTROL



Volume 11, No.1

BAKU 2021



ELECTROENERGETICS, ELECTROTECHNICS ELECTROMECHANICS + CONTROL

Scientific – Industrial Journal

Editor in-Chief

Yusibayli Nurali (Baku, Azerbaijan)

Deputy Editors in-Chief

Valiyev Vilayat (Baku, Azerbaijan)
Huseynov Asaf (Baku, Azerbaijan)

International Advisory Board

Babanli Mustafa (Baku, Azerbaijan)
Hashimov Arif (Baku, Azerbaijan)
Aliyev Telman (Baku, Azerbaijan)
Kumbaroglu Gurkan (USA)
Voropay Nikolay (Russia)

Arif Mehtiyev (Baku, Azerbaijan)

Aliguliyev Rasim (Baku, Azerbaijan)

Chetin Elmas (Turkey)

Ayuyev Boris (Russia)

Ozdemir Aydogan (Istanbul, Turkey)

Editorial Board

Aliyev Aydin (Baku, Azerbaijan)
Ahmadov Elbrus (Baku, Azerbaijan)
Abdullayev Kamal (Baku, Azerbaijan)
Agamaliyev Mukhtar (Baku, Azerbaijan)
Aliyev Fikret (Baku, Azerbaijan)
Abullayev Yashar (Baku, Azerbaijan)
Dimirovski Georgi (Skopje, Macedonia)
Izykowski Jan (Poland)
Ilyushin Pavel (Russia)
Farhadzadeh Elmar (Baku, Azerbaijan)
Guliyev Askar (Baku, Azerbaijan)

Guliyev Huseyngulu (Baku, Azerbaijan)

Hasanov Zakir (Baku, Azerbaijan)

Lazimov Tahir (Baku, Azerbaijan)

Musayev Musavar (Baku, Azerbaijan)

Nasibov Valeh (Baku, Azerbaijan)

Nurubayli Zulfugar (Baku, Azerbaijan)

Rajabli Kamran (USA)

Rahmanov Nariman (Baku, Azerbaijan))

Tabatabaei Naser (Iran)

Yerokhin Pyotr (Russia)

Executive Editors

Babayeva Aytek (Baku, Azerbaijan)
Yusibayli Fidan (Baku Azerbaijan)

Editorial Assistants

Huseynli Ferid (Baku, Azerbaijan)
Marufov Ilkin (Baku, Azerbaijan)

COMPARATIVE PERFORMANCE ANALYSIS OF VSA AND GWO TECHNIQUES FOR LOAD FREQUENCY CONTROL OF SINGLE AREA FUEL CELL MICROGRID

Saka M.¹, Gozde H.², Eke I.³, Yusifbayli N.⁴, Taplamacioglu M.C.¹

¹ Gazi University, Engineering Faculty, Electrical and Electronics Engineering Department, Ankara, Turkey

² National Defense University, Military Academy, Electronics and Communication Engineering Department, Ankara, Turkey

³ Kirikkale University, Faculty of Engineering and Architecture, Electrical and Electronics Engineering Department, , Kirikkale, Turkey,

⁴ Azerbaijan Technical University, Vice Rector, Baku, Azerbaijan

Abstract. In this paper, the frequency control of a single area micro grid system is studied. Recently, the dynamic performance of micro-grid systems can be enhanced by effective load frequency control which is one of the most important aspects. The system having a fuel cell, micro turbine, diesel generator, battery energy storage system and flywheel energy storage system is modeled. To optimize the dynamic performance of the system, Vortex Search Algorithm (VSA) and Grey Wolf Optimizer (GWO) are used. Additionally, a cascade PD-PI controller is also applied to the system for enhancing the performance. The results are analyzed with respect to overshoot, undershoot and settling time. It can be clearly observed from the results that GWO algorithm provides better system performance for selected micro-grid system.

Keywords: Load frequency control, micro grid, vortex search algorithm, grey wolf optimizer

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ЭФФЕКТИВНОСТИ МЕТОДОВ VSA И GWO ДЛЯ КОНТРОЛЯ ЧАСТОТЫ НАГРУЗКИ ОДНОЗОННОГО ТОПЛИВНОГО ЭЛЕМЕНТА МИКРОСЕТЕВОЙ СИСТЕМЫ

Сака М.¹, Гозде Х.², Еке И.³, Юсифбейли Н.⁴, Тапламаджиоглы М.Дж.¹

¹Университет Гази, Инженерный факультет, Кафедра электротехники и электроники, Анкара, Турция

²Национальный Университет Обороны, Военная Академия, Факультет электроники и связи, Анкара, Турция

³Университет Кырыккале, Факультет инженерии и архитектуры, Кафедра электротехники и электроники, Кырыккале, Турция,

⁴Азербайджанский Технический Университет, проректор, Баку, Азербайджан

В данной статье рассматривается частотное регулирование отдельной микросетевой системы. В последнее время динамические характеристики микросетевых систем могут быть улучшены за счет эффективного управления частоты нагрузки, что является одним из наиболее важных аспектов.

Смоделирована система, имеющая топливный элемент, микротурбину, дизельный генератор, аккумуляторную систему накопления энергии и систему маховичного накопителя

энергии. Для оптимизации динамических характеристик системы используются алгоритм поиска вихрей (VSA) и оптимизатор серого волка (GWO). Кроме того, для повышения производительности в системе также применяется каскадный контроллер PD-PI. Результаты анализируются относительно времени перерегулирования, недорегулирования и установления. Из результатов ясно видно, что алгоритм GWO обеспечивает лучшую производительность системы для выбранной микросетевой системы.

Ключевые слова: контроль частоты нагрузки, микросетевая система, алгоритм поиска вихрей, оптимизатор серого волка

Introduction: Conventional electrical power systems are mainly consist of large number of components. Therefore, transmission of generated power from generation units to the over distance last consumer reduces the transmission efficiency [1]. In parallel, these power systems mostly use fossil fuels to provide as energy resources. The transfer of energy to long distances causes an increase in the fossil fuels used as well.

In the globalizing world, traditional power systems are gradually being replaced by modern power systems [2,3]. Micro-grid systems can be considered as modern power systems. These systems usually contain non-fossil source (such as fuel cell, battery systems) and renewable energy sources (such as wind turbines, solar panels).

As with conventional power systems, load frequency control is also a very important requirement for micro-grid systems. The main objective of load frequency control can be considered as follows;

- 1) Keep the system frequency specific band width limits [4],
- 2) Deviation of frequency made zero or closest to zero [5],

In this study, VSA [6] and GWO [7] are applied to the selected micro-grid system to optimize load frequency control performances of the system. The frequency deviation obtained by both algorithms are compared in terms of overshoot, undershoot and settling times. Moreover, cascade PD-PD controller is used in these analyzes. This controller type consists of combination of PD controller and PI controller.

This paper is organized as follows: In section 2, micro-grid model for load frequency control, VSA and GWO are briefly mentioned. In section 3, obtained results are illustrated. In section 4, Conclusions are given.

Material and Methods

I. Micro grid model for load frequency control: Load frequency control is essential control for micro grid power systems. The micro grid model used in this study is given in Figure 1. This model have micro turbine block, diesel generator block, battery energy storage system (BESS) block, flywheel energy storage system (FESS) block, micro grid (MG) system block, fuel cell, inverter block, connection device block and droop characteristic block.

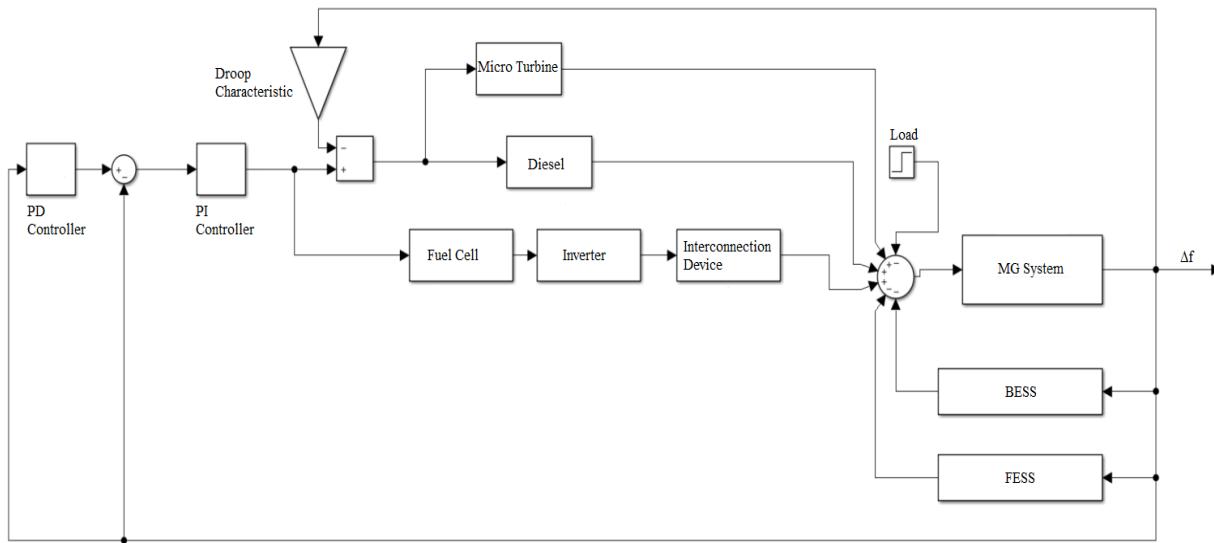


Fig. 1. Micro grid model for LFC analyzes

In this model, PD controller can be defined as follows:

$$PD = k_{pd} + sk_d \quad (1)$$

Where, k_{pd} and k_d proportional and derivative gain of PD controller. PI controller can be defined as follows:

$$PI = k_{pi} + \frac{k_i}{s} \quad (2)$$

Where, k_{pi} and k_i proportional and integral gain of PI controller. Drop characteristic can be defined as follows:

$$\text{Drop Characteristic} = \frac{1}{R} \quad (3)$$

Micro turbine can be defined as follows [8]:

$$\frac{1}{1+sT_{MT}} \quad (4)$$

Where, T_{MT} is time constant of micro turbine. Diesel can be defined as follows [8]:

$$\frac{1}{1+sT_D} \quad (5)$$

Where, T_D is time constant of diesel. Fuel cell can be defined as follows [2]:

$$\frac{1}{1+sT_{FC}} \quad (6)$$

Where, T_{FC} is time constant of fuel cell. Inverter can be defined as follows [2]:

$$\frac{1}{1+sT_I} \quad (7)$$

Where, T_I is time constant of inverter. Connection device can be defined as follows [2]:

$$\frac{1}{1+sT_{CD}} \quad (8)$$

Where, T_{CD} is time constant of connection device. MG system can be defined as follows [2]:

$$\frac{1}{Ms+D} \quad (9)$$

Where, M is inertia constant and D is damping coefficient respectively. BESS can be defined as follows [8]:

$$\frac{1}{1+sT_{BESS}} \quad (10)$$

Where, T_{BESS} is time constant of battery energy storage system. FESS can be defined as follows [2]:

$$\frac{1}{1+sT_{FESS}} \quad (11)$$

Where, T_{FESS} is time constant of flywheel energy storage system. In this study, ITSE (integral time square error) is used as objective function in GWO and VSA techniques. ITSE can be defined as following equation:

$$ITSE = \int (time \times (error)^2) dt \quad (12)$$

II. Vortex Search Algorithm: VSO is developed by B. Dogan and T. Olmez in 2014 [6]. This algorithm has good balance between exploration and exploitation behavior. For this reason, the optimal results can be reliably found. The shape of the mixed liquids inspired the development of the VSA [6].

In this technique, candidate solutions are formed in the first circuit. All candidate solutions are controlled for the problem and the best one (iteration best) is determined from these and defined as global best solution. Founded iteration best solution is defined as the center of the next circuit. After then, radius of the circuit is decreased. New iteration best solution is compared with the previous best iteration's

solution. If new iteration best solution has minimum value rather than previous best iteration solution, new iteration best solution is defined as global best solution.

This process continues until the termination criterion is met. Basically flow diagram of VSA is illustrated in Figure 2.

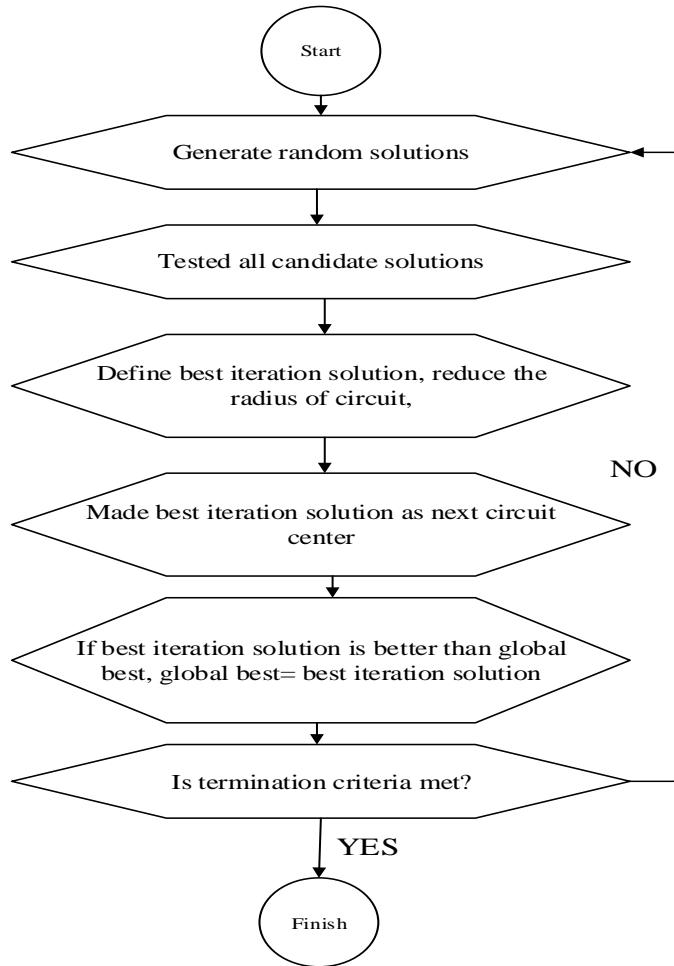


Fig. 2. Flow chart of VSA

III. Grey Wolf Optimizer: GWO is developed by S. Mirjalili et al. in 2014 [7]. This technique has very good capability to search of parameter space. Grey wolves are inspired the development of the GWO [7].

In this method, positions of grey wolves (candidate solutions) are formed randomly. These candidate solutions are search the space for obtained minimum objective function for the problem. After the iteration, best iteration values are determined and then the positions of candidate solution are updated. If the best iteration value in the next iteration is better than the previous best iteration value, the best iteration value in the next iteration is defined as the global best value.

This process continues until the termination criterion is met. Basically flow diagram of GWO is shown in Figure 3.

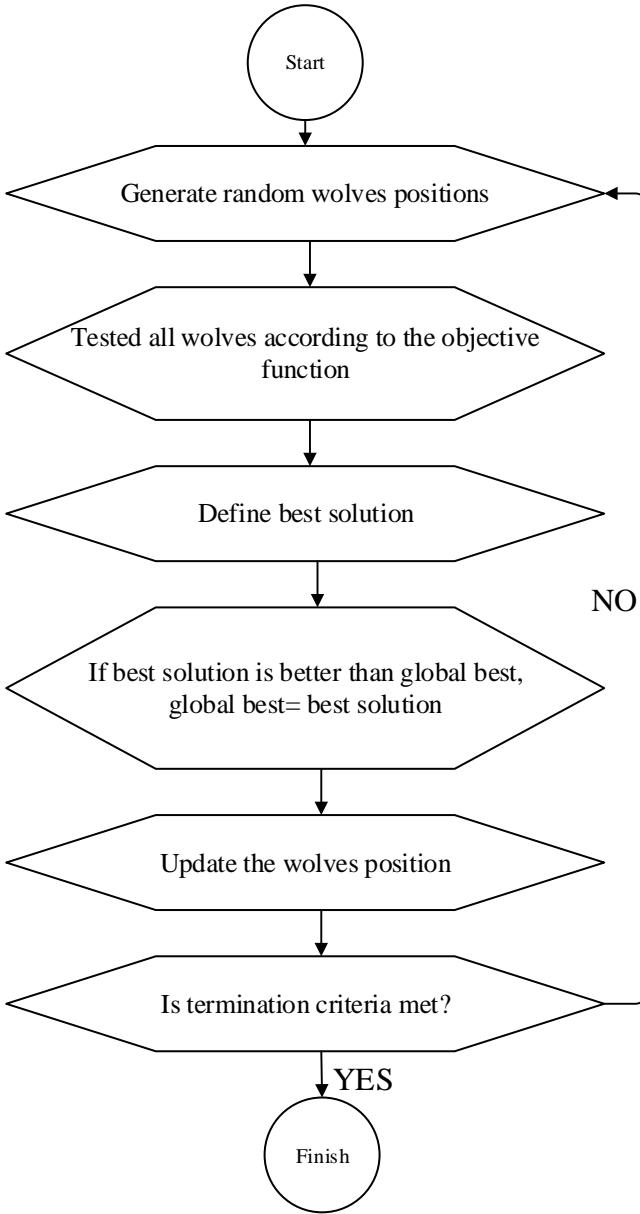


Fig. 3. Flow chart of GWO

Results and Analysis: In this section, comparative performance results of VSA and GWO are discussed. Micro grid system parameters are given in Table 1. In this system, some parameters are taken from the reference [2], while some parameters are taken from the reference [8].

Table 1: Parameters of micro grid system

R	T _{MT}	T _D	M	D
0.05	2	2	0.1667	0.015
T _{FC}	T _I	T _{CD}	T _{BESS}	T _{FESS}

0.26	0.04	0.004	0.1	0.1
------	------	-------	-----	-----

The cascade PD-PI controller parameters with VSA and GWO are given in Table 2:

Table 2: Controller parameters

	k_{pi}	k_i	k_{pd}	k_d
VSA	-1.7945	-4.9489	4.9499	2.3019
GWO	2.8522	4.9500	-4.7296	-1.4668

Frequency deviations outputs are illustrated in Figure 4:

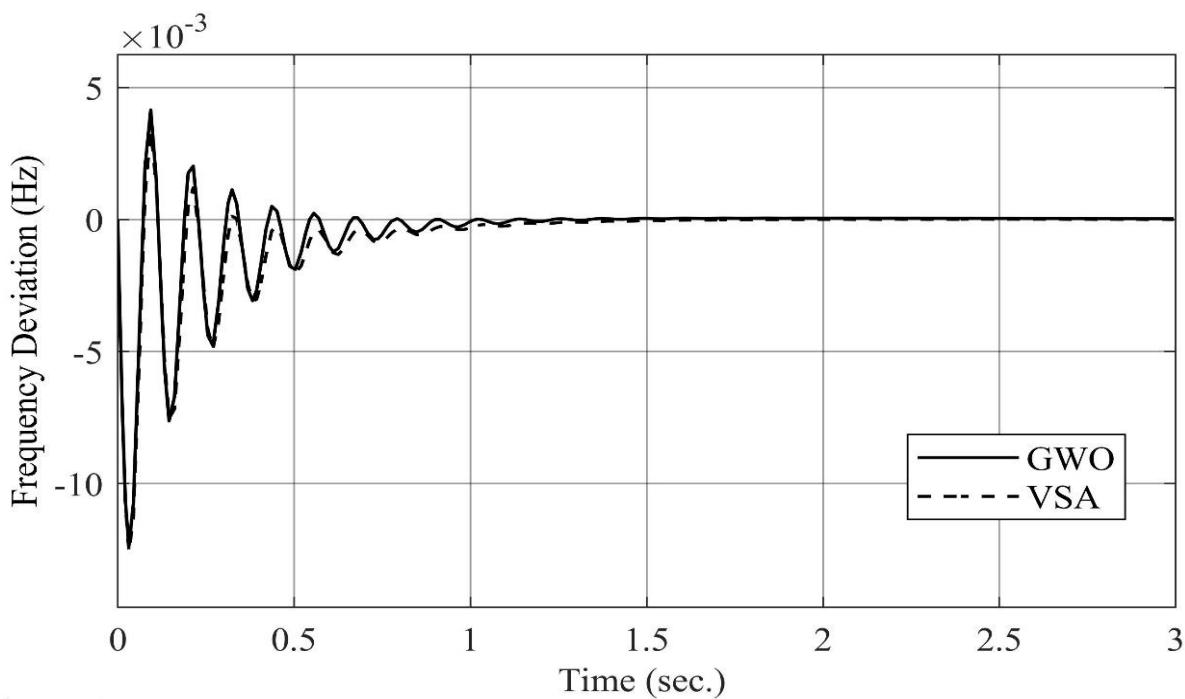


Fig. 4: Comparative frequency deviation graphic

From this figure, it is clear that the obtained two frequency deviation outputs with VSA and GWO are close to each other. However, the oscillation amplitude of GWO is slightly larger compared to VSA. Obtained numerical overshoot, undershoot and settling time results are given in Table 3.

Table 3: Comparative performance results

	Overshoot	Undershoot	Settling time (0.002 band with)
VSA	3.411e-3	-1.258e-2	0.5054
GWO	4.157e-3	-1.236e-2	0.4020

It is clearly seen that from this table, although VSA gave minimum overshoot value, GWO gave minimum settling time and undershoot values.

Conclusions: In this paper, load frequency control of single area having fuel cell micro grid system is examined. Comparative performance results performed with VSA and GWO methods. Overshoot value obtained by VSA approximately %17.94 lower than GWO. However, GWO gave approximately %1.75 lower undershoot and % 20.46 lower settling time value than VSA. It can be said that from the obtained results, GWO has the ability to give better performance.

References

- [1] A. J. Veronica, N. S. Kumar, "Internal model based load frequency controller design for hybrid microgrid system", *Energy Procedia*, vol. 117, pp.1032-1039, 2017.
- [2] M. T. Ozdemir, "The effects of the FOPI controller and time delay on stability region of the fuel cell microgrid", *International Journal of Hydrogen Energy*, vol.45, iss. 60, pp. 35064-35072, 2020.
- [3] L. Mariam, M. Basu, M. F. Conlon, "Microgrid: Architecture, policy and future trends", *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 64, pp. 477-489, 2016.
- [4] H. Yousef, "Adaptive fuzzy logic load frequency control of multi-area power system", *Electrical Power and Energy Systems*, vol. 68, pp. 384-395, 2015.
- [5] D. Guha, P. K. Roy, S. Banerjee, "Symbiotic organism search algorithm applied to load frequency control of multi-area power system", *Energy Systems*, vol. 9, pp. 439-468, 2018.
- [6] B. Dogan, T. Olmez, "A new metaheuristic for numerical function optimization: Vortex Search algorithm", *Information Sciences*, vol.293, pp. 125-145, 2015.
- [7] S. Mirjalili S. M. Mirjalili, A. Lewis, " Grey wolf optimizer", *Advances in Engineering Software*, vol. 69, pp. 46-61, 2014.
- [8] P. C. Sahu, S. Mishra, R. C. Prusty, S. Panda, "Improved-salp swarm optimized type-II fuzzy controller in load frequency control of multi area islanded AC microgrid", *Sustainable Energy, Grids and Networks*, vol. 16, pp. 380-392, 2018.



Mustafa Saka received the B.Sc degree in Electrical and Electronics Engineering from Pamukkale University (Denizli, Turkey) in 2012 and M.Sc degree in Electrical and Electronics Engineering from Gazi University (Ankara, Turkey) in 2017. He is a research assistant Electrical and Electronics Engineering Department of Gazi University. His research interest are in electrical installations, power system analysis, control systems, optimization and high voltage engineering.



Ibrahim Eke received the B.Sc. degree in Electrical and Electronics Engineering from Firat University (Elazig, Turkey) in 2000, the M.Sc. degree in Electrical and Electronics Engineering from Kirikkale University (Kirikkale, Turkey) in 2004 and the Ph.D. degree in Electrical and Electronics Engineering from the Gazi University (Ankara, Turkey) in 2011. He is currently Assist. Prof. of the Electrical and Electronics Engineering in Kirikkale University. His field of interest is in electrical installations, renewable energy sources and power system analysis.



Haluk Gozde received the B.Sc. degree in Electrical and Electronics Engineering from Karadeniz Technical University, Trabzon, Turkey in 1997. He received the M.Sc. and the Ph.D. degrees in Electrical and Electronics Engineering from Gazi University, Ankara, Turkey in 2004 and 2010, respectively. He is an Assoc. Prof. of the Electrical and Electronics Engineering since 2016. His main research area consists of power system dynamics and control, renewable energy systems, smart grid technologies, artificial intelligence-based control methods, and swarm intelligence-based optimization algorithms.



Nurali Yusifbayli is Vice Rector of Azerbaijan Technical University. He graduated from Kiev Polytechnic Institute in 1986. N.Yusifbayli received his degree of Candidate of Technical Sciences in 1995, and Doctor of Technical sciences at the Azerbaijan Scientific Research and Design-Prospecting Power Engineering Institute in 2004. His research interests include: reliability and security of power systems, development of national and interstate electric power systems, SCADA, green energy and energy efficiency.



M. Cengiz Taplamacioglu graduated from Department of Electrical and Electronics Engineering, Gazi University (Ankara, Turkey). He received the degrees of M.Sc. in Industrial Engineering from Gazi University and in Electrical and Electronics Engineering from Middle East Technical University (Ankara, Turkey) and received the degree of Ph.D. in Electrical, Electronics and System Engineering from University of Wales (Cardiff, UK). He has been a Professor of the Electrical and Electronics Engineering since 2000. His research interests and subjects are power system control, high voltage engineering, corona discharge and modeling, electrical field computation, measurement and modeling techniques, optical HV measurement techniques, lighting techniques, renewable energy systems and smart grid applications.

УДК 621.311.110

**«ПРИНЦИПЫ ФОРМИРОВАНИЯ ТРЕБОВАНИЙ К ОБЪЕМАМ
И БЫСТРОДЕЙСТВИЮ РАЗГРУЗКИ В ЭНЕРГОРАЙОНАХ ПРИ
ДЕЙСТВИИ ДЕЛИТЕЛЬНОЙ АВТОМАТИКИ»**
**«PRINCIPLES BEHIND THE REQUIREMENTS TO THE EXTENT AND
SPEED OF LOAD-SHEDDING BY ISLANDING AUTOMATIONS IN
MICROGRIDS»**

Илюшин Павел Владимирович¹, Куликов Александр Леонидович²

Ilyushin Pavel Vladimirovich, Kulikov Aleksandr Leonidovich

¹Институт энергетических исследований Российской академии наук,
г. Москва, Россия

Energy Research Institute of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

²Нижегородский государственный технический университет

им. Р.Е. Алексеева, г. Нижний Новгород, Россия

*Nizhny Novgorod State Technical University n.a. R.E. Alekseev,
Nizhny Novgorod, Russia*

Аннотация: Анализ статистических данных показывает, что выделение частей энергосистем (энергорайонов) в основной режим происходит, как правило, в результате аварийных возмущений в ремонтных схемах сети. Применение делительной автоматики позволяет осуществить выделение электростанции (генерирующей установки) или энергорайона с целью сохранения в работе потребителей собственных нужд, а также максимального числа электроприемников сторонних потребителей, подключенных к сетям среднего напряжения электростанции. Показано, что выделение энергорайона может сопровождаться как понижением частоты, если устойчивость электродвигателей в нагрузке не нарушается, так и ее повышением, если возникающий дефицит мощности провоцирует возникновение лавины напряжения. Результаты расчетов переходных процессов показывают, что величина критического дефицита мощности существенно зависит от наличия инициирующего выделение КЗ и состава нагрузки, а также распределения реактивной нагрузки в доаварийном режиме между электростанцией энергорайона и энергосистемой. Обосновано, что устойчивость нагрузки является определяющей при выборе объемов и быстродействия разгрузки в выделяемом энергорайоне, что требует корректного учета состава и параметров нагрузки при моделировании. Показано, что быстродействие разгрузки особенно критично, если

электродвигатели в результате близкого КЗ быстро тормозятся, что может спровоцировать возникновение лавины напряжения и нарушение электроснабжения всех потребителей.

Abstract: Statistics shows that microgrids are islanded when an emergency-related disturbance occurs whilst under maintenance. Islanding automations help isolate a power plant (generator set) or a microgrid to keep online the inhouse loads and as many third-party consumers connected to the medium-voltage grid of the plant. Apparently, islanding a microgrid may cause the frequency to drop if the motors constituting the load are not destabilized; or to rise, if the power deficit triggers a voltage collapse. Transient calculations show that the critical power deficit value depends on whether there is an islanding-initiating short-circuit, on the load composition, as well as on the pre-emergency distribution of reactive load between the microgrid's power plant and the general power system. The paper shows that the load stability is the decisive factor when it comes to configuring the extent and speed of load-shedding in an islanded microgrid; this requires due account of the composition and parameters of the load in modeling. The paper also shows that the speed of load-shedding is most critical if a nearby fault causes motors to decelerate quickly, which might trigger a voltage collapse and thus a power outage for all consumers.

Ключевые слова: делительная автоматика, электростанция, энергорайон, островной режим, дефицит мощности, нарушение устойчивости электродвигателей, лавина напряжения, быстродействие разгрузки.

Keywords: islanding automation, power plant, microgrid, islanding, power deficit, motor destabilization, voltage collapse, load-shedding speed.

Введение

В последние годы в условиях цифровизации электроэнергетических систем наблюдается тенденция к росту величины износа генерирующего и электросетевого оборудования в Единой энергетической системе России (ЕЭС России), которая наиболее ярко проявляется в распределительных сетях. Это обусловлено как объективными причинами (сдерживание роста тарифа на услуги по передаче электрической энергии по сетям; снижение платежной дисциплины; рост величины не технологических потерь и др.), так и субъективными (большие потери электроэнергии в сетях – до 20%; высокие операционные издержки в субъектах электроэнергетики; низкая эффективность капитальных вложений и др.) [1-3].

В этих условиях растет количество аварий, в том числе системных, с тяжелыми технологическими последствиями и значительными ущербами у промышленных потребителей [4-6].

В результате возникновения аварий, в том числе в ремонтных схемах сети, с достаточной регулярностью происходят выделения частей энергосистем (энергорайонов), находящихся в зоне централизованного электроснабжения, в основной режим работы.

Под энергорайоном понимается совокупность объектов энергосистемы, расположенных

на части обслуживаемой ею территории.

Под островным режимом подразумевается режим работы энергорайона с одной или несколькими электростанциями, каждая из которых может иметь в своем составе одну или несколько генерирующих установок (ГУ), и нагрузку, который допустим по всем условиям электроснабжения и электропотребления, образующийся при отключении линий электропередачи (ЛЭП), связывающих энергорайон с энергосистемой (в результате КЗ; без КЗ) и существующий до момента его синхронизации с энергосистемой.

Учитывая технологические особенности применяемых на электростанциях ГУ и технологических линий на промышленных предприятиях обеспечить их надежное функционирование без выделения в островной режим, в случае возникновения (развития) аварии в энергосистеме, в большинстве схемно-режимных ситуаций, невозможно. Для этих целей на электростанциях (в энергорайонах) применяется делительная автоматика (ДА) [7].

Под делительной автоматикой понимается особый вид противоаварийной автоматики (ПА), осуществляющей выделение в аварийных схемно-режимных условиях электростанции (генерирующей установки) или энергорайона от энергосистемы с целью сохранения в работе потребителей собственных нужд, а также максимального числа электроприемников сторонних потребителей, подключенных к сетям среднего напряжения электростанции [8].

Делительная автоматика, обеспечивающая выделение электростанции (отдельных генераторов) для питания потребителей собственных нужд при возникновении аварийного режима в энергосистеме известна, в основном, в виде частотной делительной автоматики (ЧДА). Данная автоматика срабатывает при снижении частоты в энергосистеме до 46–47,5 Гц. Ее задача состоит в том, чтобы при возникновении в какой-либо отделившейся от ЕЭС России части со значительным дефицитом мощности при недостаточном объеме нагрузки, заведенном под действие устройств автоматической частотной разгрузки (АЧР), предотвратить полное погашение электростанции из-за недопустимого снижения частоты, сохранив электроснабжение потребителей собственных нужд [9].

Целью статьи является анализ особенностей переходных процессов при выделении электростанции (энергорайона) в островной режим без КЗ и в результате КЗ, оценка влияния особенностей прилегающей сети и параметров нагрузки на характеристики переходных процессов, а также разработка принципов формирования требований к объемам и быстродействию разгрузки при действии ДА.

Результаты расчетов переходных процессов при выделении энергорайона с ПГЭС в островной режим

На рис. 1 представлена упрощенная однолинейная схема парогазовой электростанции (ПГЭС), содержащей четыре газотурбинные установки (ГТУ) в одновальном исполнении (ГТ-1 и ГТ-2 – по 43 МВт, ГТ-4 и ГТ-5 – по 45 МВт) и две паротурбинные установки (ПТУ) – (ПТ-3 и ПТ-6 по 30 МВт) в составе двух парогазовых установок (ГТ-1 + ГТ-2 → ПТ-3 и ГТ-4 + ГТ-5 → ПТ-6).

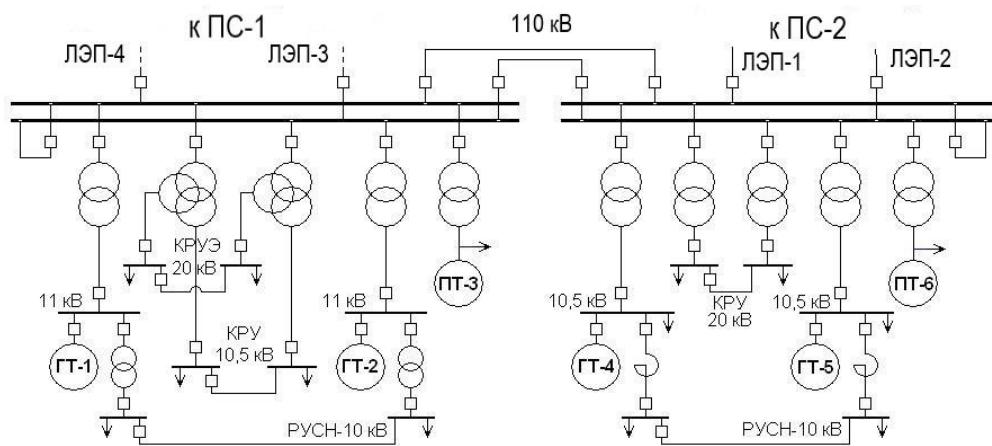


Рис. 1. Упрощенная однолинейная схема ПГЭС.

Рассмотрим энергорайон с суммарной генерацией 236 МВт (при всех включенных ГУ на ПГЭС) и суммарной нагрузкой 279 МВт. В данном энергорайоне проектом планируется установка ДА. Приведенные в статье результаты расчетов переходных процессов выполнены в реальной схеме сети в ПК Мустанг.

Проведем анализ переходных процессов в энергорайоне с ПГЭС при различных дефицитах мощности в случае отключения ЛЭП-1 и ЛЭП-2 или одной из них, связывающих энергорайон с ПС-2 при выведенной в ремонт второй. На момент выполнения расчетов режимов ЛЭП-3 и ЛЭП-4, связывающие энергорайон с ПС-1, находились в стадии строительства и не были введены в работу. В расчетах действие устройств ПА в энергорайоне не учитывалось с целью выявления влияния параметров нагрузки и предаварийного режима на характеристики переходных процессов.

В серии расчетов учитывались различные величины дефицита мощности в энергорайоне, который рассчитывался по формуле:

$$D = \left(1 - \frac{\sum P_g}{\sum P_h} \right) \cdot 100\% ,$$

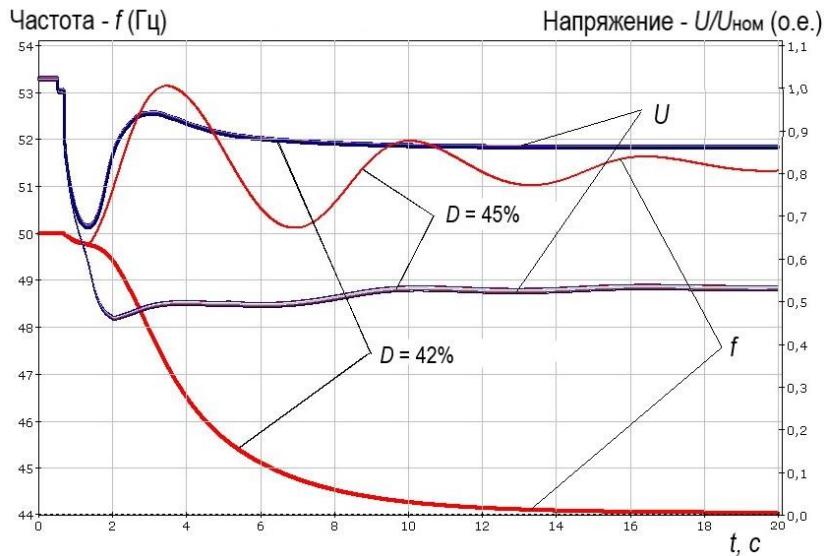
где: $\sum P_g$ – суммарная располагаемая величина генерации в энергорайоне; $\sum P_h$ – суммарная величина нагрузки в энергорайоне в предаварийном режиме.

При выполнении расчетов варьировалось значение дефицита мощности. Было принято допущение, что величина нагрузки в сети 110 кВ не изменялась. Рассматривалось увеличение нагрузки в КРУ-20 кВ ПГЭС в диапазоне от 0 до 200 МВт. Если критическое значение дефицита мощности (D_{kp}) оказывалось меньше соответствующего расчетной нагрузке в энергорайоне, то снижались все нагрузки на один и тот же процент. В рассматриваемой схеме превышение значения D_{kp} приводит к тому, что переходный процесс со снижением частоты заканчивается лавиной напряжения и сопровождается значительным сбросом нагрузки с последующим повышением частоты [10, 11].

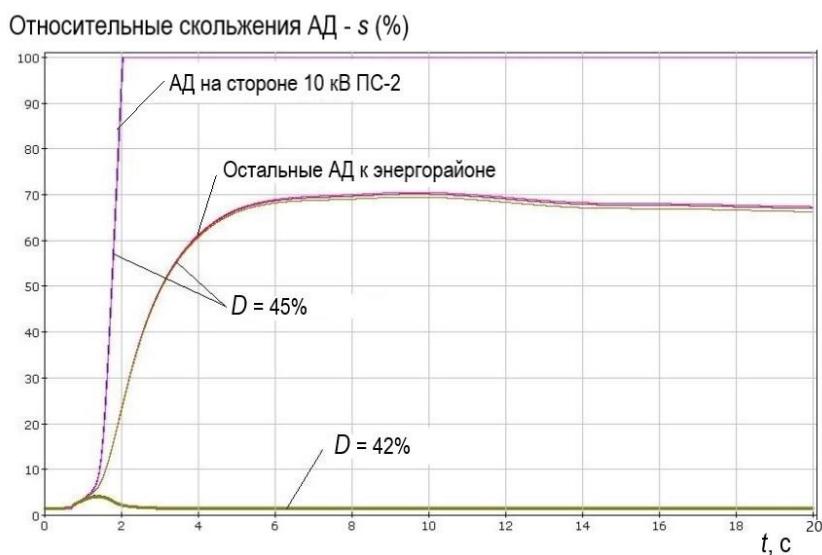
С учетом исходных данных в рассматриваемом энергорайоне $D_{kp} = 43,3\%$. На рис. 2а-в приведены результаты расчетов переходных процессов при выделении энергорайона с дефицитом мощности меньшим и большим величины D_{kp} . Основные технические характеристики эквивалентных АД приведены в таблице 1.

Таблица 1. Технические характеристики эквивалентных АД.

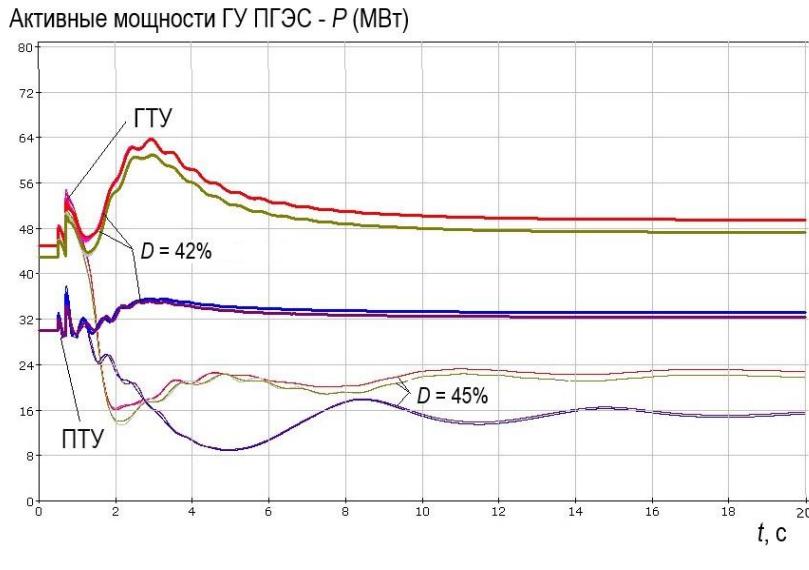
№	Вид нагрузки	P_{AD} / P_h	Коэффициент загрузки АД	$T_J, \text{с}$
1.	Собственные нужды ПГЭС	0,9	0,8	1,2
2.	Промышленная нагрузка на напряжении 10 и 20 кВ	0,8	0,7	0,8
3.	Эквивалентная нагрузка в сети 110 кВ (зимний максимум)	0,4	0,65	0,6
4.	Эквивалентная нагрузка в сети 110 кВ (летний максимум)	0,6	0,75	0,25



a)



б)



e)

Рис. 2. Переходные процессы в сети 110 кВ энергорайона после срабатывания ДА при $D < D_{kp} = 43,3\%$ и $D > D_{kp}$: а – частота и напряжение в сети 110 кВ; б – относительные скольжения АД; в – активные мощности ГУ ПГЭС.

Анализ рис. 2б позволяет сделать вывод, что лавину напряжения в энергорайоне провоцирует нарушение устойчивости части асинхронных двигателей (АД). Наименьший запас устойчивости зафиксирован у АД, подключенных к шинам 10 кВ ПС-2.

На рис. 2б часть АД при $D = 45\%$ полностью останавливаются и отключаются действием устройств релейной защиты (РЗ), а у части начинаются процессы самозапуска. Самозапуски АД могли бы закончиться успешно, если бы напряжение в сети 110 кВ не снизилось ниже 60% от U_{nom} . В реальной схемно-режимной ситуации самозапуск будет неуспешным и АД будут отключены действием устройств РЗ по снижению напряжения или технологическими защитами приводимых механизмов [12-14].

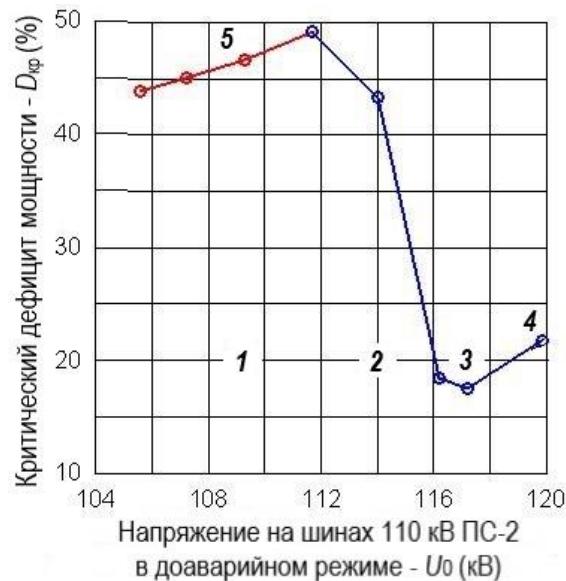
Анализ приведенных расчетов переходных процессов позволяет сделать вывод, что при одном и том же исходном режиме изменения параметров нагрузки приводят к изменению величины D_{kp} , как показано в таблице 2.

Таблица 2. Изменение D_{kp} в зависимости от параметров нагрузки.

Изменяемые параметры нагрузки	D_{kp} , %
Исходное состояние расчетной схемы	43,3
Реактивные нагрузки увеличены в 1,5 раза со средним $\cos\phi = 0,831$ (вместо 0,913)	42,0
Доля АД в непромышленной нагрузке увеличена до 60% (вместо 40%)	27,4
Отключена одна паротурбинная ГУ (ПТ-3)	23,8

При изменении коэффициента мощности нагрузки ($\cos\phi_h$) изменение D_{kp} не существенно, а в случае увеличения доли АД в составе нагрузки на 20% величина D_{kp} снижается почти в 1,6 раза, что требует при выполнении расчетов уделять особое внимание корректности моделирования нагрузки в сети. Еще большую роль в снижении величины D_{kp} играет снижение величины располагаемой мощности в рассматриваемом энергорайоне. В случае отключения одной паротурбинной ГУ на ПГЭС D_{kp} снижается почти в 2 раза.

При выполнении расчетов был выявлен еще один фактор, оказывающий существенное влияние на величину D_{kp} , как показано на рис. 3. Этим фактором является напряжение (U_0) в доаварийном режиме (перед выделением) на шинах 110 кВ ПС-2, которая определяется режимом работы ПС 500/220/110 кВ.

Рис. 3. График зависимости D_{kp} от U_0 .

Используемые в расчетах величины U_0 относятся к доаварийным режимам работы прилегающей сети и характеризуют ее особенности, при этом нагрузка в энергорайоне

соответствует расчетной схеме, а $D = 24,6\%$.

Анализ рис. 3 позволяет выявить скачкообразное изменение D_{kp} при незначительных изменениях величины U_0 в диапазоне от 112 до 116 кВ. Данный эффект обусловлен изменением загрузки ГУ ПГЭС по реактивной мощности, как показано на рис. 4. Это происходит в случае, если на смежной ПС 500/220/110 кВ повышается напряжение на шинах 220 кВ. При этом ГУ на ПГЭС в рассматриваемом энергорайоне разгружаются по реактивной мощности в пределах допустимого диапазона (0-133,5 МВАр).

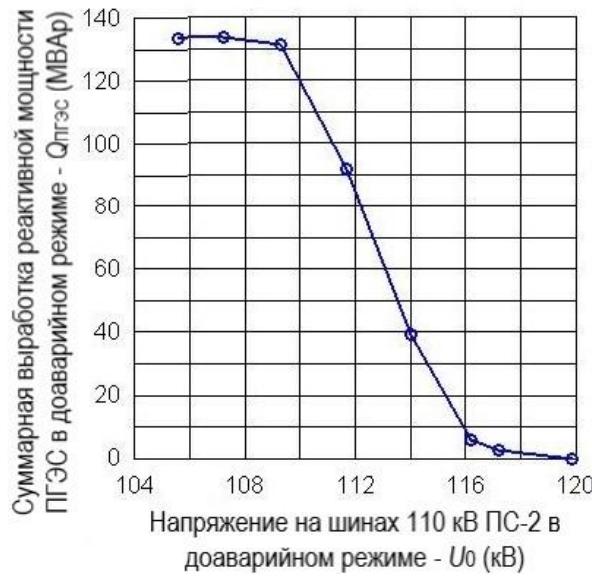
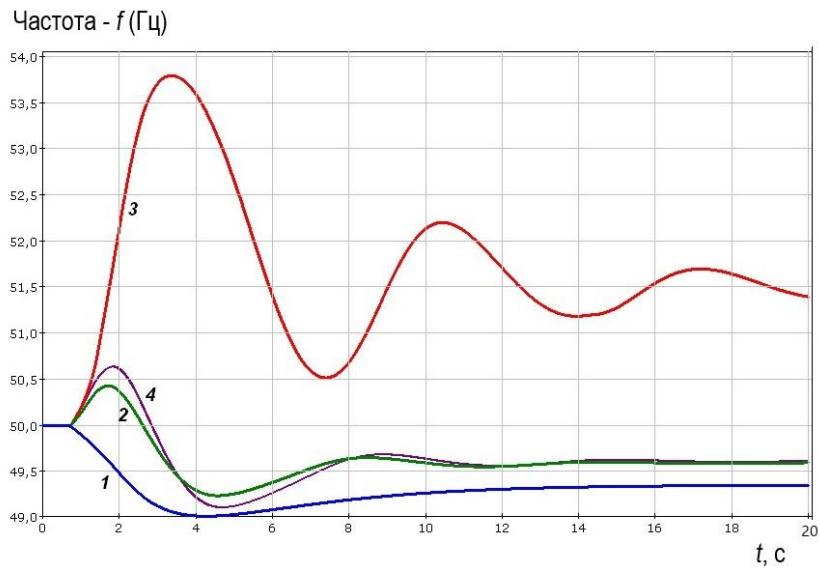


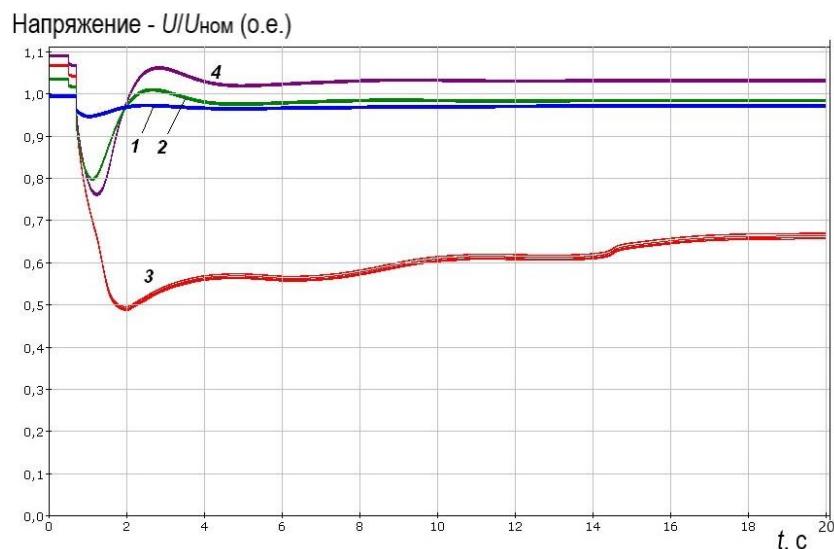
Рис. 4. График изменения выработки Q_{pges} в зависимости от величины U_0 в доаварийном режиме.

Таким образом, чем меньшую реактивную мощность вырабатывают ГУ ПГЭС (Q_{pges}) в доаварийном режиме, тем глубже проваливается напряжение в начальный момент времени при выделении энергорайона в островной режим. Кроме того, в этом случае увеличивается общее время переходного процесса, что обусловлено временем, необходимым для реализации форсировки возбуждения ГУ ПГЭС (нарастания токов возбуждения в генераторах до потолочных значений). В рассматриваемом режиме снижается запас устойчивости АД и существенно понижается значение D_{kp} [15-17].

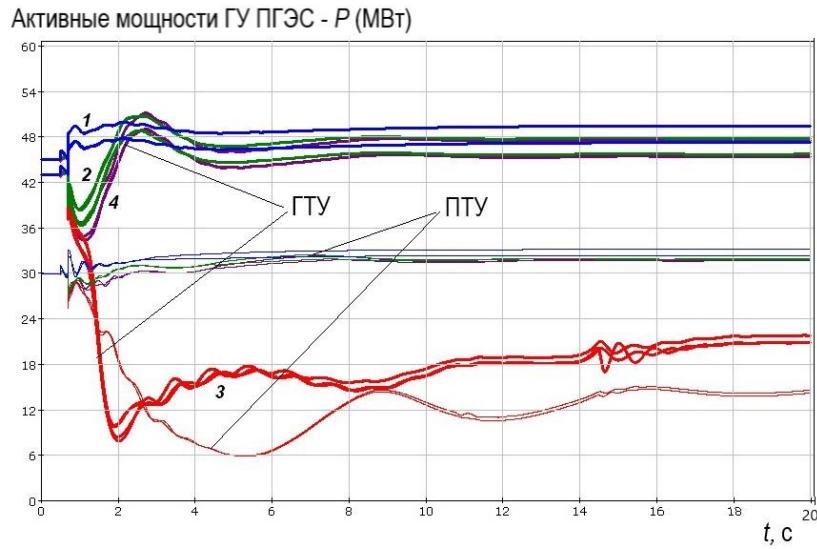
В режиме, когда $Q_{pges} \approx 0$ (например, при $U_0 > 117$ кВ) незначительное повышение U_0 приводит к повышению токов возбуждения ГУ, пропорциональному значениям U_0 для обеспечения одного и то же значения $Q_{pges} = Q_{min}$. При этом снижаются скольжения АД в доаварийном режиме и несколько повышается D_{kp} . Переходные процессы при четырех разных значениях U_0 и $D = 20,3\%$ (точки 1, 2, 3, 4 на рис. 3) показаны на рис. 5а-д.



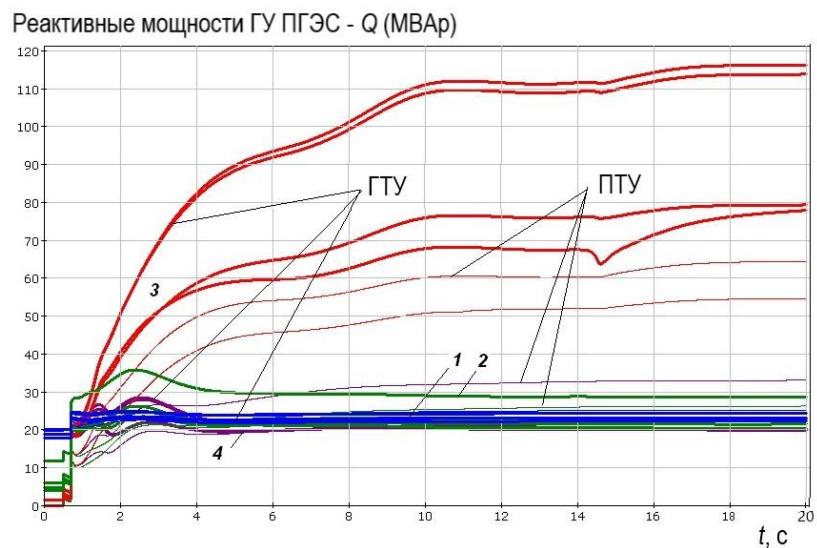
a)



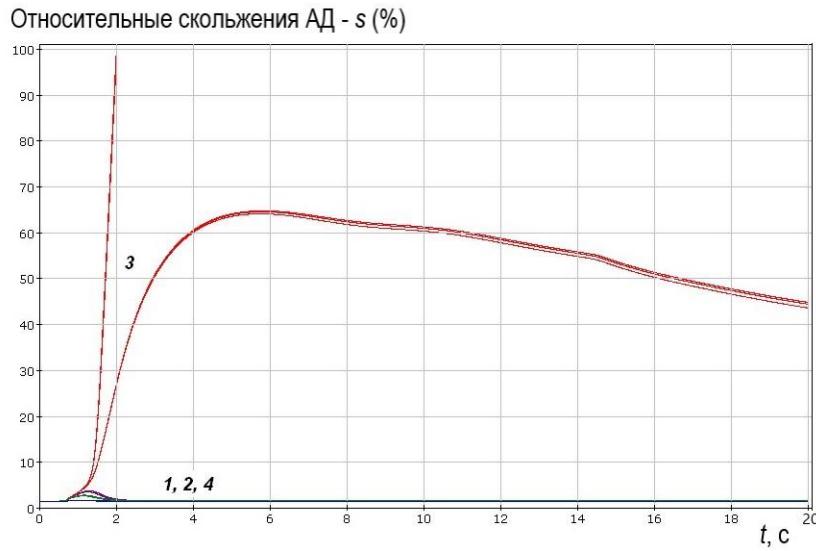
б)



e)



e)



д)

Рис. 5. Переходные процессы после срабатывания АД при четырех разных значениях U_0 и $D = 20,3\%$: а – частота; б – напряжение в сети 110 кВ; в – активные мощности ГУ ПГЭС; г – реактивные мощности ГУ ПГЭС; д – относительные скольжения АД.

Рассмотрим подробнее левую часть графика зависимости $D_{kp}(U_0)$ на рис. 3. Режимы с большими значениями D (при $U_0 < 112$ кВ) приводят к увеличению потерь напряжения в сети и снижению запасов устойчивости АД. В этих условиях область допустимых дефицитов мощности ($D < D_{kp}$) ограничена устойчивостью АД, которая дополнительно понижается при снижении U_0 .

Пример переходного процесса с нарушением условий существования режима при $D = 50\% > D_{kp}$ в условиях низкой величины U_0 (точка 5 на рис. 3) приведен на рис. 6 (устанавливается $f = 51,65$ Гц; $U < 45$ кВ в сети 110 кВ).

Следовательно, величины напряжения на шинах ПГЭС в рассмотренных схемно-режимных условиях должны находиться в существенно более узком коридоре, чем регламентированные значения в нормативно-технических документах для нормальных ($\pm 5\%$) и послеаварийных ($\pm 10\%$) режимов.

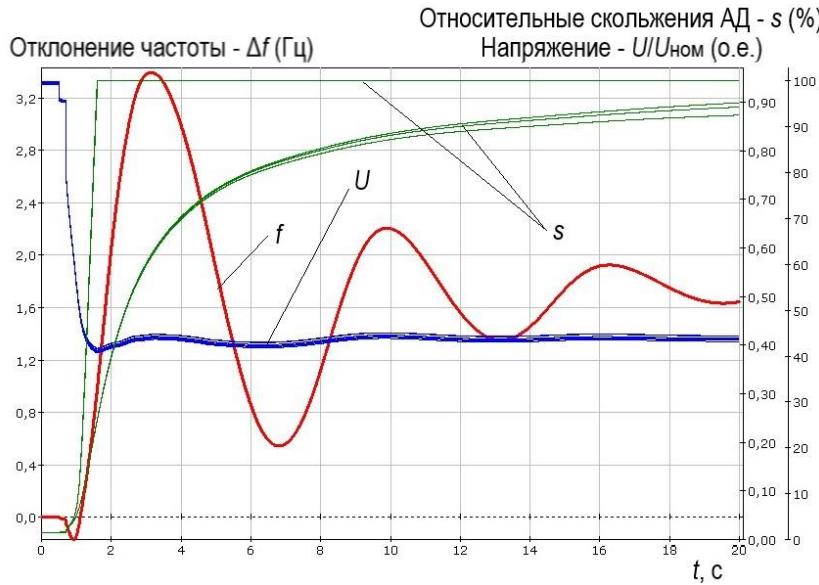


Рис. 6. Переходный процесс при действии ДА при $U_0 = 109,28$ кВ и $D = 50\%$.

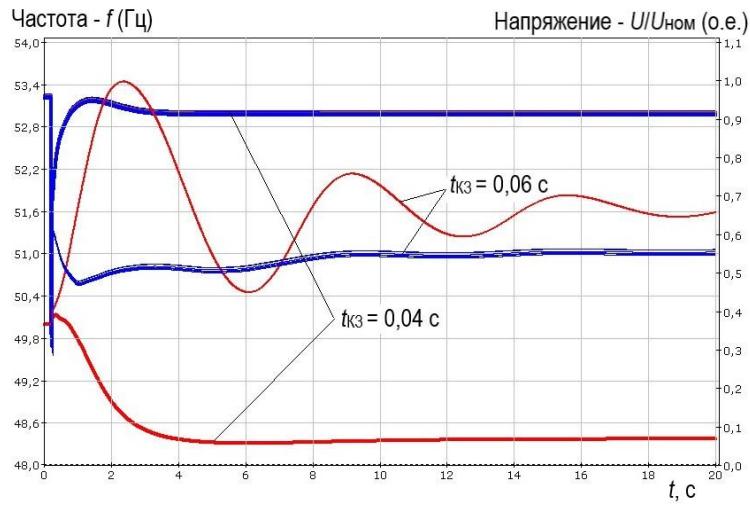
Определение уровней напряжения в контрольных точках сети и их поддержание при ведении режимов должно основываться на проведении многовариантных расчетов переходных процессов для предотвращения нарушений устойчивости нагрузки и возникновения лавины напряжения.

Особенности переходных процессов при выделении энергорайона с ПГЭС в результате КЗ

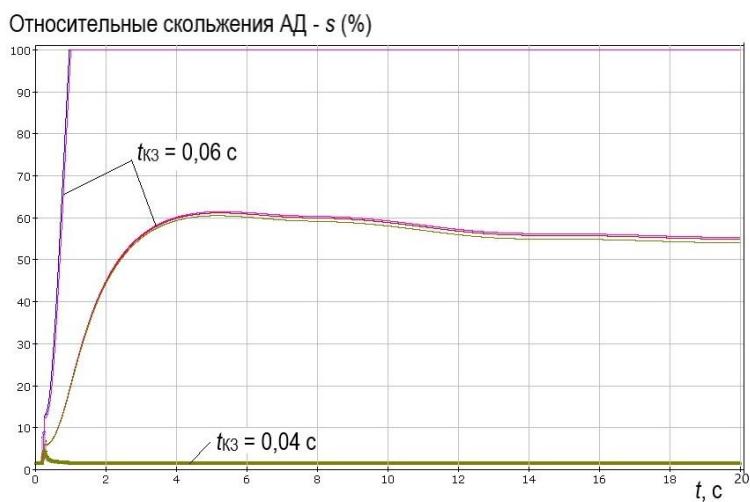
Рассмотрим схемно-режимную ситуацию, когда ЛЭП-1, отходящая к ПС-2 отключена, а на ЛЭП-2 возникает трехфазное КЗ вблизи шин ПС-2.

Результаты расчетов переходных процессов существенно отличаются от рассмотренных выше, где отключение ЛЭП, связывающей ПС-2 с ПС 500/220/110 кВ приводило к понижению частоты в результате дефицита мощности, при уровнях напряжения в узлах, близких к нормальным значениям.

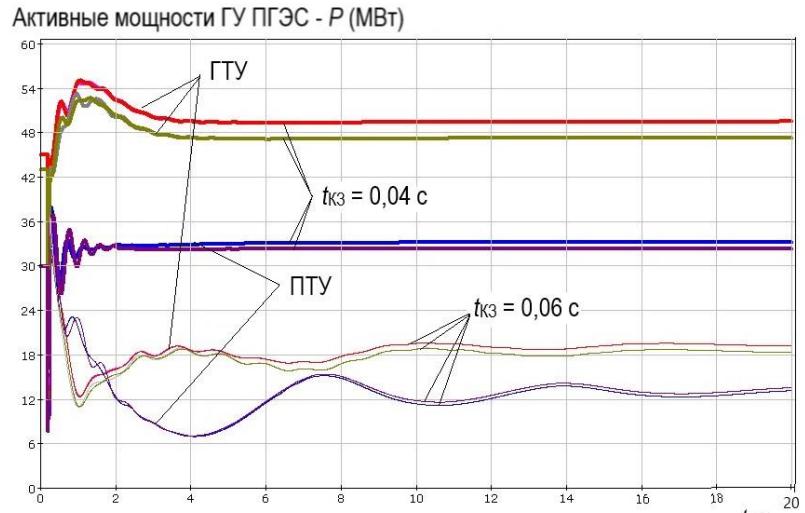
Рассмотрим режим, в котором ГУ ПГЭС работают с выдачей $Q_{\text{ном}}$, а при выделении энергорайона в результате трехфазного КЗ с $D = 24,6\%$ (рис. 3) устойчивость АД в нагрузке нарушается даже при $t_{\text{КЗ}} = 0,06$ с (рис. 7а-г).



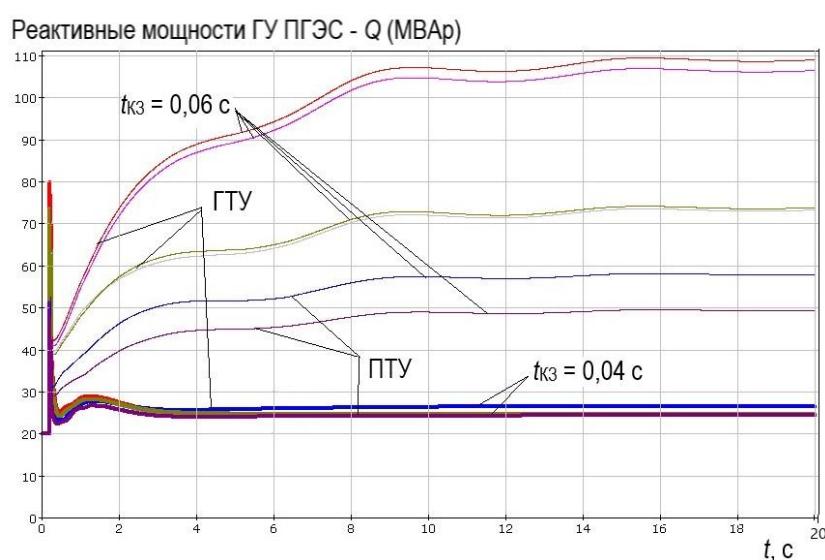
a)



б)



ε)



ε)

Рис. 7. Переходные процессы после выделения энергорайона в результате КЗ с $D = 24,6\%$ при $t_{k3} = 0,06$ и $t_{k3} = 0,04$ с: a – частота и напряжение в сети 110 кВ; δ – относительные скольжения АД; ε – активные мощности ГУ ПГЭС; ζ – реактивные мощности ГУ ПГЭС.

Анализ рис. 7а-г позволяет выявить два принципиальных аспекта:

- если отключается ЛЭП, связывающая ПС-2 с ПС 500/220/110 кВ (энергосистемой), то единственной электростанцией в энергорайоне будет ПГЭС, расположенная на его краю с суммарной генерируемой мощностью меньшей, чем суммарная нагрузка. В этом случае запас устойчивости электродвигателей в нагрузке низкий и при КЗ велика вероятность возникновения в энергорайоне лавины напряжения;
- вероятность возникновения в энергорайоне лавины напряжения в основном зависит от состава и параметров нагрузки. В рассматриваемом энергорайоне значительная часть мощности потребляется системами кондиционирования и вентиляции высотных административных зданий (электродвигатели имеют момент сопротивления, близкий к независимому от скорости вращения – низкий запас устойчивости).

Анализ переходных процессов в энергорайоне с ПГЭС показал, что имеются два участка сети, где запасы устойчивости электродвигателей в нагрузке наименьшие. Поэтому, если из-за внешних факторов возникает значительное снижение напряжения, то опрокидывания АД начинаются именно на этих участках сети. При этом в остальных частях энергорайона либо $U > U_{kp}$, либо возникает лавина напряжения, которая охватывает весь энергорайон. Следовательно, разгрузку сети при действии ДА следует выполнять на тех участках, где запасы устойчивости электродвигателей в нагрузке наименьшие.

Конкретные выводы о возможности возникновения в том или ином энергорайоне лавины напряжения с нарушением работы значительной части электроприемников можно делать только на основе детального изучения параметров нагрузки и переходных процессов с ее участием.

Важно отметить, что выделение энергорайона в результате КЗ существенно повышает вероятность глубокого снижения напряжения без снижения частоты с нарушением работы значительной части электроприемников. Данный фактор следует учитывать при выборе алгоритмов работы и параметров настройки ДА и других устройств ПА в энергорайоне.

Выбор мест реализации управляющих воздействий от ДА или других устройств ПА, осуществляющих разгрузку, зависит от состава и параметров нагрузки. Их правильный выбор позволяет предотвратить нарушение работы всего энергорайона при возникновении дефицита мощности, что требует уделять особое внимание корректности моделирования нагрузок [18].

Принципы формирования требований к быстродействию разгрузки

Вопрос о быстродействии разгрузки (реализации управляющих воздействий от ДА на отключение нагрузки – ОН) особенно актуален не в тех схемно-режимных условиях, когда

$U > U_{kp}$, а частота снижается, но в тех случаях, когда возможно быстрое развитие лавины напряжения [19].

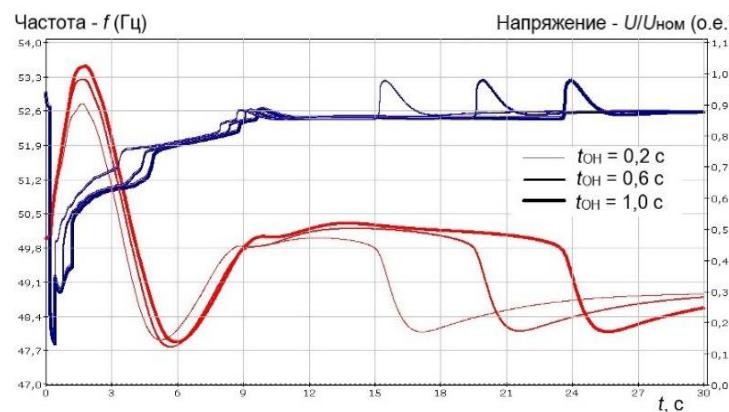
В настоящее время реально обеспечить быстродействие разгрузки (реализации ОН), которое соответствует запаздыванию от момента срабатывания пускового органа ДА до момента отключения электроприемников, $\Delta t = 0,6$ с [20]. В условиях, когда выделение энергорайона не сопровождается КЗ возможно обеспечить стабилизацию параметров режима в энергорайоне, так как скольжения АД малы. Фактическому отключению нагрузки соответствует момент времени:

$$t_{OH} = \Delta t_{PO} + \Delta t + t_{KZ},$$

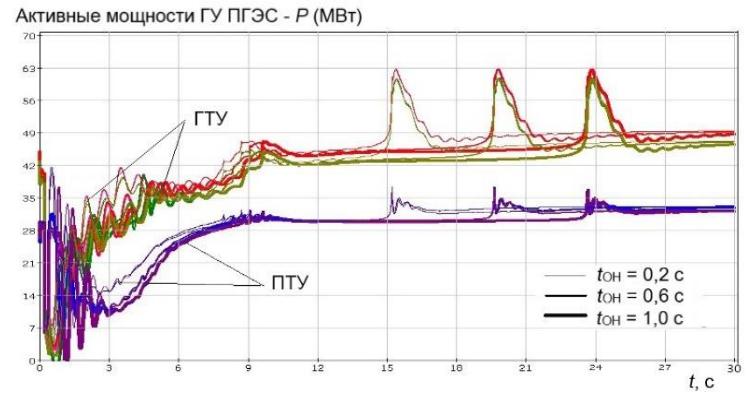
где Δt_{PO} – время срабатывания пускового органа ДА; $t_{KZ} = 0,2$ с – длительность КЗ, ликвидируемого устройствами РЗ.

При возникновении КЗ электродвигатели в энергорайоне начинают быстро тормозиться и к моменту разгрузки их максимальные скольжения могут превышать 60-70%. В этом случае без реализации ОН в больших объемах стабилизировать параметры режима не представляется возможным [21].

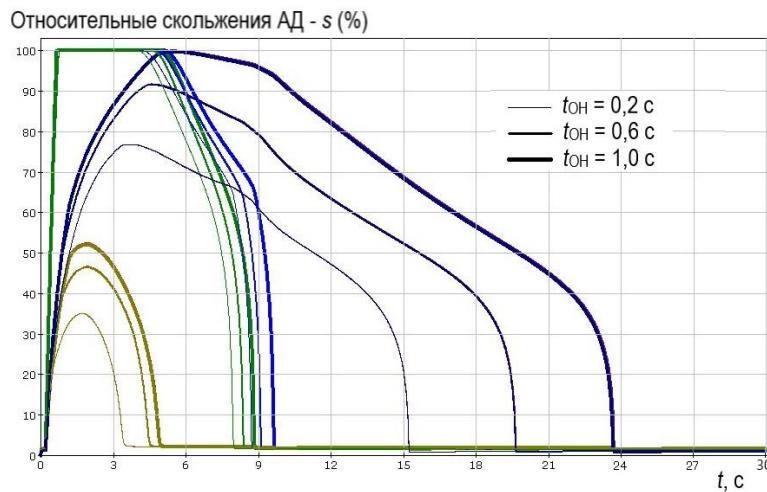
Рассмотрим аварийный режим, возникающий в результате трехфазного КЗ на ЛЭП-1 рядом с ПС-2 с $t_{KZ} = 0,2$ с при различном быстродействии разгрузки: $t_{OH} = 0,2$ с, $t_{OH} = 0,6$ с и $t_{OH} = 1,0$ с. Результаты расчетов переходных процессов представлены на рис. 8а-в



a)



б)



в)

Рис. 8. Переходные процессы при выделении энергорайона с ПГЭС в результате трехфазного КЗ с $t_{\text{KZ}} = 0,2$ с при объеме ОН 33,5% в различным быстродействием ($t_{\text{OH}} = 0,2$ с, $t_{\text{OH}} = 0,6$ с и $t_{\text{OH}} = 1,0$ с): а – частота и напряжение в сети 110 кВ; б – активные мощности ГУ ПГЭС; в – относительные скольжения АД.

Анализ рис. 8 позволяет сделать вывод, что при больших объемах ОН ее быстродействие не играет решающей роли, однако это приводит к нарушению электроснабжения значительного количества электроприемников. Поэтому, быстродействующая разгрузка должна применяться при проектировании ДА с целью минимизации объемов ОН в случае угрозы возникновения лавины напряжения в островном режиме работы энергорайона

Выводы

Выделение электростанции (энергорайона) действием делительной автоматики с потребителями собственных нужд и электроприемниками сторонних потребителей в случаях, когда величина нагрузки в энергорайоне превышает располагаемую мощность питающих ее генерирующих установок, может сопровождаться понижением частоты, если устойчивость электродвигателей в нагрузке не нарушается, или ее повышением, если возникающий дефицит мощности провоцирует лавину напряжения.

При выборе управляющих воздействий делительной автоматики, которые следует реализовывать при выделении электростанции (энергорайона), требуется определить, возможны ли схемно-режимные ситуации, при которых нарушения устойчивости электродвигателей приводят к возникновению лавины напряжения в энергорайоне. Если это реально, то необходимо предусматривать управляющие воздействия, отключающие необходимый объем нагрузки по факту выделения энергорайона, обеспечивая поддержание напряжения на шинах нагрузки выше критических значений, с целью сохранения условий электроснабжения электроприемников, которые остались в работе. В случае выделения электростанции (энергорайона) в результате КЗ значительно повышается вероятность того, что это выделение приведет к глубокому снижению напряжения, без снижения частоты, и последующему нарушению работы значительной части электродвигателей в нагрузке.

Величина критического дефицита мощности зависит от наличия инициирующего выделение КЗ и состава нагрузки, но в большей степени от распределения реактивной нагрузки в доаварийном режиме между электростанцией энергорайона и энергосистемой. Расчетами обосновано, что чем меньше выработка реактивной мощности генерирующими установками в энергорайоне, тем больше вероятность того, что дефицит мощности окажется больше критического и спровоцирует лавину напряжения.

Объемы разгрузки при действии делительной автоматики должны определяться на основании результатов многовариантных расчетов переходных процессов, что требует корректного моделирования нагрузки в выделяемом энергорайоне. От доли электродвигателей в составе суммарной нагрузки решающим образом зависит уровень устойчивости нагрузки в целом.

Быстродействие разгрузки особенно критично в тех схемно-режимных условиях, когда электродвигатели начинают быстро тормозиться (в результате близкого КЗ) и к моменту реализации разгрузки их скольжения превышают 60-70%, что может привести к быстрому развитию лавины напряжения.

Список литературы

1. Воропай Н.И., Осак А.Б. Будущие электроэнергетические системы – тенденции и проблемы // Электро. Электротехника, электроэнергетика, электротехническая промышленность. 2015. № 4. С. 2-4.
2. Есяков С.Я., Лунин К.А., Стенников В.А., Воропай Н.И., Редько И.Я., Баринов В.А. Трансформация электроэнергетических систем // Электроэнергия. Передача и распределение. 2019. № 4 (55). С. 134-141.
3. Лоскутов А.Б. Проблемы перехода электроэнергетики на цифровые технологии // Интеллектуальная электротехника. 2018. № 1. С. 9-27.
4. Воропай Н.И., Осак А.Б., Смирнов С.С. Анализ системной аварии 2016 г. в ЕЭС России, вызванной повреждением оборудования на Рефтинской ГРЭС // Электричество. 2018. № 3. С. 27-32.
5. Воропай Н.И., Чулюкова М.В. Анализ развития системной аварии в ОЭС Востока 1 августа 2017 г. // Электричество. 2018. № 5. С. 28-32.
6. Буй Д.Т., Воропай Н.И. Восстановление системы электроснабжения с распределенной генерацией после крупной аварии // Промышленная энергетика. 2011. № 8. С. 12-18.
7. Илюшин П.В. Перспективы применения и проблемные вопросы интеграции распределенных источников энергии в электрические сети: монография. Библиотечка электротехника. 2020. № 8 (260). – 116 с.
8. Гуревич Ю.Е., Кабиков К.В. Особенности электроснабжения, ориентированного на бесперебойную работу промышленного потребителя. М.: ЭЛЕКС-КМ, 2005. – 407 с.
9. Илюшин П.В. Особенности реализации многопараметрической делительной автоматики в энергорайонах с объектами распределенной генерации // Релейная защита и автоматизация. 2018. № 2 (31). С. 12-24.
10. Арцишевский Я.Л., Гиёев Б.М. Эффективность АЧР с передачей команд на отключение электроприёмников 0,4 кВ // Известия вузов. Электромеханика. 2017. № 6. С. 37-44.
11. Ilyushin P.V. Filippov S.P. Under-frequency load shedding strategies for power districts with distributed generation // The Proceedings of 2019 International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (ICIEAM). 25-29 March 2019. Sochi, Russia. Pp. 1-6. doi: 10.1109/ICIEAM.2019.8743001.
12. Kulikov A.L., Sharygin M.V. Ilyushin P.V. Principles of organization of relay protection in microgrids with distributed power generation sources // Power Technology and Engineering. Vol. 53, № 5, January, 2020. pp. 611-617. doi: 10.1007/s10749-020-01125-x.
13. Нагай И.В., Нагай В.И., Сарры С.В., Березкина С.Ю. Методика оценки информационных признаков, характеризующих режимы работы электрических сетей, по критерию распознаваемости релейной защитой // Известия высших учебных заведений. Северо-Кавказский регион. Технические науки. 2017. № 4 (196). С. 27-33.
14. Шарыгин М.В., Куликов А.Л., Петров А.А. Синтез универсального многомерного

измерительно-пускового органа релейной защиты // Электричество. 2020. № 1. С. 4-11.

15. Ilyushin P.V., Pazderin A.V. Requirements for power stations islanding automation an influence of power grid parameters and loads // The Proceedings of 2018 International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (ICIEAM). 15-18 May 2018. Moscow, Russia. Pp. 1-6. doi: 10.1109/ICIEAM.2018.8728682.

16. Илюшин П.В. Учет особенностей объектов распределенной генерации при выборе алгоритмов противоаварийного управления в распределительных сетях // Электро. Электротехника, электроэнергетика, электротехническая промышленность. 2011. № 4. С. 19-25.

17. Ilyushin P.V., Pazderin A.V. Approaches to organization of emergency control at isolated operation of energy areas with distributed generation // The Proceedings of International Urals Conference on Green Energy (UralCon). 4-6 October 2018. Chelyabinsk, Russia. pp. 1-7. doi: 10.1109/URALCON.2018.8544361.

18. Бернер М.С., Брухис Г.Л., Гуревич Ю.Е., Кучеров Ю.Н. Проблемы применения аварийной разгрузки больших распределительных сетей // Электро. Электротехника, электроэнергетика, электротехническая промышленность. 2008. № 5. С. 12-19.

19. Белослудцев К.А., Гуревич Ю.Е. Возможные пути развития аварий, вызванных большим дефицитом мощности // Электрические станции. 2004. № 9. С. 27-31.

20. Арцишевский Я.Л., Земцов А.А. Принципы противоаварийного управления в системах электроснабжения с собственным источником // Электрические станции. 2010. № 10. С. 33-38.

21. Илюшин П.В. Требования к разгрузке при вынужденном отделении от сети электростанции с собственными нуждами и нагрузкой на напряжении 6–10 кВ // Электро. Электротехника, электроэнергетика, электротехническая промышленность. 2011. № 6. С. 23-27.

**Assessment of penetration level of variable renewable generations
on the flexibility of power system**

Yusifbayli Nurali¹, Nasibov Valeh², Gulyev Huseynqulu¹Aghaliyev Nicat¹

¹ Azerbaijan Technical University, Baku, Azerbaijan

²Azerbaijan Scientific Research and Design-Research Energy Institute, Baku, Azerbaijan

Annotation: The study evaluates the impact of the level of penetration of variable renewables generation sources on the flexibility of power systems on different phases in the context of the transformation of power systems to green technologies. The impact of solar and wind turbines, which make up the bulk of renewable energy sources, on the operating modes of power systems was also considered, as well as the forecast values of the equivalent inertia constant of the system to prepare the Azerbaijani power system for such a transformation.

Key words: Variable renewables sources, flexibility, penetration phase, power system, inertia constant.

**Dəyişən bərpa olunan generasiya mənbələrinin integrasiya səviyyəsinin
EES-nin çevikliyinə təsirinin qiymətləndirilməsi**

Yusifbəyli Nurəli¹, Nasibov Valeh², Quliyev Huseynqulu¹Ağəliyev Nicat¹

¹Azərbaycan Texniki Universiteti, Bakı, Azərbaycan

²Azərbaycan Elmi-Tədqiqat və Layihə-Axtarış Energetika İnstitutu, Bakı, Azərbaycan

Annotasiya: İşdə elektroenergetika sistemlərinin yaşıl texnonogiyalara transformasiyası şəraitində dəyişən bərpa olunan əsaslı generasiya mənbələrinin penetrasiya səviyyəsinin müxtəlif fazaları üzrə enerji sistemlərinin çevikliyinə təsiri qiymətləndirilmişdir. Həmçinin, dəyişən bərpa olunan enerji mənbələrinin əsas hissəsini təşkil edən günəş və külək qurğularının enerji sistemlərin iş rejimlərinə təsiri ayrıraqda baxılmış, eləcə də Azərbaycan elektroenergetika sisteminin belə transformasiyaya hazır olması üçün sistemin ekvivalent inersiya sabitinin proqnoz qiymətləri araşdırılmış və kompleks təkliflər hazırlanmışdır.

Açar sözlər: Dəyişən bərpa olunan mənbələr, çeviklik, nüfuz fazası, güc sistemi, ətalət sabidiidir.

Giriş

Elektroenergetika sektorunun yenidən qurulması üçün geniş imkanlar açan bərpa olunan enerji mənşəli (əsaslı) generasiyanın “capex” və “opex” üzrə azalan xərcləri, rəqəmsal texnologiyaların inkişafı və bu mənbələr hesabına istehsal olunan enerji enerji təhlükəsizliyinin təmin olummasında mühüm rol oynamadır [1]. Külək (KQ) və günəş fotovoltaik (FVQ) qurğuları 2040-cı ilə qədər əlavə elektrik enerjisi istehsalının yarıdan çoxunu və BMT-nin İDÇK (TK 21, Paris Sazişi) üzrə iqlim dəyişikliyi öhdəliklərini yerinə yetirmək baxımından demək olar ki, bütün artımı təmin edəcəkdir. Hökumətlər və tənzimləyicilər texnoloji dəyişiklik tempi və enerji sistemlərinin çevik istismarına artan ehtiyacla ayaqlaşmaq üçün sürətli hərəkət etməli olacaqlar. Enerji akumlyasiya (saxlanç) texnologiyaları bazarının surətli inkişafı, elektrik nəqliyyat vasitələri və şəbəkə arasında interfeys,

məlumatların məxfiliyi və s. kimi məsələlər istehlakçılar və milli elektrik enerjisi sistemləri üçün potensial risk mənbəyinə çevrilməkdədir [2].

Son onilliklərin dinamikasına görə elektrik enerjisi istehsalında artım ümumi enerji tələbatından daha sürətlidir. Beynəlxalq Energetika Agentliyinin (BEA) hesablamaları göstərir ki, elektrik enerjisindən istifadə ümumi enerjiyə olan tələbatı iki dəfədən çox üstələyir ki, bu da onun müasir dövrdə ölkələrin iqtisadiyyatında əhəmiyyətli rolunu bir daha təsdiqləyir. Bu artımın arxasında çox saylı amillər dayanır – bunlardan elektrik avtomobiləri və bərpa olunan enerji mənbələrindən (BEM) birbaşa istifadə özünü xüsusilə qabarık bürüzə verir. Hazırda, enerjinin son istehlakında neftin yarısından az olan elektrik enerjisinin payı 2040-cı ilə qədər qlobal səviyyədə nefti üstələyə bilər. Exxon Mobil şirkətinin proqnozlarına görə, qlobal miqyasda elektrik enerjisine olan tələbatın 60% artacağı gözlənilir. FV sistemləri qlobal miqyasda quraşdırılmış elektrik istehsalı gücünün ən böyük komponenti olacaqdır. 2040-cı ilə qədər aşağı karbonlu mənbələrin ümumi elektrik enerjisi istehsalının yaridan çoxunu təmin edəcəyi gözlənilir. Külək və günəş fotovoltaik sistemləri aparıcı mənbələrə çevriləcəkdir, lakin hidroenerji (2040-cı ildə ümumi istehsalın 15%-i) və nüvə (8%) enerjisi də öz əsas paylarını saxlayacaqdır. Bərpa Olunan Enerji Mənbələri üzrə Beynəlxalq Agentliyin (BEMBA) "2050-ci ilə qədər Yol Xəritəsi" sənədinə əsasən elektrik təchizatı yalnız BEM-dən ucuz qiymətə alına bilən "təmiz" elektrik enerjisi ilə birlikdə emissiyaların azaldılması üçün əsas həll yolu kimi ortaya çıxa bilər. Ümumi enerji istehlakında elektrik enerjisinin payı qlobal səviyyədə 2050-ci ilə qədər 50%-ə qədər (hazırda 20%) artmalıdır. Bu halda BEM enerji istehlakının üçdə ikisini və elektrik enerjisi istehsalının 86%-ni təşkil edəcəkdir. Kütləvi elektrikləşdirmə ilə iki dəfədən artıq artan bərpa olunan enerji əsaslı elektrik enerjisi CO₂ emissiyalarını 60% azaltmaqla energetika sektorunda zəruri azalma miqdarında ən böyük paya sahib olacaqdır. Belə tendensiya, xüsusilə bərpa olunan enerji mənşəli (əsaslı) elektrik enerjisinin daha rəqabətli olacağı və şəbəkə infrastrukturunun bu gücləri qəbul etməyə hazır olacağı 2025-ci ildən sonrakı dövr üçün nəzərə alınması vacibdir.

Bundan əlavə, iqlim dəyişikliyi və ətraf mühit, o cümlədən Paris Sazişi çərçivəsində dövlətlərin öhdəlikləri ilə əlaqəli artan tədbirlər və qlobal miqyasda karbohidrogen yanacaq aktivlərindən uzaqlaşma tendensiyası bütün Dünyada BEM-ə və effektiv enerjiyə transformasiyanın daha da sürətlənməsini gözləməyə əsas verir. BEA, enerji sektorunda bu transformasiyanın həm də bir fürsət olmasını vurğulayır. Bu transformasiya daha sürətli iqtisadi böyüməyə, daha çox iş yerinin açılmasına və ümumi sosial rifahın yaxşılaşmasına zəmin yarada və nəticədə, 2050-ci ilə qədər transformasiyanın illik əlavə xərclərindən 3-7 dəfə çox olan vəsaitə qənaət etmək mümkün ola bilər. 2050-ci ilə qədər enerji transformasiyası cari vəziyyətin saxlanması ssenarisi ilə müqayisədə ÜDM-in 2,5% çoxalmasını və qlobal məşğullüğün 0,2% artmasını təmin edə bilər. Adekvat və ədalətli transformasiyanı təmin edəcək siyasetin qəbul olunması müxtəlif ölkələr, bölgələr və icmalar üçün faydaları artıracaq və sosial bərabərsizlikləri aradan qaldıracaqdır. Qlobal energetika sistemini dəyişdirməklə elektrik enerjisi bütün Dünya əhalisi üçün əlçatan olacaq və enerji təhlükəsizliyi yaxşılaşacaqdır.

Enerji sektorundakı qlobal vəziyyət, qlobal istixana qazlar (İQ) emissiyalarında ciddi azalmalara ehtiyac olduğunu tövsiyə edən son elmi dəllillərlə xarakterizə olunsa da, digər tərəfdən statistik məlumatlar enerji ilə əlaqəli emissiyaların 2018-ci ildə tarixi pik həddə çatdığını göstərir. BEM-lərin lokomotiv olduğu enerji modellərinə surətli transformasiya gözləntiləri milli strategiyalara bir anda təsir etmir, belə ki, dövrümüzün karbohidrogen yanacaqlardan çox asılı olan enerji sistemlərində mövcud olan reallığı köklü surətdə dəyişmiş olur. BEA-nin (Noyabr 2019) dərc etdiyi "Dünya Enerji İcmalı" bu vəziyyəti bütün inkişaf etməkdə olan və inkişaf etmiş ölkələrdə

müxtəlif mümkün perspektivləri (2040-a qədər) və enerji siyasəti qərarlarında tələb olunan dəyişiklikləri araşdırın fərqli ssenarilər kontekstində təqdim edir. Bundan əlavə, BEMBA-nın hesablamalarına görə qlobal İQ emissiyaları indidən başlayaraq 2050-ci ilə qədər ildə 3,5% azaldılmalı və bu tendensiya həmin müddətdən sonra da davam etməlidir.

Yuxarıda qeyd olunan global tendensiyalar inkişaf etməkdə olan Azərbaycan Respublikasına da şamil oluna bilər. Fridrix Ebert Fondunun "Cənub-Şərqi və Şərqi Avropada, Cənubi Qafqazda və Orta Asiyada Enerji Transformasiyası" adlı tədqiqatına əsasən Cənubi Qafqaz regionunda bərpa olunan enerji texnologiyalarının tətbiqi və enerji səmərəliyi tədbirlərinin icrası çox yüksək texniki potensiala malik olmasına baxmayaraq olduqca yavaş sürətlə gedir. Azərbaycanla bağlı son bir neçə tədqiqat bu açıqlamani təsdiqləyir və göstərir ki, ölkədə enerji sistemlərinin karbonsuzlaşdırılması texniki cəhətdən mümkündür və sosial, iqtisadi və ekoloji baxımdan faydalı hesab olunur.

1. BEM-in mövcud vəziyyəti və proqnozlar

Dəyişən bərpa olunan enerji mənbələri (DBEM) əsaslı generasiya mənbələrinin geniş tətbiqi fonunda elektroenergetika sistemlərinin (EES) *çevikliyinin* və *enerji təhlükəsizliyinin* əhəmiyyətini kifayət qədər artırılmışdır. Eyni zamanda, kiber təhlükəsizlikdən tutmuş kəskin dəyişkən hava şəraitinə qədər yeni təhlükələr hökumətlərdən davamlı diqqət tələb edir. Aparılan hesablamalara görə 2018-ci ildə qlobal enerji istehlakı artımının demək olar ki, 1/5 hava şəraitinin dəyişməsi, yəni isti yay günlərində soyutma, soyuq hava şəratində isə əlavə istilik ehtiyacları ilə əlaqəli olmuşdur. Azərbaycan EES 21 iyul 2021-ci il tarixində ölkə üzrə havanın hərarətinin yüksək olması səbəbindən maksimum gücə olan tələbat və sutkalıq elektrik enerjisi istehsalında orta hesabla 12% artım qeydə alınmışdır.

Azərbaycan Dünyanın ən qədim neft və qaz hasil edən ölkələrindən biri olmaqla (2019-cu il üçün 1 milyard tondan çox təsdiqlənmiş neft ehtiyatına, həmçinin təxminən 2,1 trilyon kubmetr böyük təbii qaz ehtiyatlarına sahib olmaqla [3] yanaşı, bərpa olunan enerjinin böyük inkişaf potensialına malik olan ölkələr sırasına daxildir. Ölkə yüksək külək və günəş resurslarına və biokütlə, geotermal və su elektrik stansiyaları baxımdan əhəmiyyətli perspektivlərə malikdir -su elektrik stansiyaları üzrə >500 MVt, günəş FV >23000 MVt, külək (on-shor) >3000 MVt, tullantı / bioenerji 380 MVt, yekun olaraq >27000 MVt təşkil edir. Bundan əlavə, ucqar kənd ərazilərində müstəqil sistemlər üçün əlavə bərpa olunan istilik (biokütlə, günəş termal, geotermal) potensialı təqribən 0,6 MNET-il səviyyəsində qiymətləndirilir. Bütün ssenarilər üçün BEM-lərin əhəmiyyətli dərəcədə tətbiqi üçün proqnoz planları hazırlanmışdır. Bu potensialın reallaşdırılması məqsədilə hökumət 2016-ci ildə qəbul etdiyi Strateji Yol Xəritəsində öz qarşısına 2020-ci ilə qədər bərpa olunan enerji mənbəyinə 420 MVt potensialın əlavə edilməsini planlaşdırılmışdır. Bu məqsədi rəhbər tutaraq, BEM-in tikintisi üzrə bir neçə müqavilə imzalanmışdır ("Xızı" və "Pirəküskül" KES, qoyuluş gücü 240 MVt, "Ələt" PV stansiyası, 249 MVt) və Qarabağ bölgəsində qoyuluş gücü 300 MVt-da artıq KEQ və PVQ-in tikintisi üzrə ilkin texniki-əsaslandırma sənədləri icra olunmaqdadır. Eyni zamanda, elektrik enerjisinin hesablaşmasında "net metrinq" qaydasının tətbiqi yaxın 5 ildə fərdi evlərdə kiçik güclü DBEM əsaslı aktiv istehlakçıların meydana gəlməsini şərtləndirəcəkdir. Təqribi hesablamalara görə bu tip mənbələrin ümumi gücü 1000 MVt artıq ola bilər. Başqa sözlə, yaxın beş ildə DBEM-in ümumi həcmi 2000 MVt-dan artıq proqnozlaşdırıla bilər ki, bu da EES-nin qoyuluş gücündə payının 25%-dən çox təşkil edəcəyini proqnozlaşdırmağa imkan verir.

Bərpa olunan enerji mənbələrinin enerji balansında daha yüksək payı iqtisadiyyatın şaxələndirilməsindən başqa, digər çoxsaylı faydalar gətirə və eləcə də BEM ənənəvi olaraq neft və

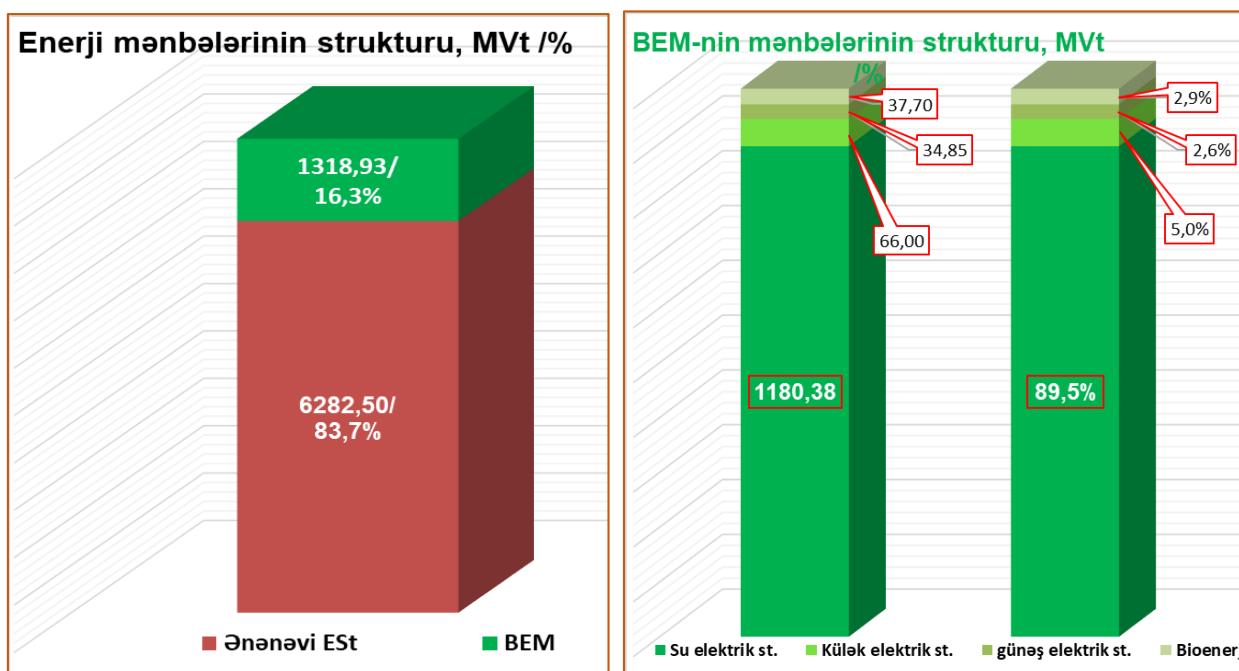
qazın üstünlük təşkil etdiyi ölkədə texnoloji innovasiyalara imkanlar yaratmaqla və iqtisadi dəyərin və bununla bağlı ÜDM artımının təmin edilməsi üçün yeni sektorlar açmaqla yeni məşğulluq imkanlarının katalizatoru qismində çıxış edə bilər. Bundan başqa, enerji effektivliyinin davamlı artması ilə yanaşı BEM-dən geniş istifadə ölkə daxilində neft və qaz istehlakının azalmasına gətirib çıxara bilər.

Azərbaycanda enerjiyə tələbatın proqnozlaşdırılan artımını nəzərə alaraq, bərpa olunan enerji mənbələri ənənəvi mənbələrlə müqayisədə layihənin icrasının daha qısa müddətə başa gəlməsi səbəbindən enerji generasiya gücünü daha tez əldə etmək üçün texniki həll təmin edir.

Bərpa olunan enerji mənbələri, həmçinin Azərbaycan Qlobal İqlim Dəyişmələri üzrə Çərçivə Konvensiyası üzrə götürdüyü hədəflərinə nail olmaq üçün kifayət qədər nəzərə çarpan aşağı karbonlu həll təklif edir. Ölkə Paris Sazişi çərçivəsində özünün Milli Səviyyədə Müəyyən Edilmiş Töhfə (NDC) sənədində qəbul edilmiş 1990-ci il baza ilinə nisbətən 2030-cu ilədək İQ emissiyasını 35% azaltmağı öhdəsinə götürmüştür və bu hədəfə nail olmaq üçün BEM-dən istifadə xüsusiylə vacib əhəmiyyət kəsb edir.

Azərbaycan Respublikasının “Azəraycan 2030: sosial-qtisadi ikşafının Milli Prioritetlərində “yaşıl artım” mərkəzi yerlərdən birini tutur. Eyn zamanda, Azərbaycanın da tərəfdəş olduğu Birləşmiş Millətlər Təşkilatının “Dünyamızın transformasiyası: 2030-cu ilədək dayanıqlı inkişaf sahəsində Gündəlik”dən irəli gələn öhdəliklərin icrası istiqamətində də xüsusi əhəmiyyət kəsb edir.

Hazırda Azərbaycan EES-nin enerji mənbələrinin qoyuluş gücündə payına görə ənənəvi mənbələr tərəbən 84%, BEM isə 16% təşil edir (şəkil 1). O cümlədən, ənənəvi enerji mənbələri əsasən İES (40%), QTES (46%) və daxiliyanma mühərriklərindən (14%) ibarətdir. BEM-in strukturunda SES əsas paya



Şək. 1. 01.01.2020-ci il tarixə (a) enerji mənbələrinin strukturu, (b) BEM-in strukturu

(90%) malikdir. Bərpa olunan enerji mənşəli generasiya güclərinin orta hesabla 90%-ini tənzimlənən BEM sinifinə daxil olan su elektrik stansiyaları təşkil edir (şəkil 1).

Qeyd olunmalıdır ki, ölkə üzrə generasiya mənbələrinin qoyuluş gücündə “Azərenerji” ASC-nin payı 6,5 QV və ya 86% olmaqla dövlət elektroenergetika sisteminin əsas enerji istehalçısı və sistem operatoru funksiyalarını yerinə yetirir. Bu baxımdan, Dövlət elektroenergetika sisteminin

dayanaqlı idarə olunması ASC-yə həvalə olunmuşdur və BEM-in hansı həcmidə və EES-in hansı nöqtələrinə və hansı formada integrə olunması üçün siyaseti məhz "Azərenerji" ASC formalasdırmalıdır.

2. BEM-in EES-nə artan penetrasiya səviyyəsinin sistemə təsiri

Elektroenergetika sistemlərinin normal parametrlər çərçivəsində dayanıqlı fəaliyyətinin təmin olunmasını xarakterizə edən vacib indikatorlardan biri enerjisistemlərinin *çevikliyi* hesab olunur. *EES-də çeviklik*, təklif-tələb balansını təmin etmək, gözlənilməz vəziyyətlərdə dayanıqlığı qorumaq və tələb-təklif tərəfindəki qeyri-müəyyənliyi aradan qaldırmaq qabiliyyətidir. Çevikliyi təmin etmək üçün yeni metod və idarəetmə tələbləri, enerji qeyri-müəyyənliyi və mövcudluğu ilə xarakterizə olunan bərpa olunan enerji ehtiyatlarının enerji balansında artması səbəbindən ortaya çıxmışdır. Bu təhlildə, EES- çevikliyi, çevik EES-nin xüsusiyyətləri, çevik mənbələri və qiymətləndirmə parametrləri beynəlxalq ədəbiyyatın bir hissəsi olaraq təqdim edilir. Həmçinin, dəyişən bərpa olunan enerji mənbələrinin nüfuzunun (penetrasiya səviyyəsinin) enerji sisteminin keçid prosesinə, statik, dinamik və tezlik dayanıqlığına təsiri keyfiyyətcə qiymətləndirilir, növbəti mərhələdə Azərbaycan EES-nin nümunəsində kəmiyyətcə qiymətləndirmək üçün təməlin yaradılmasına cəhdlər edilir, eləcə də çevikliyin təmin edilməsi üsulları qiymətləndirilir.

İlk növbədə DBEM-in ənənəvi mənbələrdən fərqləndirən beş əsas xüsusiyyətini qeyd edək:

- DBEG-nin maksimum gücü real-zaman kəsiyində mövcud olan küləyin surəti və günəş işığına uyğun olraq dəyişir;
- güclərin dəyişməsinin yalnız bir-neçə gün, təkmil proqnoz sistemləri olan hallarda isə bir-neçə saat əvvələ qiymətləndirilməsi mümkündür;
- sistemə konvertor texnologiyalarının köməyi ilə qoşulur - bu hər-hansı generasiya mənbəyinin gözlənilməz açılmasından EES-nin dayanıqlığının təmin olunmasında əhəmiyyətli ola bilər;
- DBEG modul tiplidir və daha çox paylanmış formada sistemə tətbiq edillir;
- təbii yanacaqdan fərqli olaraq, küləyin surəti və günəş şüası, nəql oluna bilmir və effektiv mənbələr daha çox yük mərkəzlərindən uzaq məsafələrdə yerləşir.

DBEM-in ümumi oxşarlıqlarının olmasına baxmayaraq, külək və günəş FV fərqli cəhətləri kifayət qədərdir.

Global miqyasda BEA tərəfindən tövsiyə xarakterli və uzun müddətli planlaşdırımda istifadə üçün nəzərdə tutılmış DBEM-nin penetrasiya səviyyiyəsinə görə təsnifləşdirilmiş beş Fazanı qeyd etmək olar və Azərbaycan üçün də faydalı ola bilər [4]:

1. *DBEM-in penetrasiya səviyyəsinin birinci fazası (<3-5%)* kifayət qədər sadədir: DBEM-in bu səviyyəsində sistemə heç bir nəzərə çarpan təsiri yoxdur. Külək və ya günəş qurğularının ilk qurğulardan daha çox böyük bir sistemə quraşdırıldığı yerlərdə, onların çıxışı və dəyişkənliyi diqqətdən kənarda qalır.
2. *İkinci Fazada (5 – 15%)DBEM-nin təsiri nəzərə çarpır*, lakin bəzi əməliyyat təcrübələrini təkmilləşdirməklə DBEM-in bu səviyyədə həcmi olduqca asanlıqla sistemə integrasiya oluna bilər. Məsələn, çevik elektrik stansiyalarının və tələbdə baş verən dəyişkənliyi səmərəli şəkildə planlaşdırmağa imkanların yaradılması üçün DBEM-in isehsal gücünü proqnozlaşdırmaq üçün təkmil proqnozlaşdırma sistemi qurmaq lazım ola bilər.
3. *Üçüncü Fazada (15 – 20%), çevikliyin təmin olunması pioritet məsələ olaraq gündəmə gəlir*. Bir sözə, DBEM dəyişkənliyinin təsiri həm ümumi sistemin işində, həm də digər elektrik stansiyalarında hiss olunur. DBEM-in penetrasiya səviyyəsinin bu mərhələsində EES-in çevikliyi məsəlesi aktuallaşır. Bu kontekstdə çeviklik sistemin tələb-təklif

balansında yüksək dərəcədə qeyri-müəyyənlik və dəyişkənliliklə məşğul olma qabiliyyəti kimi başa düşülür.

4. *Dördüncü Fazada* (20 -60%) yeni problemlər yaranır. Bu *Fazada sistemin dayanıqlığının təmin olunması müüm problem kimi meydana çıxır* - çox qısa zaman kəsiyində həyacanlandırıcı təsirlərə sistemin dözmə qabiliyyəti.

Sistem dayanıqlığının DBEM-in integrasiyası üçün bir problem halına gəldiyi nöqtə bir-çox sistemlərə xasdır və onilliklər əvvəl qəbul edilmiş mühəndislik qərarlarından asılı ola bilər. Bu səbəbdən dayanıqlıq problemlərinin hansı penetrasiya səviyəsində və nə vaxt ortaya çıxacağını söyləmək üçün sadə bir qayda yoxdur.

Enerji sistemi yuxarıda qeyd olunan bir mərhələdən digərinə dərhal keçməyəcək. Fazalar konseptualdır, sadəcə vəzifələrin prioritetləşdirilməsinə kömək etmək məqsədi daşıyır. Məsələn, ćevikliklə əlaqəli problemlər Üçüncü Faza halına gəlməzdən əvvəl, İkinci Fazada tədricən ortaya çıxacaq.

Eynilə, sistem dayanıqlığı ilə bağlı bəzi problemlər artıq Üçüncü Fazada ortaya çıxacaq.

Dördüncü Fazadan sonrakı beşinci və altıncı fazalar mövcud olsa da, hazırkı inkişaf mərhələsində baxılmır.

Beləliklə, yuxarıda qeyd olunaları nəzərə alaraq, dəyişən bərpa olunan əsaslı generasiya mənbələrinin EES-ə penetrasiya səviyyələrinə görə təsiri necədir? Hansı penetrasiya səviyyəsi optimal hesab oluna bilər? Bu və digər suallara sadə cavab yoxdur - iki eyni dinamik xassəli EES mövcud olmadığı kimi, iki fərqli ölkənin nə günəş, nə də külək mənbələri eyni xüsusiyatlara malik deyil. Nəticədə, külək və günəş enerjisinin müəyyən bir penetrasiya səviyəsini və ya dəyəri ilə əlaqəli integral parameter və sadə qaydalar əldə etmək mümkün deyil. Eyni ilə, iki müxtəlif ölkə DBEM-in müxtəlif Fazlarında eyni BEM əsaslı generasiya payına malik ola bilər. Şərti olaraq DBEM-in penetrasiya səviyyələrinə görə Fazalara bölünməsi planlaşdırılarda mümkün integrasiya səviyyəsini qiymətləndirmək üçün istifadə oluna bilər. Azərbaycan EES üzrə penetrasiya səviyyəsinin kritik həddinin (təqribən >20%) təyin olunması, onun xüsusiyatlərini nəzərə alamaqla, hər bir konkret layihə üzrə müvafiq hesablamaların aparılmasından sonra müəyyən oluna bilər.

Eyni zamanda, aydınlaşdır ki, yüksək dəyişkənlilik xüsusiyyəti ənənəvi güc mənbələrinin normal fəaliyyətini kifayət qədər çətinləşdirir.

Dəyişkənlilik həm planlaşdırma, həm də idarəolunma mərhələsində nəzərə alınmalıdır. Baxmayaraq ki, ənənəvi tələbatçıların istehlak gücü daima dəyişir, lakin uzun müddəli resurs planlaşmasında belə dəyişmə mühüm əhəmiyyətə malik deyil, DBEM-nin gündəlik təsikdə dəyişkənliliyi isə bir gün erkən planlaşdırılarda vacib faktor kimi çıxış edir. Çox qısa bir müddət olaraq təyin edilə bilən zaman aralığında (ms), DBEM əsaslı generasiyada ani dəyişkliklər səbəbindən yeni idarəetmə sistemləri tələb olunur. Bunlar aktiv və reaktiv güc, gərginlik və tezliyin dəyişmə dərəcəsi üçün idarəetmə sistemləridir [5].

DBEG-nin geniş tətbiqi halında əməliyyat ćevikliyinin növü vaxt miqyasından asılıdır. Saniyə - dəqiqə vaxt aralığında daha çox tezlik nəzarəti və güc ehtiyatlarına ehtiyac olsa da, bir neçə dəqiqədən bir saatə qədər və bir saatdan bir günə qədər vaxt aralığında erkən planlaşdırmanın ćevikliyi tələb olunur.

DBEM-də KQ və FVQ-in üstünlük təşkil etdiyini nəzərə alaraq, ayrılıqda bu mənbələrin EES-ə təsirlərini nəzərədən keçirək.

2.1. Külək elektrik stansiyasının (KES) EES-in dayanıqlığına təsiri

Holttinen'in araşdırılmalarına görə, Skandinaviya ölkələri üçün külək enerjisinin *EES-ə 10% nüfuz etməsi, ehtiyat gücün həcminin quraşdırılmış külək elektrik stansiyalarının gücünün 1,5% -4% səviyyəsində artırılmasını tələb edir.* Diggər tərəfdən, elektrik enerjisində olan tələbatı təmin edən elektrik stansiyalarının minimum buraxıla bilən gücü nə qədər aşağı olarsa, elektrik stansiyalarını dayandırmağa ehtiyac olmadan sistemə daha çox DBEG-nin nüfuz etməsi təmin edilə bilər. Buna görə də, artan güc ehtiyatı tələbləri ilə yanaşı, elektrik stansiyalarının buraxıla bilən minimum gücləri da qısa müddətli planlaşmada problemlərə səbəb ola bilər [6]. BEM-in penetrasiya səviyyəsi (5-35)% və müxtəlif dislokasiya nöqtələri üçün gərginliyin dayanıqlığı baxımından Naser və digərləri [7,8] tərəfindən tədqiqat işləri aparılmışdır. Müəyyən olunmuşdur ki, daha aşağı penetrasiya səviyyəsində EES daha dayanıqlı fəaliyyət göstərir. Nəticələr göstərir ki, *KES -in bir neçə nöqtədə şəbəkəyə qoşulması tək nöqtəli əlaqə ilə müqayisədə gərginliyin sabitliyinə müsbət təsir göstərir.* Hossain və digərlərinin görə [9], İkiqat Qidalanan İnduksion Generator (Doubly Fed Induction Generator) (DFIG) turbinləri, Sinxron Generatorlara (SG) qədər reaktiv güc verə bilmir və böyük qısaqapanma cərəyanları yarada bilmir. Beləliklə, zəruri hallarda reaktiv güc ilə təmin edilən gərginlik dəstəyi DFIG üçün SG-dən daha pisdir. Digər tərəfdən, Londero və digərləri [10], yüksək penetrasiya səviyyələrinin sistemin gərginlik üzrə dayanıqlığına müsbət töhfə verdiyi ifadə edilmişdir. Türbinlərin penetrasiya səviyyəsi artdıqca sistemə daha çox reaktiv güc dəstəyi verə biləcəyi ifadə edilir.

Meegahapola və Flynn [11], 39 düyünlü test sistemində çox yüksək (40%) *külək enerjisinin* (DFIG) nüfuz etməsinin enerji sisteminin kecid və tezlik dayanıqlığına təsirini araşdırmışdır. Küləyin yüksək nüfuz etdiyi bir bölgəyə yaxın ərazidə kecid prosesinin dayanıqlığına mənfi təsir etdiyi müşahidə edilmişdir. Bunun əsas səbəbi, KQ -lər qismən yükləndiyi zaman aktiv enerji istehsalının azalması və reaktiv güc istehlakının artması kimi göstərilmişdir. SG -lərə yaxın yerdə qəza halında, KQ-lərin sinxronlaşdırıcı gücünün artırılması yolu ilə şəbəkədəki güc axınlarına töhfə verməklə kecid prosesinin dayanıqlığının yaxşılaşdırıldığı müşahidə edilmişdir. Edrah və başqaları [12], bir SG və DFIG turbinlərindən ibarət külək stansiyasından istifadə edərək üç generatorlu 9 düyünlü test sisteminə müxtəlif ssenarilər tətbiq etməklə əldə edilən nəticələrə görə, sistemin rotor bucağının dayanıqlığına SG əvəzinə ekvivalent güc kimi DFIG turbinlərin istifadəsi mənfi təsir göstərir. Bununla yanaşı, bu təsirin lazımı idarəetmə strategiyalarından istifadə etməklə azalda biləcəyi vurgulanır.

Qureshi və İqbal [13], Rororu Qısaqapanmış İnduksion Generator (Squirrel Cage Induction Generator) (SCIG) və DFIG turbinlərinin 9 düyünlü 3 maşınılı sistemindən istifadə edərək sistemin tezlik üzrə dayanıqlığına təsiri üzrə araşdırmanın nəticələrinə görə, KQ-lərin tezlik meyletməsinin söndürülməsinə töhfəsi SG-lərə nisbətən SCIG-dən daha azdır. DFIG turbinlər, rotorun mexaniki sürəti şəbəkə tezliyindən ayrıldığı üçün tezlik meyletməsinə cavab vermir.

2.1.1. Külək elektrik stansiyaları interqrə olunmuş EES-də gərginliyə görə dayanıqlıq məsələləri

Enerjisistemdə külək enerji mənbələrinin qoyuluş güclərinin artması ilə reaktiv güc və gərginlik üzrə rejimin tənzimlənmə effektivliyinin yüksəldilməsi yolu ilə gərginliyin dayanıqlıq səviyyəsinin artırılmasına nail oluna bilər. Sistemə qoşulmuş külək stansiyalarının güc hasılatının qeyri-müəyyənliyi və davamlı dəyişkənliliyi nəzərə alıqda sistemin dayanıqlı vəziyyətini təyin edən

parametrlər – şəbəkə üzrə ötürürlüən güc həddi, onun düyünlərində gərginliyin kritik qiymətləri təsadüfi dəyişmə xarakterinə malik olacaq. Bu parametrlərinin qiymətlərinin təyin edilməsi üçün sistemin rejimlərinin ehtimal modelləşdirilməsi yolu ilə ehtimal güc paylanmasıın (EGP) hesabatlarını aparmaq tələb olunur. Müasir dövrdə enerjisistemdə stoxastik yük və ya generasiya ilə şərtlənən EGP-nin müxtəlif ədədi və analitik analizi üsulları təklif edilmişdir [14].

Külək stansiyasının gərginliyin dayanıqlığına təsirinin tədqiqi enerjisistemə integrasiya olunan KEQ-in qoyuluş güclərinin hədd qiymətlərinin təyini üçün, həm də bu tədqiqatların nəticələri əsasında istismar şəraitlərində sistemin fəaliyyətinin etibatlılığının saxlanması, başqa sözlə, KEQ-dən olan hasilatın fluktasiyaları zamanı elektrik sisteminin bütün düyünlərində gərginliyin dayanıqlığının saxlanması üçün vacibdir. KEQ-in generasiya gücünün stoxastik dəyişmələri şəraitində sistemin rejiminin ehtimal modeli aşağıdakı kimi ifadə oluna bilər [14]:

$$\begin{cases} \Delta P_i = P_{g(i)}(\lambda) + \tilde{P}_{KEQ,(i)} - P_{Y(i)}(\lambda) - \tilde{U}_i \sum_{j=1}^N \tilde{U}_j (G_{ij} \cos \delta_{ij} + B_{ij} \sin \delta_{ij}) = 0 \\ \Delta Q_i = Q_{g(i)}(\lambda) + Q_{SKB(i)} - \tilde{Q}_{KEQ,(i)} - Q_{Y(i)}(\lambda) - \tilde{U}_i \sum_{j=1}^N \tilde{U}_j (G_{ij} \sin \delta_{ij} - B_{ij} \cos \delta_{ij}) = 0 \end{cases}$$

Burada, $i = N = (N_{PU} + N_{PQ})$, $i = N_{PQ}$

$P_{g(i)}(\lambda), Q_{g(i)}(\lambda)$ - i düyünenə qoşulan ənənəvi mənbələrin aktiv və reaktiv güc hasilatları;

$\tilde{P}_{KEQ,(i)}^t, \tilde{Q}_{KEQ,(i)}^t$ - KEQ-in t zamanı ərzində aktiv və reaktiv güc hasilatları;

$P_{Y(i)}^t, Q_{Y(i)}^t$ - i düyündə aktiv və reaktiv yükler;

$Q_{SKB(i)}$ - i düyünenə qoşulmuş kompensasiya qurğularının gücü;

G_{ij}, B_{ij} - i və j düyünləri arasındakı aktiv və reaktiv keçiriciliklər;

λ - şəbəkənin yüklənmə əmsalı (yük artımı əmsalı);

N - şəbəkə düyünlərinin ümumi sayı $N = N_{PV} + N_{PQ}$;

\tilde{U}_i, \tilde{U}_j - i və j düyünlərindəki hesabi gərginliklər;

t_k - zamanın k -ci fiksə olunmuş qiyməti.

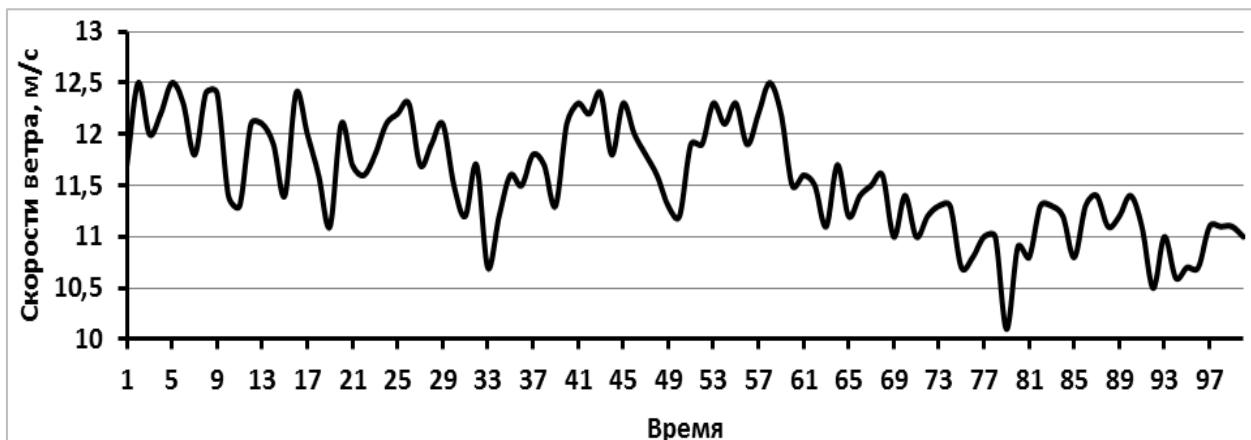
Yuxarıda qeyd olunan ehtimal modelin köməyi ilə gərginliyin dayanıqlığı çoxsaylı təkrar hesabatlar ilə imitasiya olunan EGP nəticələrinin analizi əsasında təyin edilir. Aparılan hesabi eksperimentlərin alqoritmi [14]-də verilmişdir.

2.1.2. Gərginliyin dayanıqlığı üzrə hesablam-təcrübə nəticələri

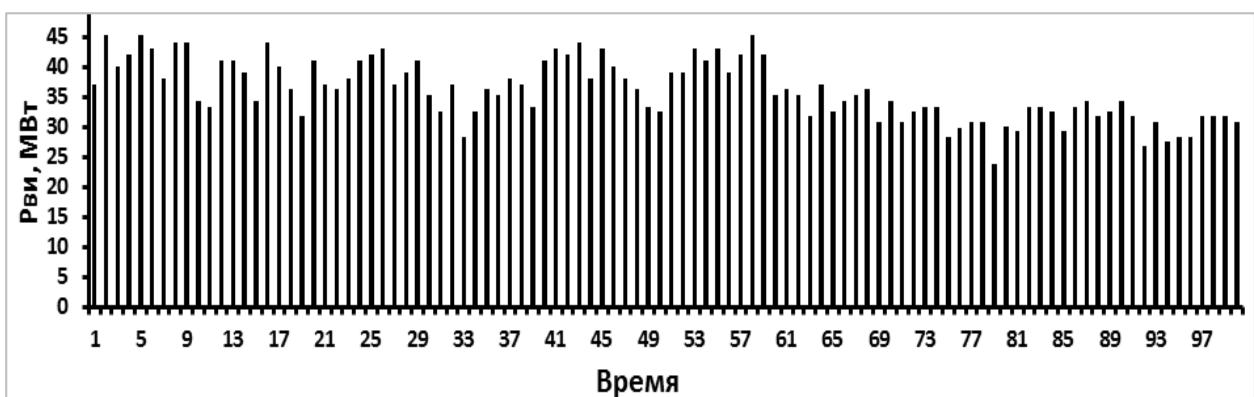
Real Azərbaycan enerjisisteminin Yaşma düyüni üçün hesabi-təcrübi nəticələr əsasında güc hasilatının ehtimal xarakteristikaları, onun gərginliyin dayanıqlığına təsiri və həmçinin gərginliyin dayanıqlığının saxlanması şərtini təmin edən yekun külək parkının gücü təyin edilmişdir.

Hesabat modelləşməsi külək sürətinin dəqiqlik verilənləri əsasında aparılmışdır. Şəkil 2 və 3-də küləyin sürətinin və KEM-in hasilat gücünün dəyişmə fragmentləri verilmişdir. Ölçmə periodu

səhər yük maksimumu dövrünə uyğundur. Diaqramdan göründüyü kimi verilmiş periodda stansiyanın hasılatının orta qiyməti 20 MVt təşkil edir (şəkil 3).



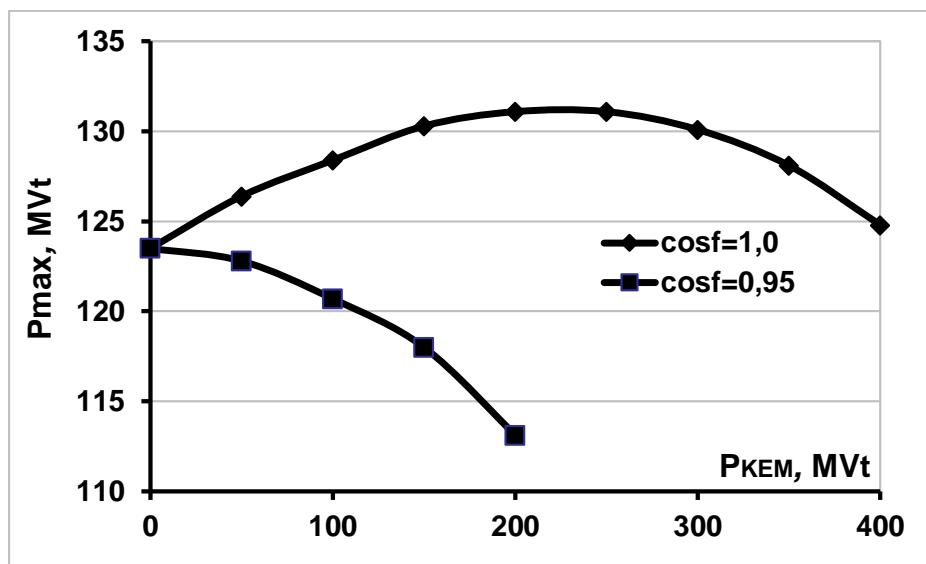
Şəkil 2. Küləyin sürətinin dəyişmə əyrisi



Şəkil 3. KEQ-in gücünüün dəyişmə diaqramı

Enerjisistemin düyününə qoşulan külək stansiyasının maksimal mümkün gücün qiyməti külək turbinlərinin müxtəlif yekun qiymətləri və küləyin sürətinin stoxastik dəyişmələrinə uyğun EGP-nin analizi əsasında axtarılır. Şəkil 4-də nəzarət olunan elektrik veriliş xəttinin maksimal yüklənməsinin ümumiləşdirilmiş hesabat nəticələri və güc həddinin bu qiymətinə uyğun kritik gərginliyin qiyməti verilir.

Şəkil 4-dən göründüyü kimi, baxılan sxem fragmentində gərginliyin dayanıqlığı təmin olunmaqla enerjisistemə qoşula biləcək KEM-in maksimal gücü 200 MVt və uyğun olaraq kritik gərginliyin qiyməti 64,4% təşkil edir. Müəyyən dayanıqlıq ehtiyatını nəzərə aldıqda bu gücü 50 MVt aşağı götürməklə, 150 MVt təyin etmək olar. Bu halda müəyyən dayanıqlıq ehtiyatı ilə baxılan halda gərginliyin dayanıqlığı təmin ediləcəkdir. Qeyd olunan metodika və alqoritm əsasında enerjisistemin digər prioritət düyünləri üçün analogi tədqiqatlar aparmaq olar.



Şəkil 4. $\cos \varphi$ -nin müxtəlif qiymətlərində $P_{\max} = f(P_{KEM})$ asılılıqları

2.2. Fotovoltaik sistemlərin EES-nə təsiri

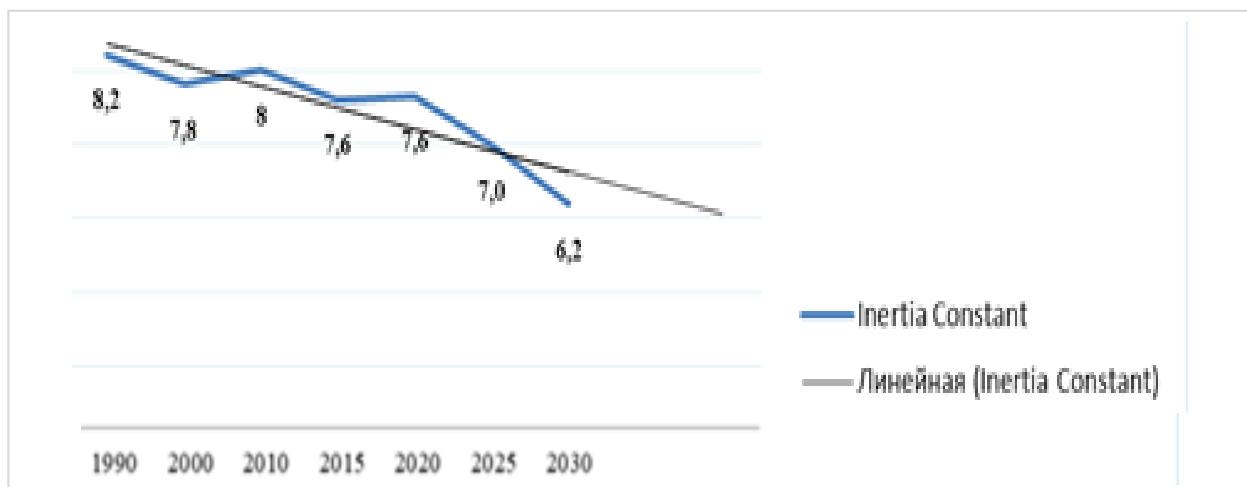
Kaliforniya Müstəqil Sistem Operatoru (CAISO) [14] tərəfindən müxtəlif bilirləşmə sxemləri üçün FV sistemlərin gərginliyi və reaktiv güc reaksiyaları ilə bağlı araşdırmağa görə öturmə şəbəkəsinə qoşulan FV-nin payının yüksək olması səbəbindən həddindən artıq ifrat gərginlik problemlərinin qəcilməz olduğu ifadə edilmişdir. FV ilə bir sistemdə fəaliyyət göstərən STATCOM-ların ifrat gərginliyə səbəb olduğu da qeyd edilmişdir. Bunun əsas səbəbi, pozuntunun aradan qaldırılmasından sonra aşağı işləmə sürətinə malik olan STATCOM-lar tərəfindən sistemə bir neçə dövr ərzində reaktiv gücün verilməsidir. Eftekharnejad və digərlərinə [15] görə ən çox təsirlənən sistem parametri gərginliyin amplitududur. Xüsusilə, 20% və daha yüksək penetrasiya səviyyələrində öturmə xəttiin birləşmə şinlərində həddindən artıq gərginlik meyletməsi mydana gəlir. Həmçinin keçid prosesi müddətində gərginlik uçqunu baş verir.

Tamimi və başqaları, mərkəzləşdirilmiş və paylanmış PV sistemlərinin Ontario enerji sisteminin gərginlik üzrə dayanıqlığa təsirlərinin araşdırmasının nəticələrinə görə (quraşdırılmış gücü 2000 MVA -a qədər olan müxtəlif penetrasiya səviyyələri araşdırılmışdır), paylanmış FV -nin mərkəzləşdirilmiş sistemlərlə müqayisədə gərginliyin dayanıqlığını əhəmiyyətli dərəcədə artırıbiləcəyini müəyyən edilmişdir [16].

Keçid prosesinin dayanıqlığının yoxlanılması məqsədilə aparılan tədqiqatlarla, penetrasiya səviyyəsinin təsiri ilk olaraq 5-30% aralığında araşdırılmalardan əldə olunan nəticələrə görə, FV-nin 10%-dən yuxarı penetrasiya səviyyələri üçün sistemin dayanıqlığının yaxşılaşdırılması bu elektrik stansiyalarının qısaqapanma müddətində əsas rejim parametrlərinin tənzimlənməsində töhfə vermə imkanlarından asılıdır [14]. Eftekharnejad və digərləri [15] fərdi mənzillərdə quraşdırılan kiçik və sənaye tipli FV sistemlərinin penetrasiya səviyyəsinin bir-biri ilə əlaqəli böyük bir enerji sistemində təsirini araşdırmışdır. Bu məqsədlə, ənənəvi generasiya payı 50% -ə qədər azaldılaraq, FV penetrasiya səviyyələri araşdırılmışdır. Təhlillər göstərmişdir ki, yüksək FV penetrasiya səviyyəsi sistemin keçid prosesinin dayanıqlığına müsbət və mənfi təsir göstərir. Həmçinin, FV penetrasiya səviyyələri, sistem topologiyası, pozuntunun növü və yeri təsirin xarakteri üçün əsas amillərdir (müsəbat və ya mənfi). Bundan əlavə, fərdi evlərdə FV -nin böyük bir hissəsinin fəaliyyətinin

dayanması yaxınlıqdakı SG-lərin rotor bucaqlarının meyletməsinə və gərginlik fluktasiyalarına səbəb olmuşdur.

Eftekharnejad və digərləri öz tədqiqatlarında 69 kV gərginlik səviyyəsində toplanmış böyük ölçülü FV və fərdi evlərdə quraşdırılmış FV-lərdən istifadə etmişdir. Əldə olunan nəticələrə görə, böyük şərti ənənəvi generatorların FV mənbələri ilə penetrasiya səviyyəsi 30% -dən 40% -ə qədər artdıqca dempfer nisbətində əhəmiyyətli azalma müşahidə olunmuşdur. Penetrasiya səviyyəsinin artması, sistemin inersiyasının azalmasına səbəb olaraq sistemin dempferləmə qabiliyyətinin azalmasına səbəb olmuşdur [17].



Şək.2. Azərbayca EES-nin inersiya sabitinin dinamikası

Şəkil 2-dən aydın görsənir ki, 2020-2030-cu illerdə Azərbaycan EES-də BEM-in geniş penetrasiya səviyyəsi ilə əlaqəli ekvivalent inersiya göstəricisi hesabat dövrünün sonunda 18,4% azalmağa məruz qalır. Nəticədə, EES-də güc balansının gözlənilməz pozulması halında inersiya reaksiyası azalır və belə vəziyyət sistemin çevikliyi və enerji təhlükəsizliyi ilə bağlı yeni problemləri gündəliyə gətirir. Gündəlik kontekstdə nəzərdən keçirək, 21-ci əsrin sisteminin ətaləti, gecə satlarında aşağıdır (tələbat az olduqda, az elektrik stansiyası işləyir) və yüksək tələbat zamanı yüksəkdir. FV-nin sistemin ətalətinə təsiri, həm yüksək, həm də aşağı tələbat dövründə baş verəcək küləkdən daha az olacaqdır.

Aydındır ki, enerji balansında BEM-in payının artması, sistemin çevikliyinə təsirini qiymətləndirmək üçün təcili bir ehtiyac yaradır, çünkü günəş və külək üzərində qurulan generasiya "kəsilən" və gözlənilməz bir təbiətə malikdir. Tezliyin hər iki (birinci və ikinci) tənzimlənmə sistemi inersiya reaksiyası ilə əlaqəli olduğu üçün BEM-in integrasiya səviyyəsindən ciddi şəkildə asılıdır.

Alquthami və digərləri [18] FV penetrasiya səviyyəsinin səviyyələrini 5%, 10% və 20% hədləri üçün tezlik üzrə dayanıqlıqa bağlı digər araşdırmalarında göstərmişdir ki, FV-nin 20% penetrasiya səviyyəsindən başlayaraq EES-nin tezliyə görə dayanıqlıq qabiliyyəti kifayət qədər azalmağa məruz qalır.

Nəticə

1. EES-də DBEG-nin penetrasiya səviyyəsinin artması ($>20\%$) sistemin davranışına birbaşa təsir göstərir. DBEG-nin buraxılış gücündəki rəqsələri EES-nin statik, dinamik dayanıqlığına, kecid prosesinə, tezlik və gərginliyin tənzimlənməsinə mənfi təsir göstərə bilər.

2. Fazaları ümmüniləşdirərək, böyük bir enerji sisteminin müəyyən hissələrinin sistemin qalan hissəsindən əvvəl daha inkişaf etmiş bir Fazaya giri biləcəyi mükündür. Ənənəvi olaraq, alt şəbəkələrin bir-biri ilə əlaqəli əsas şəbəkəyə qoşulduğu bir vəziyyətdədir.
3. DBEM çıxışının vaxtinin enerji tələbi ilə korelyasiyası, sistemin ölçüsü və sistem daxili əlaqələri və operatorun DBEM çıxışını proqnozlaşdırma qabiliyyəti, bütün bunlar yeni bir integrasiya fazasının nə vaxt baş verəcəyini müəyyən edəcək.
4. DBEM-nin səmərəli şəbəkə integrasiyası, yerləşmə Fazasına uyğun və mütənasib olan tədbirləri üzə çıxaracaqdır. Bəzi sistemlərdə bu tədbirlər mövcud aktivlərdən istifadə etməklə həyata keçirilə bilər, digərlərində isə əlavə infrastruktura investisiya qoyulması tələb oluna bilər. Hər iki halda, artan DBEM payına uyğunlaşmaq uzun müddətdə daha böyük xərclərə səbəb olacaq və enerji sisteminin təhlükəsizliyini təhdid edə bilər. Əksinə, həddindən artıq yüksək tələblərin qoyulması xərcləri və/və ya DBEM-in tətbiq sürətini azalda bilər.
5. Enerji təhlükəsizliyi və çevikliyi üçün kritik olan və sistemin səmərəli fəaliyyəti üçün lazım olan tədbirləri ayırmak məqsədə uyğun hesab olunur.
6. İkinci Fazadan başlayaraq sistem operatorunun DBEM generasiyanın böyük bir hissəsini dayandırma bilməsi üçün səlahiyyətin verilməsi vacibdir. Əks təqdirdə, enerji təhlükəsizliyi risk altında ola bilər. Əksinə, təsirli bir proqnozlaşdırma sisteminin olmaması sistem operatorunu digər generatorları həddindən artıq yükleməyə və sonra külək istehsalını həddindən artıq azaltmağa-xərcləri artırmağa səbəb ola bilər.
7. Fərdi evlərdə quraşdırılmış günəş invertorlarının tənzimləmə parametrlərin dəyişdirilməsi imkannın olması zəruridir.
8. Enerji saxlanclarının tətbiqinin diqqətdə saxlanması vacib hesab olunur.
9. Şəbəkələri balanslaşdırmaq üçün DBEM-dən istifadə olunması imkanlarının araşdırılması tələb olunur.
10. Sistemin tənzimləmə qabiliyyətinin artırılması məqsədilə, “Tovuz” və digər böyük SES-in, eləcə də Hidroakumasiya stansiyasının tikintisinin planlaşdırılması məqbul hesab olunur.
11. Ötən dövrə, DBEM-lər enerji sektoruna sistem və köməkçi xidmətlər göstərmək öhdəliyindən “azad edilmişdi”. Artıq, sistemin etibarlılığını təmin etmək üçün xidmətlərin göstərilməsi və tələb-təklifin balanslaşdırılmasında iştirakının təmin olunması (məsələn, Danimarkada, bütün külək enerjisi qurğuları proqnozlaşdırılan gücünü təmin etməli və çıxışı proqnozla uyğun gəlmirsə cərimələr ödəməlidir, bu da külək elektrik stansiyalarının sahiblərini proqnozlaşdırma vasitələrinin təkmilləşdirilməsinə sərmayə qoymağa vadar edir. Cənubi Avstraliyada tənzimləyici gələcəkdə tezlik nəzarəti üçün DBEM-dən istifadə edilməsinə qərar vermişdir).
12. Ötürmə şəbəkəsinin gücləndirilməsi və genişləndirilməsi, paylanmış generasiyanın balanslaşdırılması, qonşu ölkələrlə qarşılıqlı əlaqələrin inkişaf etdirilməsi və beynəlxalq enerji bazarlarına çıxışın əldə olunması kimi tədbirlər, BEM-nin artan penetrasiya səviyyəsinin şəbəkəyə integrasiyası üçün çevikliyin artırılması ən yaxşı texniki həlldir.

Ədəbiyyat siyahısı

- [1] S.M. Senderov, N.A. Yusifbayli, V.I. Rabchuk, A.M. Huseynov, V.Kh. Nasibov, S.V. Vorobev, G.B. Guliyev, E.M. Smirnova "Geopolitical Features of Energy Security in the Caspian Regions of Russia and Azerbaijan" Geopolitics of Energy, Volume 41, Issue 1, January 2019, Canadian Energy Research Institute, Calgary, Alberta, Canada, p. 5-9.
- [2] Yusifbayli N.A , Aghaliyev N.N. Assessment of Power System Flexibility. Scientific – Industrial Journal - EEEC, ISSN 2664-5289, V10N2, p56-67. <http://eccc.az/en/home/>
- [3] BP şirkətinin Dünya Energetikasının Statistik İcmalı, 2019
- [4] IEA, System Integration of Renewables, An update on Best Practice -2018.
- [5] C.-T. Lee, C.-W. Hsu, P.-T. Cheng, A low-voltage ride-through technique for gridconnected converters of distributed energy resources, IEEE Trans. Ind. Appl. 47(2011) 1821–1832, <https://doi.org/10.1109/TIA.2011.2155016>.
- [6] H. Holttinen, Impact of hourly wind power variations on the system operation inthe Nordic countries, Wind Energy: An International Journal for Progress andApplications in Wind Power Conversion Technology 8 (2005) 197–218, <https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.12.051>.
- [7] Nurali Yusifbayli1[0000-0001-7948-4682] and Huseyngulu Guliyev2[0000-0002-3793-8129] Aydin Aliyev3[0000-0001-6246-7018]. Voltage Control System for Electrical Networks Based on Fuzzy Sets. Advances in Intelligent Systems and Computing 1323.11th World Conference “Intelligent System for Industrial Automation”. (WCIS-2020). p.55-63.DOI 978-3-030-68004-6_8, © 2021
- [8] I. Naser, A. Garba, O. Anaya-Lara, K. Lo, Voltage Stability of TransmissionNetwork with Different Penetration Levels of Wind Generation, UniversitiesPower Engineering Conference (UPEC), 2010 45th International, IEEE, 2010,pp. 1–5.
- [9] M.J. Hossain, H.R. Pota, M.A. Mahmud, R.A. Ramos, Investigation of the impacts of large-scale wind power penetration on the angle and voltage stability of powersystems, IEEE Systems journal 6 (2012) 76–84, <https://doi.org/10.1109/JSYST.2011.2162991>.
- [10] R.R. Londero, C. de Mattos Affonso, J.P.A. Vieira, Long-term voltage stabilityanalysis of variable speed wind generators, IEEE Trans. Power Syst. 30 (2015)439–447, <https://doi.org/10.1109/TPWRS.2014.2322258>.
- [11] L. Meegahapola, D. Flynn, in: Impact on Transient and Frequency Stability for aPower System at Very High Wind Penetration, Power and Energy Society GeneralMeeting, 2010, pp. 1–8, <https://doi.org/10.1109/PES.2010.5589908>.
- [12] M. Edrah, K.L. Lo, O. Anaya-Lara, Impacts of high penetration of DFIG windturbines on rotor angle stability of power systems, IEEE Transactions on Sustainable Energy 6 (2015) 759–766, <https://doi.org/10.1109/TSTE.2015.2412176>.
- [13] U.B. Qureshi, S.J. Iqbal, Electrical, Computer and Communication Technologies (ICECCT), 2017 Second International Conference on, in: Impact of Large Scale Wind Penetration on Power System Frequency Stability, IEEE, 2017, pp. 1–6,<https://doi.org/10.1109/ICECCT.2017.8117971>.
- [14] Y. Zhang, S. Zhu, R. Sparks, I. Green, Impacts of Solar PV Generators on Power System Stability and Voltage Performance, Power and Energy Society GeneralMeeting, 2012, pp. 1–7, <https://doi.org/10.1109/PESGM.2012.6344990>.
- [15] S. Eftekharnejad, V. Vittal, G.T. Heydt, B. Keel, J. Loehr, Impact of increasedpenetration of photovoltaic generation on power systems, IEEE Trans. Power Syst.28 (2013) 893–901, <https://doi.org/10.1109/TPWRS.2012.2216294>.
- [16] B. Tamimi, C. Cañizares, K. Bhattacharya, System stability impact of large-scale and distributed solar photovoltaic generation: the case of Ontario, Canada, IEEEtransactions on sustainable energy 4 (2013) 680–688, <https://doi.org/10.1109/TSTE.2012.2235151>.

- [17] S. Eftekharnejad, V. Vittal, G.T. Heydt, B. Keel, J. Loehr, Small signal stability assessment of power systems with increased penetration of photovoltaic generation: a case study, IEEE Transactions on Sustainable Energy 4 (2013) 960–967, <https://doi.org/10.1109/TSTE.2013.2259602>.
- [18] T. Alquthami, H. Ravindra, M. Faruque, M. Steurer, T. Baldwin, Study of Photovoltaic Integration Impact on System Stability Using Custom Model of PV Arrays Integrated with PSS/E, North American Power Symposium (NAPS), 2010, pp. 1–8, <https://doi.org/10.1109/NAPS.2010.5619589>.

This work was supported by the Science Development Foundation under the President of Republic of Azerbaijan – Grant № EİF-BGM-4-RFTF-1/2017-21/09/1-M-01, 26.08.2020



Nurali Yusibayli is Vice Rector of Azerbaijan Technical University. He graduated from Kiev Polytechnic Institute in 1986. N. Yusibayli received his degree of Candidate of Technical Sciences in 1995, and Doctor of Technical sciences at the Azerbaijan Scientific Research and Design-Prospecting Power Engineering Institute in 2004. His research interests include: reliability and security of power systems, development of national and interstate electric power systems, SCADA, green energy and energy efficiency



Valeh Nasibov was born in Djebrail region of Azerbaijan Republic on April 18, 1964. He graduated from the Moscow Energy Institute in 1987. In 2005 he was awarded a PhD's degree, in 2016 he became an assistant professor. Since 1987 to the present he has been working in Azerbaijani Scientific – Research Designed–Prospecting Institute of Energetics. From 2009 he is the head of "Perspective development the electricity" Department.



Guliyev Huseyngulu Bayram oglu - candidate of technical sciences, associate professor. In 1985, he graduated from the Energy Faculty of the Azerbaijan Institute of Petroleum and Chemistry with a degree in Electrical Systems. In 2003 he defended his dissertation on "Development of methods for the analysis of non-sinusoidal regimes in industrial load nodes." The main scientific direction covers the areas of reactive power compensation and intelligent management of electricity quality indicators. He is currently the Dean of the Faculty of Energy and Automation at the Azerbaijan Technical University.



Aghaliyev Nijat (born on November 09, 1994 in Khachmaz region, Azerbaijan) studies for a PhD at Azerbaijan Technical University. . He works as electromechanical engineering supervisor at Complex Drilling Works Trust, SOCAR since June, 2018. His research is concerned with the flexibility of power systems with high penetrations of variable generation based on smart technologies. He is also interested in advanced modeling and control techniques applied to power plant.

DIAGNOSIS RESEARCH OF THE FAULT OF OIL-IMMERSED POWER TRANSFORMERS BASED ON PROBABILISTIC NEURAL NETWORK

Atrafi Giyasi M.A., Bodurov V.C. Kerimov K.A.

Abstract

The oil-immersed power transformer is one of the key devices in the power system, they are filled with a fluid that serves various purposes. The fluid acts as a dielectric media, an insulator and a heat transfer agent. The most common type of fluid used in transformers is of a mineral oil origin. During normal operations, there is usually a slow degradation of the mineral oil to yield certain gases that are dissolved in the oil. However, when there is an electrical fault within a transformer, gases are generated at a much more rapid rate. DGA is probably the most widely employed preventative maintenance technique in use today to monitor on-line transformer operations, and a number of DGA interpretation guidelines have been developed by different organizations, e.g. IEC60559 [1], IEEE C57.104-1991 [2], CIGRE TF 15.01.01 [3] and GB7252- 87 [4]. The reliability of the power grid is guaranteed by its safe operation. Therefore, it is necessary to reduce transformer failures with precautionary measures. Nowadays, the three-ratio method of dissolved gas analysis (DGA) is the most effective and convenient method in transformer fault diagnosis. However, when using the three-ratio method as the interpretation, it exists some disadvantages such as coding defects and threshold criterion defect. A new way for this problem is provided by artificial neural network, which has the advantages such as parallel processing, self-adaptation self-study, association memory, non-linear mapping, and other features. The renewed thrust in smart power system networks along with the development of advanced methods in monitoring and diagnostics has resulted in major impetus to research in the related domain.

The transformer internal faults are predicted in this paper by using a PNN algorithm. The high accuracy of diagnosis is confirmed by simulation results in the KNIME platform.

Keywords: DGA, Two-ratio method, Rogers method, Diagnosis of gases dissolved in transformer oil, Power Transformer, Internal Faults in windings, Fault Diagnosis, Neural Network.

**ДИАГНОЗНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ НЕИСПРАВНОСТИ МАСЛОЗАГРУЖЕННЫХ
СИЛОВЫХ ТРАНСФОРМАТОРОВ НА ОСНОВЕ ВЕРОЯТНОСТНОЙ НЕЙРОННОЙ
СЕТИСЕТИ**

Атрафи Гияси М.А., Бодуров В.С. Керимов К.А.

Абстракт

Масляный трансформатор - одно из ключевых устройств в энергосистеме, они заполнены жидкостью, которая служит различным целям. Жидкость действует как диэлектрическая среда, изолятор и теплоноситель. Чаще всего в трансформаторах используется жидкость на основе минерального масла. Во время нормальной работы обычно происходит медленное разложение минерального масла с выделением определенных газов, растворенных в масле. Однако, когда в трансформаторе возникает электрическая неисправность, газы выделяются гораздо быстрее. Анализ растворенного газа (DGA), вероятно, является наиболее широко используемым методом профилактического обслуживания, используемым сегодня для мониторинга работы трансформатора в режиме онлайн, и ряд руководств по интерпретации DGA был разработан различными организациями, например IEC60559 [1], IEEE C57.104-1991 [2], CIGRE TF 15.01.01 [3] и GB7252-87 [4]. Надежность электросети гарантируется ее безопасной эксплуатацией. Следовательно, необходимо уменьшить количество отказов трансформатора с помощью мер предосторожности. В настоящее время трехуровневый метод анализа растворенных газов (DGA) является наиболее эффективным и удобным методом диагностики неисправностей трансформаторов. Однако при использовании метода трех соотношений в качестве интерпретации существуют некоторые недостатки, такие как дефекты кодирования и дефект порогового критерия. Новый способ решения этой проблемы предоставляется искусственной нейронной сетью, которая имеет такие преимущества, как параллельная обработка, самоадаптация, самообучение, ассоциативная память, нелинейное отображение и другие особенности. Возобновление популярности сетей интеллектуальных энергосистем наряду с развитием передовых методов мониторинга и диагностики привело к значительному стимулированию исследований в соответствующей области.

В этой статье для прогнозирования внутренних неисправностей трансформатора используется вероятностный алгоритм нейронной сети. Высокая точность диагностики подтверждена результатами моделирования на платформе KNIME.

Ключевые слова: DGA, Двухступенчатый метод, Метод Роджерса, Диагностика газов, Растворенных в трансформаторном масле, Силовой трансформатор, Внутренние неисправности в обмотках, Диагностика неисправностей, Нейронная сеть.

1. Introduction

The transformer, which is the most important and fundamental component in a complex power system shall be responsible for power transmission and voltage converting. While the multi-protection outside and inside shield transformers, transformer failures still occur. Meanwhile, the frequency of accidents is quite high due to the design, manufacturing, technology, raw materials of defects, and natural disasters, etc. As a result, it is important to forecast and diagnose transformer faults in real-time.

Dissolved gas analysis (DGA) is the most effective and convenient method in transformer fault diagnosis. And there are three improved methods based on DGA technology, including the Two-ratio method proposed by Dornenburg (to distinguish heat and electricity) and the Rogers method (four-ratio method) [5,6]. But many questions in engineering practice are exposed, some of which are incomplete coding, absolute encoding boundaries, and the failure of faults diagnosis. As a result of the existence of these problems, a variety of artificial intelligence technologies for power transformer fault diagnosis have been proposed by domestic and foreign scholars.

For example, the sample is to be classified effectively with the combination of genetic algorithm and FCM) [7]. The optimization parameters of the genetic algorithm can be accurately found in a wide range by using SVM) [8].

In the meantime, artificial intelligence algorithms such as expert system) [9], fuzzy theory [10], rough set theory [11], evidence theory [12] are applied to the diagnosis of the power transformer. Nevertheless, because of the new fault produced by the power transformer in the actual process, the above methods can't be updated in the training sample in real-time. PNN (PNN), a diagnosis of a network system with the abilities of strong fault tolerance and adaptive structure, to diagnose power transformers, has been adopted in this paper.

The Three-ratio method is an effective interpretation method, but this method fails to clearly identify faults in transformers in borderline cases. At the same time, it is inescapable to make a wide evaluation based on the test results of electrical test items, so as to make a correct interpretation of the nature and location of the fault.

According to the different ratios of the volume fractions of gases, the given codes in Tab.1 According to “DL/T722-2014 Guide to the analysis and the diagnosis of gases dissolved in transformer oil”, we can find out the transformer fault type and position.

Table 1.
Coding rules of three ratio method

Ratio	<0.1	0.1~1	1~3	≥3
$\phi(\text{C}_2\text{H}_2)/ \phi(\text{C}_2\text{H}_4)$	0	1	1	2
$\phi(\text{CH}_4)/ \phi(\text{H}_2)$	1	0	2	2
$\phi(\text{C}_2\text{H}_4)/ \phi(\text{C}_2\text{H}_6)$	0	0	1	2

2.Statement of Problem

2.1 Oil-immersed transformer fault diagnosis based on PNN

a. *Pose problem*

The workflow was set up on the KNIME platform in order to effectively predict power transformer faults and the types of fault. The input sample data set D , which is expressed as $(v_1, v_2, \dots, v_n; F)$ is a previous fault data set. v_i is the content of the characteristic gases in power transformers and F is the corresponding fault types Fig.1. The input test data set X , which the types of fault and the accuracy of the prediction to be observed, only including the content of the gases and expressed as (v_1, v_2, \dots, v_n) .

b. *Data pre-processing*

The normalization processing, which is the linear function transformation method, is used in this article to make the data fall into the range of [0, 1] and to avoid the unequally using of the input variable with different physical meaning and dimension. It can also eliminate the influence of dimensional, make the data become scalar, improve the accuracy of fault diagnosis and accelerate the convergence of training network.

c. *PNN algorithm process*

PNN is composed of three layers: the input layer, the hidden layer, and the output layer. This neural network model has the following features: the topology, connection weights and thresholds can be set immediately when training samples are attainable. Its training is concise and classification ability is strong.

i. *PNN diagnosis process*

- Connection weights matrix of the network W^{IH} , W^{HO} and training sample set D are read;
- Training sample set D is entered into the hidden layer and the output of the hidden layer is calculated; A nonlinear operator of hidden layer by gauss function as follow:

$$f_k = \exp(-net_k/\sigma^2) \quad (1)$$

σ is smoothing factor.

$$net_k = \sum_{i=1}^n x_i - w_{ki}^{IH} \quad (2)$$

smoothing factor $\sigma_1 = \sigma_2 = \dots = \sigma_N = \sigma_0$.

Probability sum O_j , which belongs to the first category, with the value as output from hidden layer to output layer is calculated;

$$O_j = \sum_{k=1}^K (w_{kj}^{HO} \cdot H_k) \quad (3)$$

f. Computation

Failure prediction reasoning path of predicted data along the level of the network and the final output matching inference results. The output of failure data expressed as: $(v_1, v_2, \dots, v_n; Z)$, v_i is property values, Z is predicting fault type.

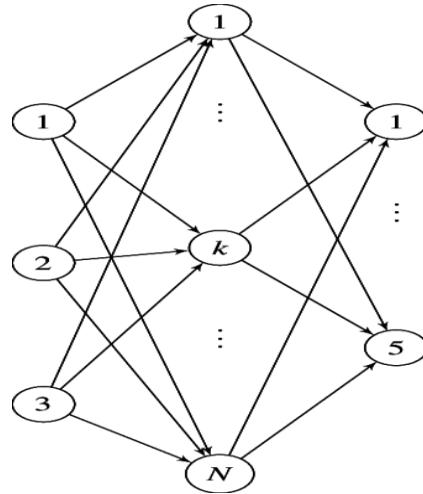


Fig. 1 PNN topological structure

2.2 Simulation and analysis of Power transformer fault diagnosis based on PNN

Dissolved gas analysis (DGA) is one of the most effective and important methods in oil-immersed power transformer fault diagnosis. Among various diagnostic methods of DGA, the three-ratio method improved has the highest accuracy. The three-ratio of oil dissolved gas content are selected as input vectors of neural network. And the output vectors are the types of transformer faults.

2.3 The sample data set

A total of 300 sample data is got from the UCI machine learning repository, which contains seven attributes Tab.2 :

CH_4 , C_2H_6 , C_2H_4 , C_2H_2 , H_2 , CO , CO_2 .

Table 2
Failure type and number:

Failure type	Number
Low temperature overheat	52
hyperthermia and superheating	260
Low energy discharge	119
high energy discharging	23
Discharge and overheating	30

From this 300 sample data, 250 sample data are selected randomly for PNN training, others are the test data for testing the accuracy of power transformer fault diagnosis which is based on PNN.

2.4 Simulation workflow setting

KNIME, a data implementation software, is used for simulation experiment and the simulation of fault diagnosis is realized by constructing workflows.

The implementation steps as fellow:

- 500 oil-immersed transformer fault data for database are read;
- With the normalization processing, this data are divided into sample data and test data randomly;
- PNN learning is used to learn of the data, and the fault prediction model for failure prediction is to be establish; the predict result and the existing result are compared, and the accuracy of prediction is calculated.

3. Simulation results analysis

With different algorithms, the sample data are learning and used to predict fault. simulation results as shown in Tab 3.

From the above calculation results, the fault diagnosis accuracy based on PNN is 80%. It is higher than accuracy rate that based on other intelligent algorithms. As a result, satisfactory results on the accuracy of oil-immersed power transformer internal fault diagnosis are achieved by using PNN Fig.2 .

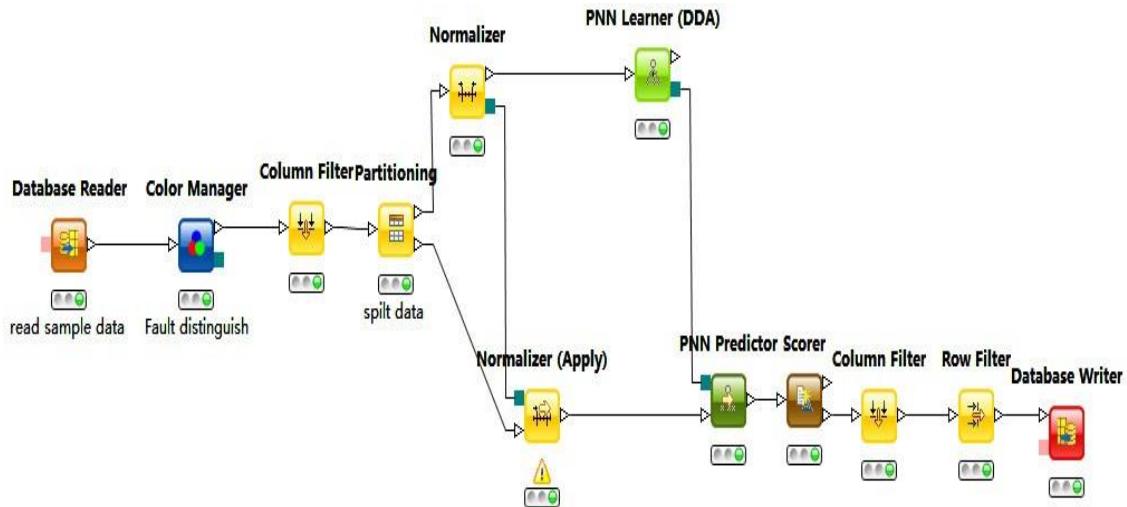


Fig. 2 Fault diagnosis workflow

Table 3
Fault algorithm and accuracy:

Algorithm	Accuracy prediction
PNN	0.9
BP-neural network	0.767
fuzzy algorithm	0.680
decision-making tree	0.600
Bayesian algorithm	0.530

Conclusion:

From the literature reviews, several fault diagnosis methods are required to detect all the faults of the Power Transformer.

One of the methods based on PNN to establish workflow about oil-immersed power transformer internal fault diagnosis is introduced in this paper. With the ability of learning knowledge from the examples and convenient parameter settings, neural network with good fault-tolerance is obtained. The network, which has simple processing and rapid convergence, don't need training. Its corresponding weighting is the distribution of sample. The transformer fault sample library, which would change with the increase of transformer faults, should to be established. And with the full using of the strong ability of PNNs sample complementing, the practical application of diagnostic accuracy is increased.

References

1. International Electrotechnical Commission (1978) IEC60559: *Interpretation of the analysis of gases in transformers and other oil-filled electrical equipment in service. International Electrotechnical Commission Standard, Geneva, Switzerlan.*
2. The Institute of Electrical and Electronics Engineers (1994) Transformers Committee of the IEEE Power Engineering Society, *IEEE guide for the interpretation of gases generated in oil immersed transformers, IEEE Std. C57.104-1991. The Institute of Electrical and Electronics Engineers, Inc., 345 East 47th Street, New York, NY 10017, USA.*
3. Mollmann A, Pahlavanpour B (1999) *New guidelines for interpretation of dissolved gas analysis in oil-filled transformers. Electra, CIGRE France 186:30–51.*
4. Bureau of Standards for the P.R.China (1987) GB7252-87: *Guide for the analysis and diagnosis of gases dissolved in transformer oil. National Technical Committee 44 on Transformer of Standardization Administration of China*
5. State Economic and Trade Commission. *DL/T7222000 Guide to the analysis and the diagnosis of gases dissolved in transformer oil .Beijing China Electric Power Press;2001.*
6. Xiong Hao,Sun Caixin,Chen Weigen,etal.Arificial immune network classification algorithm for fault diagnosis of power transformer. *Automation of Electric Power Systems*2006;30(6):57-60.
7. Tian Zhiguang,Zhang Huifen. Based on genetic clustering algorithm analysis of gases dissolved in transformer oil power transformer fault diagnosis. *Electric Power Automation Equipment* 2008;28(2):15-19.
8. Xiao Yancai,Chen Xuhai,Zhu Hengjun. Genetic support vector machine in the application

- of the power transformer fault diagnosis . *Journal of Shanghai Jiaotong University* 2007;41(11):1878-1882.
- 9. Li Xionggang . Fault diagnosis expert system in the application of the power system .*Guangdong Electric Power* 1999;12(2):39-41.
 - 10. Islam S M,Wu T,Ledw Ich G. A novel fuzzy logic approach to transformer fault diagnosis. *IEEE Transaction on Dielectrics and Electrical Insulation* 2000, 7(2):177-186.
 - 11. Huang Wei,Zhao Yangbang, Chen Qiaosheng. Wang Junkai. Transformer Fault Diagnosis based on Improved Genetic Algorithm and Rough Set 2015 *the national smart grid client energy management academic annual meeting*.Shanghai;2015.p.296-299.
 - 12. K. Spurgeon,W.H. Tang,Q.H. Wu etal.Dissolved Gas Analysis Using Evidential Reasoning.*IEE proceedings.A.Science, measurement & technology* 2005,152(3):110-117.

Maryam Atrafi Guyasi - doctoral student. In 2017 she graduated from the Energy Faculty of the Azerbaijan State Oil and Industry University degree in Electrical Networks and Systems. In 2019 she defended her master's thesis on the topic "OPTIMIZATION OF THE DRYING PROCESS OF TRANSFORMERS."

Email: atmaryam14608@sabah.edu.az

Vahid Bodurov Jeyhun- master student. In 2020 he graduated from the Energy Faculty of the Azerbaijan State Oil and Industry University degree in Electro mechanics.

Email: ybodurov@cbmes.com

Kamran Kerimov Anar- master student. In 2019 he graduated from the Energy Faculty of the Azerbaijan State Oil and Industry University degree in Electro mechanics.

Email: kerimov.kamran1998@mail.ru

**DETERMINATION OF DENSITY DEPENDENCE ON TEMPERATURE OF GEOTHERMAL
WATERS OF JARLI KURDAMIR REGION OF AZERBAIJAN****AZƏRBAYCANIN KÜRDƏMİR RAYONUNUN CARLI GEOTERMAL SUYUNUN
SIXLİĞİNİN TEMPERATURDAN ASILILIĞININ TƏYİNİ**

Babayeva S. Sh. DETERMINATION OF DENSITY DEPENDENCE ON TEMP...

**ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЗАВИСИМОСТИ ПЛОТНОСТИ ОТ ТЕМПЕРАТУРЫ ГЕОТЕР-
МАЛЬНЫХ ВОД ДЖАРЛЫ КЮРДАМИРСКОГО РАЙОНА АЗЕРБАЙДЖАНА****Babayeva S. Sh.**

Azerbaijan Oil and Industry State University

Annotation

In the article, based on the analysis of literary sources, the dynamics of the development of alternative energy in different years is studied and a diagram is built for comparison based on the results. Based on the IRENA database, the dynamics of the growth of the potential of geothermal energy in the world countries has been determined. Explored the potential of geothermal energy in Azerbaijan. The density of a water sample taken from the Jarli geothermal spring in the Kurdamir region was experimentally investigated at atmospheric pressure and various temperatures ($T = 278.15\text{-}343.15\text{K}$), and the results were expressed by a polynomial equation.

Keywords: alternative energy, Jarli, geothermal water, thermophysical characteristics, density, temperature dependence.

Babayeva S.Ş.

Azərbaycan Dövlət Neft və Sənaye Universiteti

Annotasiya

Məqalədə ədəbiyyatların analizinə əsasən, alternativ enerjinin illər üzrə inkişaf dinamikası tədqiq edilmiş və nəticələrə əsasən müqayisə üçün diaqram qurulmuşdur. İRENA-nın məlumat bazasına əsaslanaraq, dünya dövlətlərində geotermal enerjinin potensialının inkişaf dinamikasının artımı təyin edilmişdir. Azərbaycanın geotermal enerji potensialı araşdırılmışdır. Kürdəmir rayonunun Carlı geotermal mənbəyindən götürürlən su nümunəsinin sixlıqları atmosfer təzyiqində və müxtəlif temperaturlarda ($T=278,15\text{-}343,15\text{K}$) təcrübə tədqiq edilmiş və alınmış nəticələr polinomial tənlik vasitəsilə ifadə edilmişdir.

Açar sözlər: Alternativ enerji, Carlı, geotermal su, istilik-fiziki xarakteristikalar, sixlıq, temperaturdan asılılıq.

Бабаева С. Ш.

Азербайджанский Государственный Университет Нефти и Промышленности

Аннотация

В статье на основе анализа литературных источников изучена динамика развития альтернативной энергетики в разные годы и построена диаграмма для сравнения по результатам. На основе базы данных IRENA определена динамика роста потенциала геотермальной энергии в странах мира. Изучен потенциал геотермальной энергии Азербайджана. Плотность пробы воды, взятой из геотермального источника Джарлы в районе Кюрдамир, была экспериментально исследована при атмосферном давлении и различных температурах ($T = 278,15\text{--}343,15\text{K}$), и полученные результаты были выражены полиномиальным уравнением.

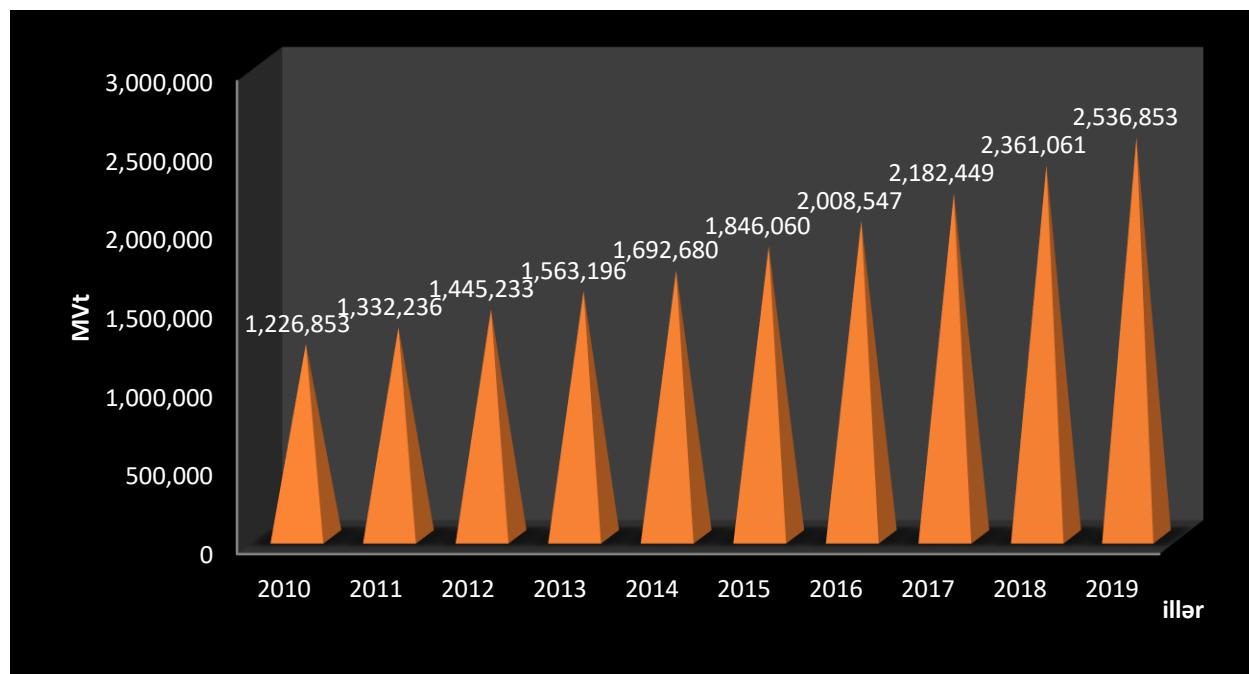
Ключевые слова: альтернативная энергетика, Джарлы, геотермальная вода, теплофизические характеристики, плотность, температурная зависимость.

INTRODUCTION

The depletion of fossil fuels and their negative environmental impacts during combustion have prompted many countries to use renewable energy sources. This, in turn, has led significant progress in the development of renewable energy technologies. [1-5].

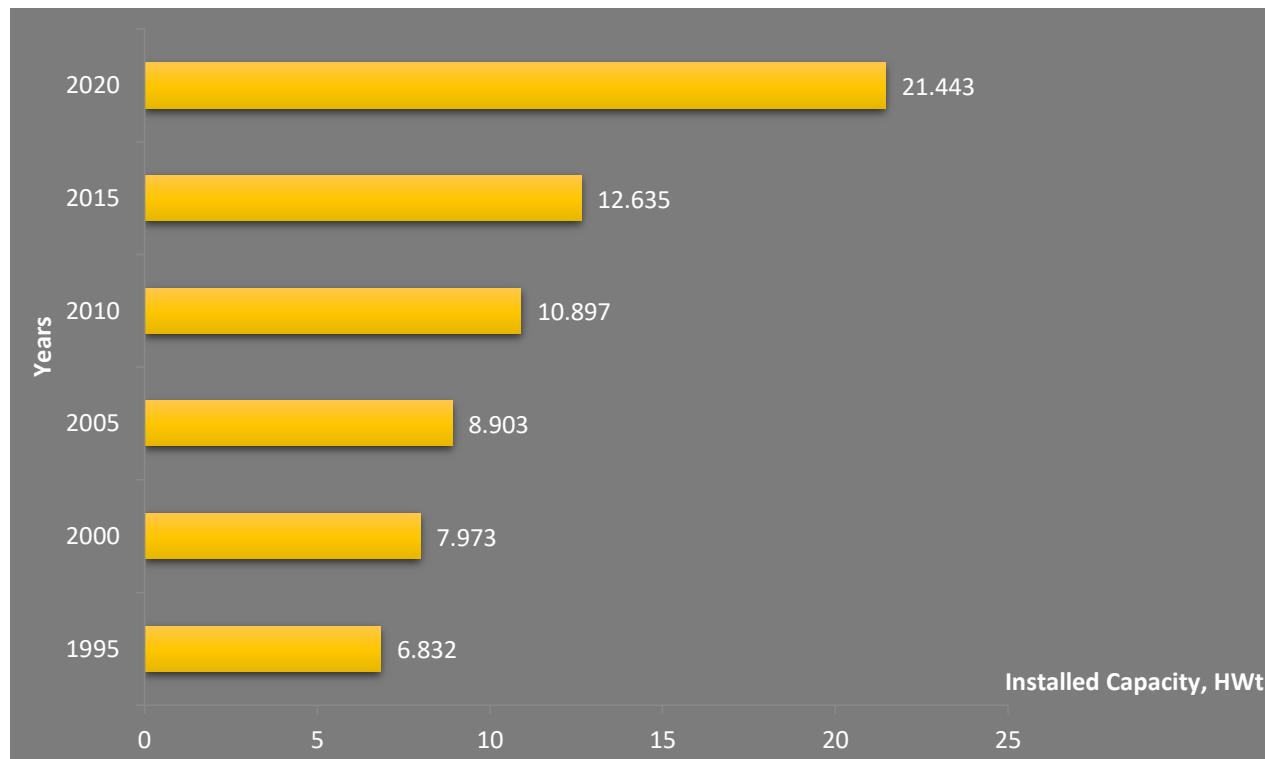
The use of alternative energy in the world increased from 1.3% to 30% since 2001 till 2020. Fossil fuel use declined from 85.2% to 20.1% over the corresponding years. [6].

The dynamics of growth in the total use of renewable energy in the world countries is shown in a diagram in Picture 1 based on the database presented [7]



Picture 1. Total use of renewable energy in the world

Picture 2 shows the increase in the installed capacity of geothermal power plants in the world in recent years. This Picture is built based on the database shown in [7].



Picture 2. Annual growth of installed capacity of geothermal power plants in the world

Geothermal energy is an important part of the development of renewable energy. In 1904, for the first time in Italy, steam from a geothermal source was used to generate electricity in a steam power plant. Currently, the capacity of the Larderello Geothermal Power Plant in Italy is about 400 MVt. Geothermal energy has developed in a number of countries. In recent years, the use of geothermal resources has been characterized by an increase in volumes and expansion of areas. Geothermal technologies dominate the energy balance of a number of countries, and the share of geothermal energy in the global energy balance is constantly growing. The leading position in the world is occupied by the USA (more than 40% of the existing capacities). The installed capacity of the geothermal power plant in the Philippines is about 900 MVt, in Mexico - 700, in Italy - 500, in Russia - 21 MVt. [8]. In addition to generating electricity, geothermal energy can also be used for heating. The use of geothermal energy for the development of heating systems and the development of new schemes is on the agenda.

MAIN PART

Azerbaijan is also a country rich in mineral and thermal waters. Recently, interest in geothermal sources has been growing in Azerbaijan, as well as in all areas of using alternative energy. The potential of geothermal energy in Azerbaijan is estimated at about 800 MW. The area of application of these waters

is extensive and covers agriculture, medical, industrial and municipal heating. That is why scientists are very interested in studying geothermal waters as an object of research. In Azerbaijan, significant scientific work in the field of geothermal energy and mineral water deposits has been carried out for a long time [9-12]. Chemical analysis of their composition and etc. significantly studied. After the recognition of Azerbaijan's independence, research on the thermal and physical properties of geothermal energy water sources began. [13-14].

The Azerbaijan State Oil and Industry University, together with the University of Rostock in Germany, began the study of the thermophysical properties of geothermal energy sources as a new scientific direction. The main goal of this study is to identify the potential of alternative energy sources in the regions of Azerbaijan, including the Kura basin, and its use in the energy sector.

The potential of geothermal energy sources located in the Kura basin in Azerbaijan has very promising parameters for energy use. The well, located in the village of Jarli, Kurdamir region, is considered the main geothermal source. This well attracts attention with its abundant water. The temperature of the discharged water is 95-98 °C, and the flow rate is 20,000 m³ / day. [9] Water of Jarli is a layer of porous water. The chemical composition of this water has been studied by different researchers at different times. [6,15,16]. However, the thermophysical properties of this water have not yet been studied.

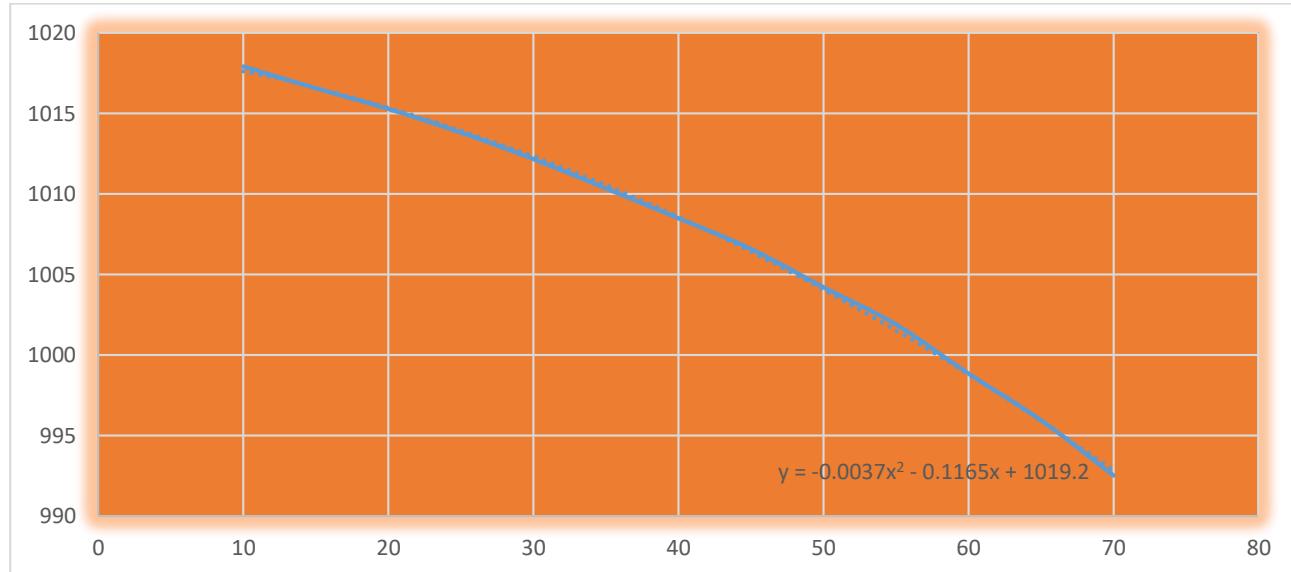
We have investigated some thermophysical parameters of Jarli's water experimentally. The density of geothermal water was measured using a DMA 5000 device. This device is one of the latest devices of the Anton Paar generation. The Anton Paar generation devices are fast, accurate, reliable, repeatable and have a modern user interface.

The DMA 5000 high-precision instrument was used to determine the density and speed of sound of thermal water in the Jarli village of the Kurdamir region at atmospheric pressure. The experiments were carried out using a DMA 5000 densimeter (Picture 3) from Anton-Paar (Austria). The DMA 5000 vibrating tube densimeter is based on the one-sided dependence of the oscillation period of the U-tube on the tube mass[17].



Picture 3. DMA 5000 device

One of the latest Anton Paar models, the DMA 5000 can simultaneously set 2 independent physical parameters, density and sound velocity with high precision. This device, which can measure two functions, has chambers for measuring density and speed of sound. Determines high-precision sound copy using the U-shaped tube method. The temperature in both chambers is controlled by a Peltier thermostat.



Picture 4. Jarli geothermal water's dependence $\rho = f(t)$

Picture 4 shows the temperature dependence of the density of Jarli's water. As the water temperature increased from 5 °C to 80 °C, its density decreased.

$$\rho = -0.0037t^2 - 0.1165t + 1019 \quad (1)$$

Table 1. Comparison of the density of the Jarli thermal water with the values obtained from the experiment and the values obtained from equation (1)

t °C	Density of Jarli thermal water, ρ_t (төгрүбө) kg/m^3	Density of Jarli thermal water, ρ_d ((1) бәрабәрлий) kg/m^3	$\Delta\rho = \rho_t - \rho_d$	$\Delta\rho/\rho_d \cdot 100\%$
5	1028,076	1018,525	9.551	0,93
10	1017,905	1017,665	0,24	0,02
15	1016,554	1016,620	0,066	0,006
20	1015,269	1015,390	0,121	0,01
25	1013,806	1013,975	0,169	0,01
30	1012,161	1012,375	0,21	0,02
35	1010,333	1010,590	0,257	0,02

40	1008,489	1008,620	0,131	0,01
45	1006,150	1007,047	0,89	0,08
50	1004,166	1005,29	1,124	0,1
55	1002,552	1001,6	0,952	0,09
60	998,555	998,99	0,435	0,04
65	995,950	995,995	0,045	0,004
70	992,526	992,915	0,389	0,04

RESULT

Studies have shown that the temperature dependence of the geothermal water density Jarli in Kurdamir region of Azerbaijan has the same dynamics as the temperature dependence of the density of fresh water and decreases rapidly with increasing temperature. The density of Jarli geothermal water is slightly higher than the density of fresh water. This is due to the fact that geothermal waters are rich in chemical minerals. According to the results of the experiments, the temperature dependence of the density of Jarli geothermal waters $\rho / \text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ varies from $T = 298.15 \text{ K}$ to high temperatures in the appropriate sequence, depending on the amount of chemical minerals in their composition. But in the $T = (278.15-298.15) \text{ K}$ range, this correspondence is violated. This discrepancy is associated with the low solubility of chemical minerals in geothermal waters at low temperatures compared to high temperatures, as well as the influence of the temperature dependence of the density of dissolved gases in the sample on water and mixtures with excess water content.

References

- Фортов В.Е., Попель О.С. Энергетика в современном мире. Долгопрудный, ИД «Интеллект», 2011. 168 с.
- Алхасов А.Б. Возобновляемая энергетика / 2-е изд. перераб. и доп. под ред. Фортова В.Е. М.: Физматлит, 2012. 256 с.
- Томаров Г.В., Никольский А.И., Семенов В.Н. и др. Тенденции и перспективы развития геотермальной энергетики // Теплоэнергетика, № 11, 2012. с. 26 – 35.
- Rybáček L. Status and Prospects of Geothermal Energy // Proc. World Geothermal Congress-2010. Bali, Indonesia.2010.
- Bertani R. Geothermal Power Generation in the World 2005 – 2010 Update Report// Proc. World Geothermal Congress-2010. Bali, Indonesia.2010.
- Babayeva S.Ş. Carlı geotermal suyunun tədqiqi və ondan istifadənin proqnozları. Energetikanın problemləri. elmi – texniki jurnal № 4, 2020, Bakı.

7. IRENA (2020), Renewable capacity statistics 2020 International Renewable Energy Agency (IRENA), Abu Dhabi
8. *В.Г.Лабейи.* Нетрадиционные и возобновляемые источники энергии: Учеб. пособие. - СПб.: СЗТУ, 2003.-79 с.
9. *Тагиев И.И., Ибрагимова И.Ш., Бабаев А.М.,* Ресурсы минеральных и термальных вод Азербайджана, Баку, Чашыоглы, 2001, 168 с.
10. *Гашкай М.А.,* Минеральные источники Азербайджана, Баку, 1952, 503 с.
11. *Ibrahimova I.Sh.,* Application of GIS to available information on thermal waters in the Azerbaijan republic and its usefulness for environmental assessment, The United NationUniversity, Geothermal Training Programme, Reports, Number 10, Orkustofnun, Grensásvegur9, IS-108 Reykjavík, Iceland 2006.
12. *Ismailova M.M.,* Environmental problems associated with utilization of mineral waters in urbanized areas of Azerbaijan, NATO Science Series, 74, 2006, 279 pp.
13. *Nəbiyev N.D., Bəşirov M.M., Səfərov C.T., Şahverdiyev A.N.,* Elmi əsərlər-Fundamental elmlər, VII , № 2 2008, s. 10-14.
14. *N. Nabiyev, R. Jannataliyev, J. Safarov, M. Bashirov, A. Shahverdiyev, E. Hassel,* Thermodynamic properties of geothermal energy resources of the Khachmaz region of Azerbaijan, VDI ‘Thermodynamik-Kolloquium und Ingenieurdaten’, Universitety Erlangen-Nurnberg, 2008, s. 61.
15. Azərbaycan Respublikasının Prezidenti yanında Elmin İnkışafı Fonduunun 2015-ci ilin əsas qrant müsabiqəsi çərçivəsində təqdim olunmuş kompleks elmi-tədqiqat proqramlarının (EİF-KETPL-2015-1(25)) qalibi olmuş layihənin yerinə yetirilməsi üzrə yekun elmi-texniki hesabat.
16. *Abbasov V., Mikayilova A., Humbatov F., Mehdiyeva R., Safarov J.* “Perspective on Using Thermal Energy from Geothermal Waters in Azerbaijan”. Proceedings of International Scientific Conference on Sustainable Development Goals. Page 189-194. 24-25 November 2017, Baku, Azerbaijan.
17. *N. Nabiyev, R. Jannataliyev, J. Safarov, M. Bashirov, A. Shahverdiyev, E. Hassel,* Thermodynamic properties of geothermal energy resources of the Khachmaz region of Azerbaijan, VDI ‘Thermodynamik-Kolloquium und Ingenieurdaten’, Universitety Erlangen-
18. Nurnberg, 2008, s. 61.



Babayeva Sevinc Shulan – Candidate of Technical Sciences (Ph.D), Associate Professor in “Energy production technologies”. In 1986, she graduated with honors from the Azerbaijan Institute of Petroleum and Chemistry, Faculty of Energy with a degree in “Industrial Thermal Power Engineering”.

She defended his dissertation on the “Coefficient of thermal conductivity of three-component electrolyte solutions at high pressures and temperatures” topic. The main scientific works cover the topics about the theoretical foundations of thermal engineering, thermal energy, alternative energy sources. She is currently an associate professor of “Energy Production Technologies”.

Mail: babayeva_sevinc64@mail.ru

УДК 681.05:621

Рустамов R.Q.

**УМЕНЬШЕНИЕ ЭНЕРГОПОТРЕБЛЕНИЯ ОПТИМАЛЬНОЙ ПО
БЫСТРОДЕЙСТВИЮ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ**

Aзербайджанский Технический Университет

В статье исследуется влияние вибрации управления на расход энергии в оптимальной по быстродействию системе и робастные свойства модифицированной системы управления. Решение классической задачи оптимального управления по критерию быстродействия приводит к двухпозиционному релейному управлению. В этом случае имеется следующие недостатки: в малой окрестности положения равновесия происходит вибрация управляющего сигнала, что приводит к перерасходу энергии; функция переключения зависит от времени и не имеет обратной связи. Учитывая эти недостатки предложены различные модификации постановок задач. Эти постановки отличаются многокритериальностью и добавлением функциональных ограничений. «Исправление» исходной задачи таким образом приводят к усложнению математического аппарата и системотехнической реализации системы. Одним из конструктивных подходов, который использован в данной работе, является системный подход. При этом осуществляется линеаризация оптимального алгоритма: релейное управление заменяется на линейно-релейный, который в малой окрестности положения равновесия позволяет подключить обратную связь; нелинейная функция переключения аппроксимируется гиперплоскостью, в уравнении которой входят переменные состояния, кроме того упрощается задача синтеза для систем высокого порядка.

Эффективность линеаризованной системы исследован путем сравнительного анализа в блочно-визуальной среде имитационного моделирования *Simulink*. Полученные положительные эффекты в задаче управления «двойного интегратора» позволить широко использовать результаты данной работы в инженерных приложениях.

Ключевые слова: *оптимальное управление, энергия управления, быстродействие, релейное управление, функция переключения, робастность, Simulink*.

Rustamov R. Q.

**REDUCING THE ENERGY CONSUMPTION OF THE SPEED-OPTIMAL
CONTROL SYSTEM**

Azerbaijan Technical University

The article examines the influence of control vibration on energy consumption in a system that is optimal in terms of speed and the robust properties of a modified control system. The

solution of the classical problem of optimal control by the criterion of performance leads to two-position relay control. In this case, there are the following disadvantages: in a small neighborhood of the equilibrium position, vibration of the control signal occurs, which leads to excessive consumption of energy; the switching function is time dependent and has no feedback. Taking into account these shortcomings, various modifications of the problem formulations have been proposed. These statements differ by multi-criteria and addition of functional restrictions. "Correction" of the original problem leads to the complication of the mathematical apparatus and the system-technical implementation of the system. One of the constructive approaches used in this work is the systems approach. In this case, the linearization of the optimal algorithm is carried out: the relay control is replaced by a linear-relay control, which in a small neighborhood of the equilibrium position allows you to connect feedback; the nonlinear switching function is approximated by a hyperplane, the equation of which includes state variables; in addition, the synthesis problem for high-order systems is simplified.

The efficiency of the linearized system is investigated by comparative analysis in the block-visual simulation environment Simulink. The obtained positive effects in the control problem of a "double integrator" will make it possible to widely use the results of this work in engineering applications.

Key words: *optimal control, energy, speed, relay control, switching function, robustness, Simulink.*

Rüstəmov R.Q.

CƏLDİŞLƏMƏYƏ GÖRƏ OPTİMAL İDARƏETMƏ SİSTEMİNİN ENERJİ SƏRFİNİN AZALDILMASI

Azərbaycan Texniki Universiteti

Məqalədə idarənin vibrasiyasının cəldişləməyə görə optimal idarəetmə sistemində enerji sərfinə təsiri tədqiq edilir. Klassik optimal idarəetmə məsələsinin cəldişləmə kriterisinə görə həlli ikimövqeli relt idarəsinə gətirir. Bu halda müyyəyen çatışmamazlıqlar meydana çıxır: tarazlıq vəziyyətinin kiçik ətrafında idarə siqnalının vibrasiyası baş verir ki, bu da enerji sərfini artırır; qoşulma funksiyası əks əlaqəli olmayıb yalnız zamanından asılı olur. Göstərilən çatışmamazlıqları nəzərə alaraq hazırda məsələnin qoyuluşunun müxtəlif modifikasiyaları təklif edilmişdir. Bunlar çoxkriteriyalıq və müxtəlif funksional məhdudiyyətlərin əlavə olunması ilə fərqlənilərlər. Bu yol ilə ilkin məsələnin "düzəlişi" riyazi aparati və sistemin sistemotexniki realizasiyasını mürəkkəbləşdirir. Məqalədə konstruktiv üsullardan buri olan sistemli yanaşmadan istifadə edilmişdir. Bu halda optimal idarəetmə algoritminin xəttılışdırılması aparılır: rele idarəsi xətti-rele idarəsi ilə əvəz olunur ki, bu da tarazlıq vəziyyətinin kiçik ətrafında əks əlaqənin qoşulmasını təmin edir; qeyri-xətti qoşma funksiyası vəziyyət dəyişənlərindən asılı olan hipermüstəvi ilə aproksimasiya olunur ki, bu halda yüksək tərtibli sistemlərin sintezi sadələşir.

Xəttiəşdirilmiş sistemin effektivliyi *Matlabın* tərkibində olan vizual-bloklu imitasiya modelləşdirmə paketi *Simulink*-də müqayisəli analiz yolu ilə tədqiq edilmişdir. “İkiqat integrallayıcının idarəetmə məsələsi”-ndə alınmış müsbət nəticələr işin nəticələrini mühəndis tətbiqlərində geniş istifadə etməyə yol açır.

Açar sözlər: *optimal idarəetmə, idarənin enerjisi, cəldişləmə, rele idarəsi, qoşma funksiyası, robustlıq, Simulink.*

1. Введение

Задача оптимального управления по быстродействию в классической постановке приводит к увеличению затрат на реализацию оптимального управления. Основной причиной этой особенности является то что, оптимальное управление является релейным, принимающим предельные значения. При этом система имеет склонность к возникновению скользящего и автоколебательного в малой окрестности точки равновесия режимов. Наличие таких режимов приводит к перерасходу энергии и ограничивают срок службы исполнительных органов и других инерционных механизмов системы.

Исходя из этого в [1] рассмотрена обобщенная задача с добавлением дополнительных ограничений в многоокритериальной среде.

В данной статье рассматривается альтернативная задача улучшения динамических и статических показателей системы путем модификации структурных особенностей классического решения. Задача быстродействия решена на примере управления «двойного интегратора».

Объекты вида $\ddot{y} = bu$ и задача двойного интегратора широко рассматривается в теории автоматического управления [2]. Двойной интегратор используется для моделирования электромеханических, электрических, гидравлических объектов. В частности, двигатель постоянного тока с независимым возбуждением [3,4,5], наведение самолета или ракеты на цель в простейшей задаче перехвата [6,7], мягкая посадка на Луну [8] и др.

2. Исходная задача [9]

В классической постановке задача состоит из определения ограниченного управления $-\bar{u} \leq u \leq +\bar{u}$, приводящего систему из заданного начального состояния $x(0) = x_0$ в начало координат $x(t_T) = x_T = 0$ за кратчайшее время. Математическая постановка задачи быстродействия:

$$J = \int_0^{t_T} dt = t_T \rightarrow \min_{|u| \leq \bar{u}} ,$$

$$\dot{x}(t) = Ax(t) + Bu ,$$

$$-\bar{u} \leq u \leq +\bar{u} ,$$

$$x(0) = x_0 , \quad x(t_T) = x_T = 0 .$$

При отсутствии ограничения принимая $u = \infty$, т.е. прикладывая к объекту бесконечную энергию, его можно было бы привести в точку равновесия мгновенно. Ясно, что при этом задача теряет физический смысл.

В этой задаче из-за наличия ограничения на управление определить решение из необходимого условия оптимальности $\frac{\partial H}{\partial u} = 0$ не возможно. Оптимальное управление определяется из условия $\max\{H\}$. Здесь функция Гамильтона

$$H = -1 + \lambda^T(t)Ax + \lambda^T(t)Bu .$$

Оптимальное управление $u(t)$ должно обеспечивать максимальное значение H . Поскольку u входит только в третье слагаемое, то для достижения максимального значения функции Гамильтона должно выполняться условия: при $\lambda^T(t) > 0 \Rightarrow u = +\bar{u}$, а при $\lambda^T(t) < 0 \Rightarrow u = -\bar{u}$. Таким образом оптимальное управление имеет следующий вид:

$$u = \bar{u} sign(\sigma), \quad \sigma = B^T \lambda(t) .$$

Полученное управление является управлением релейного типа.

В общем случае сопряженные переменные определяются путем решения двухточечной задачи, состоящая из следующей канонической системы уравнений:

$$\begin{cases} \dot{x} = \frac{\partial H}{\partial \lambda} = Ax + Bu_{opt} , \\ \dot{\lambda} = -\frac{\partial H}{\partial x} = -A^T \lambda . \end{cases} \quad (1)$$

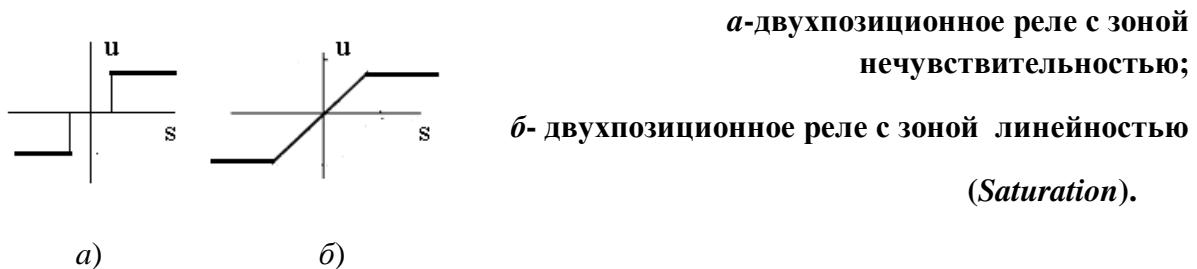
$x(0) = x_0 , \quad x(t_T) = x_T , \quad \lambda(0) = \lambda_0 ?$

Непосредственное определение $\mathbf{x}(t)$ и $\lambda(t)$ из решения уравнения (1) невозможно, поскольку начальное условие $\lambda(0)=\lambda_0$ является неизвестным. Поэтому при решении «параллельно» вычисляется и λ_0 , обеспечивающее попадание траектории $\mathbf{x}(t)$ в точку \mathbf{x}_T . В настоящее время разработаны различные алгоритмы вычисления λ_0 , в частности [10].

Для улучшения реализуемости и помехозащищенности системы, полученное в виде функции времени $\lambda(t)$ выражается в виде обратной связи $\lambda(x)$. Если для функции переключения $\sigma(x)$ невозможно получить аналитическое выражение или она получается слишком сложным, то прибегают к ее аппроксимации кусками более простых функций [11].

Не смотря на простоту оптимального управления $u_k = \pm \bar{u}_k = const$ оно не обладает стабилизирующим свойством. Для вырождения начала координат $x_T = 0$ в точку равновесия в ее малой окрестности управление должно принимать нулевое значение $u_k = 0$. Поскольку в составе оптимального управления нулевое составляющее отсутствует, то для удержания системы в малой окрестности начала координат управление совершают высокочастотную вибрацию с максимальной амплитудой. Такая структурная особенность приводит к перерасходу энергии. Поэтому при реализации релейного управления в малой окрестности начала координат необходимо включить нулевое управление или обратную связь. При этом можно использовать релейные регуляторы с статическими характеристиками, показанными на рис.1.

Рис.1. Статические характеристики релейных регуляторов.



Пример 1. Рассмотрим задачу оптимального управления по быстродействию двойным интегратором. Уравнение объекта в координатах состояния имеет вид:

$$\begin{aligned}\dot{x}_1 &= x_2, \\ \dot{x}_2 &= u, \\ -\bar{u} &\leq u \leq \bar{u}.\end{aligned}$$

Требуется определить управление, приводящего объект из начального состояния

$\mathbf{x}_0 = (x_{10}, x_{20})^T$ в конечное $\mathbf{x}_T = (0, 0)^T$ за наискорейшее время.

Для данной задачи функция Гамильтона

$$H = -1 + \lambda_1(t)x_2 + \lambda_2(t)u.$$

Оптимальное управление:

$$u = \text{sign}[\lambda_2(t)].$$

Сопряженные переменные определяем из решения системы уравнений:

$$\frac{d\lambda(t)}{dt} = -\frac{\partial H}{\partial \mathbf{x}} = -\mathbf{A}^T \lambda(t) \quad \lambda(0) = \lambda_0 = ?$$

Покоординатное представление этого уравнения:

$$\dot{\lambda}_1(t) = 0, \quad \dot{\lambda}_2(t) = -\lambda_1(t).$$

При начальных условиях $\lambda_1(0) = \lambda_{10}$, $\lambda_2(0) = \lambda_{20}$ решение:

$$\lambda_1(t) = \lambda_{10}, \quad \lambda_2(t) = \lambda_{20} - \lambda_{10}t.$$

Тогда оптимальное управление до точности начальных условий:

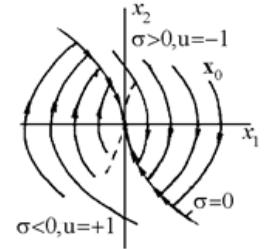
$$u = -\text{sign}(\lambda_{20} - \lambda_{10}t).$$

В зависимости от λ_{10} и λ_{20} знак $\lambda_2(t)$ может изменится один раз. Не стараясь

находить начальные условия $\lambda_{10}, \lambda_{20}$ определим $\lambda_2(t)$ в виде обратной связи по состоянию $\sigma = \lambda_2(x_1, x_2)$.

Если определить уравнение фазовой траектории, то при $u = \mp 1$ получим семейство парабол $x_1 = -0.5x_2^2 + C_1$ и $x_1 = +0.5x_2^2 + C_2$ по которым изображающая точка движется по часовой стрелке (см. рис.3). Здесь C_1, C_2 – зависящие от начальных условий постоянные.

Рис.3. Фазовый портрет оптимальной по быстродействию системы



Только два из парабол проходит через начало координат. Поэтому их можно использовать в качестве линий переключения управления. Уравнение линии, охватывающей обе части парабол можно записать в виде

$$\sigma = x_1 + 0.5x_2 |x_2| = 0.$$

Таким образом, оптимальное управление:

$$u = \begin{cases} -1 & \text{if } \sigma > 0, \\ +1 & \text{if } \sigma < 0. \end{cases}$$

На рис.4 показана функциональная структурная схема системы с нелинейной функцией переключения $\sigma = 0$. На рис.5, а – показана переходная характеристика $y(t)$, б – сигнал управления $u(t)$, в – фазовый портрет системы.

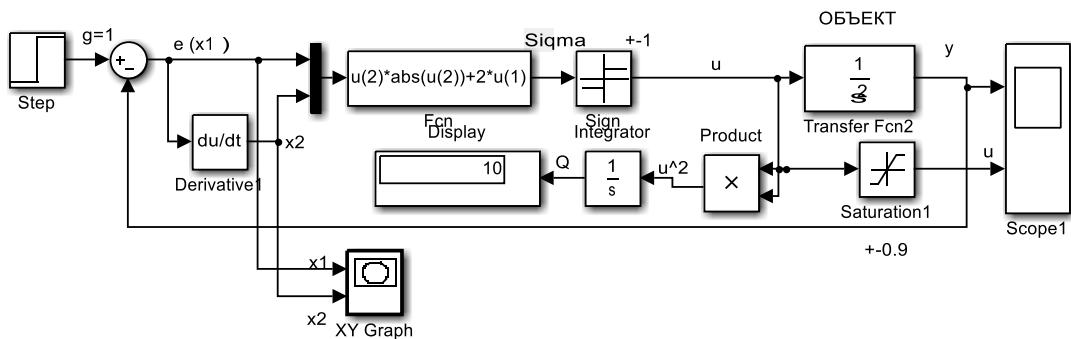
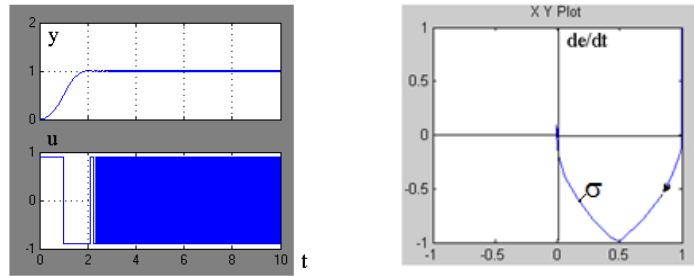


Рис. 4 Функциональная схема оптимальной системы



a), б)

в)

Рис. 5. Динамические характеристики системы

Как видно из рисунка 5, б в установившем режиме сигнал управления совершает высокочастотное разрывное колебания (вибрация).

3. Построение модифицированной системы

В данной работе для устранения вибраций предложено структурные изменения оптимальной системы: нелинейная функция переключения $\sigma(x_1, x_2)$ аппроксимируется прямой линей $\sigma_L(x_1, x_2) = x_2 + cx_1 = 0$; $sign$ -реле - заменяется на релейно-линейный закон управления (*Saturation*). В общем виде предложенное управление:

$$u = sat(s) = \begin{cases} ks & \text{if } |s| \geq s_0, \\ \bar{u} sign(s) & \text{if } |s| < s_0. \end{cases}$$

На рис.6 показаны статическая характеристика (а) и схема реализации (б) функции $sat(\cdot)$ на пакете *Simulink*.

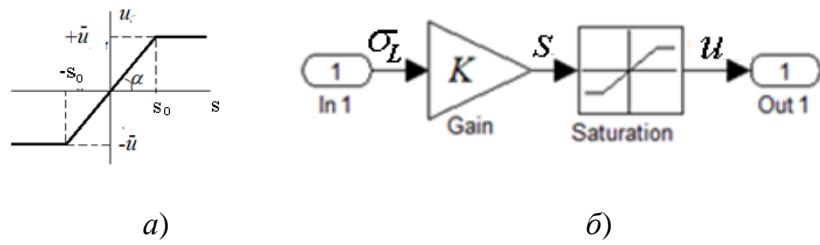


Рис.6. Статическая характеристика (а) и схема реализации (б) функции $sat(\cdot)$

Здесь K, c - параметры настройки; $s = K\sigma_L$ – входной сигнал; $k = \operatorname{tg}(\alpha) = \bar{u} / s_0$.

В *Simulink* задано $k = 1 \Rightarrow s_0 = \bar{u}$. При этом на интервале линейности $|s| \leq s_0$ входной сигнал s проходит без изменения. Следовательно $u = s = K\sigma_L$.

Для данного примера с учетом $s = K\sigma_L$ и $\bar{u} = 1 \Rightarrow s_0 = 1$ выражение для функции $\operatorname{sat}(s)$ можно переписать в виде:

$$u = \operatorname{sat}(\sigma_L) = \begin{cases} -1 & \text{if } \sigma_L > \sigma_0, \\ K\sigma_L & \text{if } |\sigma_L| \leq \sigma_0, \\ +1 & \text{if } \sigma_L < \sigma_0. \end{cases}$$

На рис. 7 показана схема модифицированной системы, реализованной на *Simulink* с линейной функцией переключения $\sigma_L = x_2 + cx_1 = 0$, $c = 2$. Коэффициент усиления $K=20$.

На рис.8,а показана переходная характеристика $y(t)$, б-сигнал управления $u(t)$, в-фазовый портрет системы.

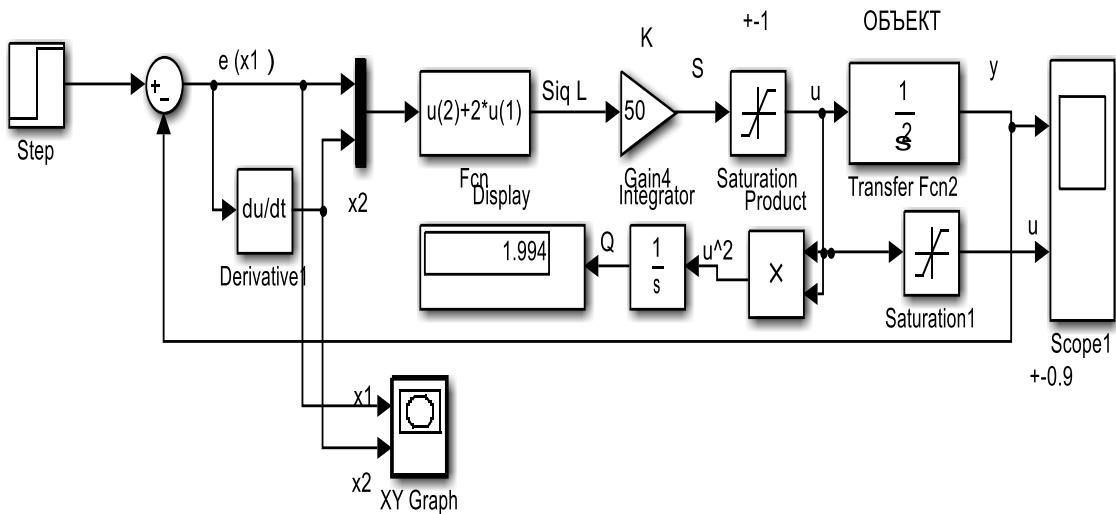


Рис.7. Схема модифицированной системы управления

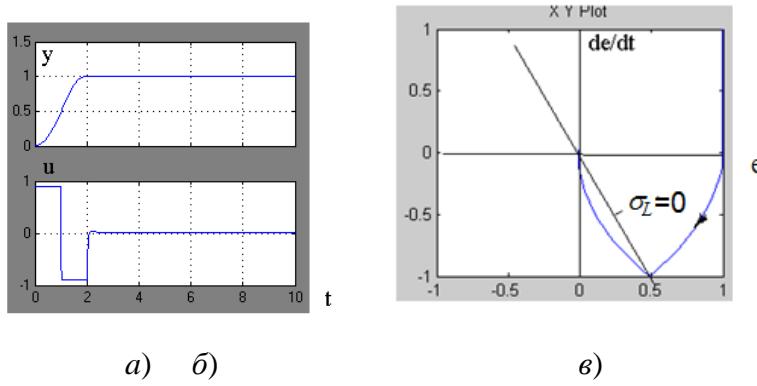


Рис.8. Динамические характеристики системы

В установившемся режиме сигнал управления принимает нулевое $u(t)=0$ значение и вибрации устраняются. Из рис.8, *a* и *в* видно, что время достижения начала координат (точка равновесия) составляет $t_s = 2c$.

4.Оценивание энергии управления и сравнительный анализ

Энергию управления вычисляем по известному выражению

$$Q = \int_0^{T_s} u^2 dt, \quad (2)$$

где T_s - время симуляции (время завершения процесса регулирования).

В оптимальной системе время перехода $t_s = 2c$. (см.рис.5 *a,б*). Энергия управления, вычисляемая по (2) при $T_s = 10c$. составляет $Q=10$ (см. рис.4, показание дисплея). В линеаризованной системе время перехода также $t_s = 2c$. (см.рис.8, *a, б*). Однако при $T_s = 10c \Rightarrow Q = 1.994 \approx 2$ (см. рис.7, показание дисплея).

Энергия управления оптимальной системы в 5 раз превышает энергию, затрачиваемую линеаризованной системой. Причина тому является вибрация управляющего сигнала в малой окрестности точки равновесия на интервале $t_s < t < T_s$ (рис.5,*б*). В системах стабилизации разница стремительно растет, поскольку в этих системах установившийся режим (settling time) может продолжаться довольно долгое время.

Особый интерес представляет использование коэффициента усиления K . В определенных условиях увеличение K приводит к улучшению робастных свойств системы.

5. Исследование робастности

Если расширить ограничение на управления, предложенный алгоритм можно использовать для управления объектов с параметрическими неопределенностями. Покажем эту особенность на конкретном примере.

Пример 2. Рассмотрим гармонический осциллятор с передаточной функцией $W = b/(s^2 + a)$.

Параметр a изменяется на широком интервале $1 \leq a \leq 10$.

На рис.9 показана схема управления с эталонной моделью $g=\sin(2t)$ (уставка). Ограничение на управление не учитывается. Это достигнуто путем устранения блока «Saturation».

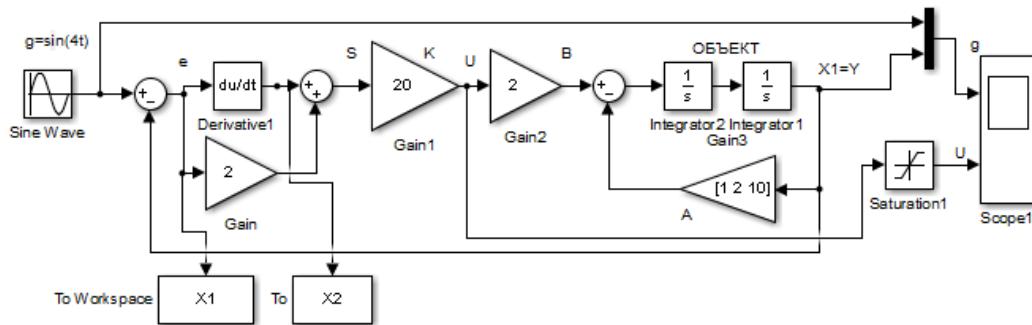
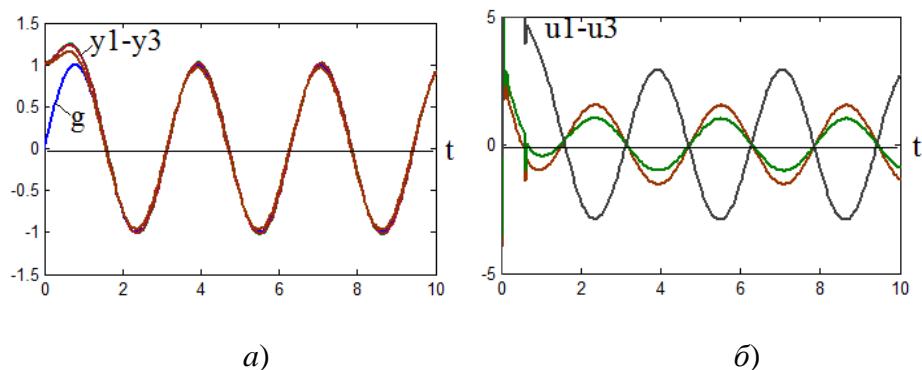
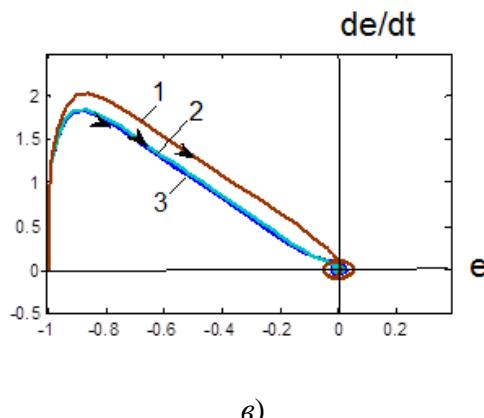


Рис.9. Схема системы управления при параметрической неопределенности





б)

Рис.10. Динамические характеристики системы управления при параметрической неопределенности

Как видно из рис.10,*a* при $K=20$ после $t \approx 1.8$ с. выход системы $\{y_1(t), y_2(t), y_3(t)\}$ довольно точно отслеживает эталонную траекторию $g = \sin(2t)$. Ощутимый разброс траекторий в установившемся режиме не наблюдается. Сигнал управления изменяется на небольшом интервале $5 \leq u_i \leq 5$, $i = 1,2,3$. Полученный результат подтверждает наличие свойств робастности. Увеличивая коэффициента усиления K ошибку регулирования можно уменьшить до сколь угодно малой величины.

6. Заключение

Определение управления по быстродействию путем решения задачи аналитического конструирования оптимальных регуляторов является сложной математической задачей. Кроме того, полученное решение не является полным, поскольку начальное условие сопряженных переменных является неизвестным. В статье предложен структурный подход, состоящий из линеаризации оптимального релейного управления и функции переключения. При линеаризации использован принцип обратной связи. Основной задачей являлся не сохранение полной оптимальности, а уменьшение энергии управления путем устранения вибрации и наделения системы свойством робастности.

Эффективность предложенного алгоритма модификации структуры проверена путем сравнительного анализа на Simulink. Полученные положительные результаты в задаче управления «двойного интегратора» позволить использовать результаты данной работы в инженерных приложениях.

Литература

1. Рзаев Т.Г. Оптимальное управление переходными процессами объектами по быстродействию в многокритериальной среде // Мехатроника, автоматизация, управление. Том.21, №4, 2020, с.200-207.
2. Брайсон А., Хо Ю.ши. Прикладная теория оптимального управления. М.: Мир, 1972, 554 с.
3. Гудвин Г.К., Гребе С.Ф., Сальгадо М.Э. Проектирование систем управления. М.: Бином, Лаборатория знаний, 2004, с.151-157.
4. Дорф Р., Бишоп Р. Современные системы управления. М.: лаборатория базовых знаний, 2004, с.308-348.
5. Ляпин Л.Н., Муромцев Ю.Л. Анализ и оперативный синтез оптимального управления в задаче двойного интегратора на множестве состояний функционирования. //Техническая кибернетика, 1990, №3, с.57-64.
6. Ногин В.Д., Протодьяконов И.О., Евлампиев И.И. Основы теории оптимизации. М.: Высшая школа, 1986, 280 с.
7. Острем К., Виттермак Б. Системы управления с ЭВМ. М.: Мир, 1987, с.432.
8. Поспелов Д.А. Ситуационное управление: Теория и практика. М.: Наука, 1986, 284 с.
9. Rüstəmov Q.Ə., Məmmədova A.T., Rüstəmov R.Q. Optimal və adaptiv idarəetmə:Matlab simulinkdə modelləşdirmə. Dərs vəsaiti.Bakı, AzTU-nun nəşriyyatı. 2016,265 s.
10. Rustamov G.A., Samedov R., Namazov M.B., Farxadov V.Q. Identifier of initial conditions for adjoint variables in minimum time optimal control problem . Proceedings of the International conference on modeling and simulation. Vol.2, pp.795-797.August 2006, Konya, Turkey.
11. Нетушил А.В., Балтрушевич А.В., Бурляев В.В. Теория автоматического управления: Нелинейные системы, управление при случайных воздействиях. М.: Высш. школа. 1983. 432 с.



Rustamov Rustam Gazanfar oglu is doctoral student of the "Automation and Control" Cathedra of Azerbaijan Technical University. In 2007 he graduated from the Master's program of Sumgait State University by specialty "Management and informatics in technical systems". In 2017 entered doctoral studies at AzTU. He has 31 scientific papers, including the Eurasian patent ranked 3rd in the Republican competition. He is currently the head of the shift of ACS.

E-mail: gazanfar.rustamov@gmail.com

phone: 050 516 85 60

Contents

Saka M., Gozde H., Eke I., Yusifbayli N., Taplamacioglu M.C.

Comparative Performance Analysis of VSA and GWO Techniques for Load Frequency Control of Single Area Fuel Cell Microgrid.....1

Ilyushin Pavel Vladimirovich, Kulikov Aleksandr Leonidovich

Principles Behind The Requirement to The Extent and Speed of Load-Shedding By Islanding Automations in Microgrids.....10

Yusifbayli N., Nasibov V., Guliyev H., Aghaliyev N.

Assesment of Penterarion Level of Variable Renewable Generations.....31

Atrafi Giyasi M.A., Bodurov V.C. Kerimov K.A.

Diagnosis Research of The Fault of Oil-Immersed Power Transformers Based on Probabilistic Neural Network.....45

Babayeva S. Sh.

Determination of Density Dependence on Temperature of Geothermal Waters of Jarli Kurdamir Region of Azerbaijan.....54

Rustamov R. Q.

Reducing The Energy Consuption of The Speed-Optimal System.....61