

ენერგეტიკა და ენერგეტიკული ტექნოლოგიები

საქართველოს ელექტროსისტემის ძაბვის მდგრადობის ანალიზი განახლებადი ენერჯის წყაროების ინტეგრაციისას

გიორგი გოგია

giorgi.gogia@gse.com.ge

აკაკი წერეთლის სახელმწიფო უნივერსიტეტი

ქუთაისი, საქართველო

DOI:<https://doi.org/10.52340/atsu.2025.2.26.12>

სტატია ეხება საქართველოს ელექტროსისტემის ძაბვის მდგრადობის ანალიზს განახლებადი ენერჯის წყაროების ინტეგრაციის პირობებში. განახლებადი გენერაციის ჩართვა მნიშვნელოვნად ცვლის ელექტროსისტემის დინამიკურ მახასიათებლებს და ართულებს ძაბვის შენარჩუნებას ნორმის ფარგლებში, რაც განსაკუთრებით კრიტიკულია დაბალი ინერციის ელექტროსისტემებში. წარმოდგენილი ანალიზი ეფუძნება როგორც სიმულაციურ მოდელირებას, ისე ანალიტიკურ ანალიზს, რომელიც მოიცავს ქსელის ტოპოლოგიას, გენერაციის სტრუქტურას, დატვირთვის თავისებურებებისა და კონტროლის არსებული მექანიზმების ეფექტურობის გათვალისწინებას. კვლევის მთავარი ამოცანებია კრიტიკული ძაბვის წერტილების იდენტიფიცირება, ძაბვის ვარდნისა და აღდგენის პროცესების დინამიკის შესწავლა და არსებული რეგულირების საშუალებების სტაბილიზაციის პოტენციალის შეფასება. განსაკუთრებული ყურადღება გამახვილებულია განახლებადი წყაროების მაღალი წილის პირობებში ძაბვის მდგრადობის რისკების გამოვლენასა და მათი შესამსუბუქებელი ღონისძიებების განსაზღვრაზე. მიღებული შედეგები უზრუნველყოფს როგორც ტექნიკურ რეკომენდაციებს, ისე პრაქტიკულ მიდგომებს საქართველოს ელექტროსისტემის ოპერირებისა და დაგეგმარებისათვის.

საკვანძო სიტყვები: დინამიკური მახასიათებლები, გენერაციის ინტეგრაცია, კონტროლის მექანიზმები, სისტემის სტაბილიზაცია, სიმულაციური მოდელირება

შესავალი. საქართველოს ელექტროსისტემა მცირე ზომისაა და მნიშვნელოვანწილად დამოკიდებულია ჰიდრო რესურსებზე. ქვეყნის დადგმული სიმძლავრის დაახლოებით 74% უკავშირდება ჰესებს, რაც განპირობებს გენერაციის დამოკიდებულებას ჰიდროსადგურებზე. ამასთან, საქართველოში აღინიშნება ელექტროენერჯის მოხმარების მუდმივი ზრდა, ჯამური მოხმარება წელიწადში საშუალოდ 4.3%-ით იმატებს (სემეკი 2022). რაც სამომავლოდ დამატებით დატვირთვას უქმნის ქსელს და საჭიროებს სისტემის რესურსების ოპტიმალურ განაწილებას (Bakić

2020).

საქართველოს ელექტროსისტემაში დაგეგმილი მზის და ქარის სადგურების ინტეგრაცია, ერთის მხრივ ზრდის გენერაციის მოცულობას, მეორეს მხრივ კი ამცირებს სისტემის ჯამურ ინერციას. აგრეთვე, არატრადიციულ განახლებად ენერჯის რესურსებზე (მზე, ქარი) დაფუძნებული ელექტროსადგურები ელექტროსისტემაში რეაქტიული სიმძლავრის დაბალანსებასა და ძაბვის რეგულირებაში მონაწილეობას, ფაქტობრივად, არ იღებს (Kundur ... 1994). ეს გამოწვევები ფართო სპექტრისაა და გარდა აღნიშნულისა ქმნის ელექტრული ენერჯის ხარისხის პრობლემებსაც, რაც მოიცავს სინუსოიდური მრუდების დამახინჯებას, სამფაზა სისტემის ასიმეტრიულობას და ძაბვის სწრაფ ფლუქტუაციებს (Arziani ... 2025).

სისტემაზე მნიშვნელოვანი დატვირთვის ცვლილებების ან გენერატორების ავარიული გამორთვის შემთხვევაში განახლებადების მაღალი წილი წარმოშობს ახალ ტიპის ძაბვის დინამიკურ პრობლემებს, რაც მოითხოვს სპეციალურ ანალიზს და დამხმარე საშუალებების (მაგალითად, BESS ან კონდენსატორთა ბატარეა) ეფექტურ ინტეგრაციას.

საქართველოს ელექტროსისტემა პირობითად შეიძლება დაიყოს აღმოსავლეთ და დასავლეთ ნაწილად, სადაც სისტემის გამყოფი კვანძია ქს „ზესტაფონი 500“. დასავლეთ საქართველო ხასიათდება აქტიური სიმძლავრის სიჭარბით, ხოლო აღმოსავლეთ საქართველო - დეფიციტით. საქართველოს ელექტროსისტემის დასავლეთ ნაწილი რეაქტიული სიმძლავრის თვალსაზრისით მთელი წლის ჭრილში დაბალანსებულია. მეორე მხრივ აღმოსავლეთ ნაწილში ზაფხულის პერიოდში შეინიშნება რეაქტიული სიმძლავრის დეფიციტი. აღნიშნული პრობლემა განსაკუთრებით მწვავება იზოლირებულ რეჟიმში.

საქართველოს ელექტროსისტემის აღმოსავლეთ და დასავლეთ ნაწილებს შორის ელექტრული კავშირი სუსტია. კერძოდ, აღნიშნული კავშირის ზემადლი ძაბვის ეგზ ავარიული გამორთვისას, ცალკეულ რეჟიმებში, არ სრულდება N-1 კრიტერიუმი.

მცირე ინერციის მქონე სისტემებში ძაბვის მდგრადობის საკითხები მეტად აქტუალური და პრებლემური ხდება. ელექტროსისტემაში აქტიური სიმძლავრის უბალანსობა თითქმის ყოველთვის წარმოქმნის რეაქტიული სიმძლავრის უბალანსობს, რაც სისტემაში იწვევს ძაბვის რყევებს (Anderson ... 2003).

ზემოაღნიშნულის საფუძველზე აუცილებელია საქართველოს ელექტროსისტემისთვის ძაბვის მდგრადობის ანალიზი, რომელიც გულისხმობს:

- ელექტროსისტემის ძაბვის დინამიკური მდგრადობის შეფასება სახასიათო დატვირთვის რეჟიმებში;
- ძაბვის ვარდნისა და რყევების გამოწვევების განსაზღვრა მაღალი განახლებადების წილის პირობებში;
- საჭირო სარეზერვო და დამხმარე საშუალებების მოცულობის განსაზღვრა;
- მიწოდების უწყვეტობისა და სისტემის მდგრადობის უზრუნველყოფას ელექტროსისტემის განვითარებისა და განახლებადი ენერჯის წყაროების ინტეგრაციის პირობებში.

აღნიშნული ანალიზი იქნება საფუძველი ელექტროსისტემის ოპტიმიზებული მართვისთვის, რაც ხელს შეუწყობს როგორც მზისა და ქარის ეფექტურ ინტეგრაციას, ასევე სისტემის საიმედო და უსაფრთხო ოპერირებას მომავალი წლების განმავლობაში.

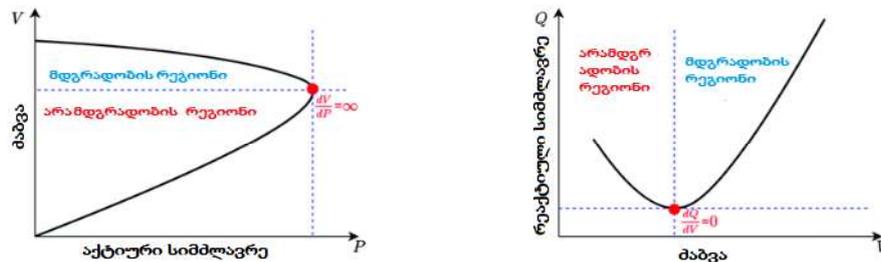
ძაბვის მდგრადობის კრიტერიუმი. ძაბვის მდგრადობა არის ელექტროსისტემის უნარი შენარჩუნოს ძაბვა ოპტიმალურ ზღვარში, ნებისმიერი დინამიკური ან სტატიკური დატვირთვის ცვლილებების დროს (Anderson ... 2003). ძაბვის მდგრადობის უზრუნველყოფა მნიშვნელოვანია როგორც სისტემის საიმედო მუშაობისთვის, ასევე, ინერციული და არაინერციული რესურსების ინტეგრაციისას. დაბალი ინერციის სისტემებში ძაბვის ვარდნა ხდება უფრო სწრაფად და აღდგენის მექანიზმები ნაკლებად ეფექტურია. ამ მიზეზით, ძაბვის მდგრადობის ანალიზისას აუცილებელია:

- ქსელის ტოპოლოგიის და გადაცემის ხაზების ფუნქციური პარამეტრების გათვალისწინება;
- გენერაციის და გადაცემის ხაზების ურთიერთდამოკიდებულების შეფასება;
- მზისა და ქარის სადგურების დინამიკური მახასიათებლების მოდელირება;
- სიმულაციებში ქსელის ნორმალური და ავარიული დატვირთვების მოდელირება.

ძაბვის მდგრადობის გასაძლიერებლად გამოიყენება სხვადასხვა მექანიზმი:

გ. გოგია

- ავტომატური ძაბვის რეგულატორები (AVR) – გენერატორების ძაბვის სიდიდის შენარჩუნება ნომინალურ დონეზე;
- Battery Energy Storage Systems (BESS) – აქტიური და რეაქტიული სიმძლავრის უზრუნველყოფა ძაბვის მდგრადობისათვის (U.S. Department of Energy (DOE) 2013).
- FACTS მოწყობილობები (SVC, STATCOM)– ქსელში რეაქტიული სიმძლავრის მართვა და ძაბვის მდგრადობის უზრუნველყოფა (Hingorani ... 2000).



ნახ.1. ძაბვის მდგრადობის კრიტერიუმი.

სისტემის ძაბვის მდგრადობის მთავარი პირობაა, რომ ნებისმიერი კვანძისთვის მოქმედი რეჟიმის ფარგლებში რეაქტიული სიმძლავრის შემოდინების ზრდამ უნდა გამოიწვიოს ამავე კვანძზე ძაბვის მატება. თუ კვანძის რომელიმე შემთხვევაში რეაქტიული სიმძლავრის მატება იწვევს ძაბვის შემცირებას, ეს ძაბვის არამდგრადობის პირობად მიიჩნევა.

მოკლედ, მთელი სისტემის მდგრადობა განისაზღვრება ასე:

- სისტემა მდგრადია, როცა ყველა კვანძზე $Q-V$ დამოკიდებულება დადებითია (Q –რეაქტიული სიმძლავრე, V –ძაბვა).
- სისტემა არამდგრადია, თუ სულ მცირე ერთ კვანძში $Q-V$ დამოკიდებულება უარყოფითია.

ამგვარად, მდგრადობა პრაქტიკულად ნიშნავს, რომ რეაქტიული სიმძლავრის ზრდა ყოველთვის ხელს უწყობს ძაბვის ზრდას სისტემის ნებისმიერ წერტილში.

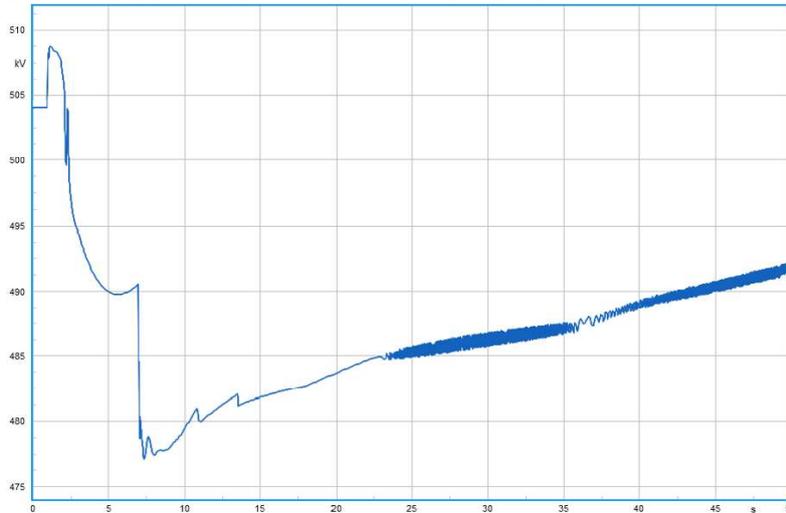
$$S_V = \lim_{\Delta Q \rightarrow 0} \frac{\Delta Q}{\Delta V} = \frac{dQ}{dV} > 0$$

საქართველოს ელექტროსისტემის ძაბვის მდგრადობის ანალიზი შემდეგ ეტაპებად:

რეჟიმის აღწერა. საქართველოს ელექტროსისტემა იზოლირებულ რეჟიმშია. ზაფხულის მაქსიმალური მოხმარების რეჟიმის მიხედვით საქართველოს სისტემის ჯამური დატვირთვა შეადგენს 2384 მგვტ-ს, გენერაცია 3129 მგვტ-ს. ექსპორტი თურქეთი 700 მგვტ-ს. გახლებადი გენერაციის წილია 25%. სისტემაში ძაბვის რეგულატორები ჩართულია.

ავარიული რეჟიმის მოდელირება

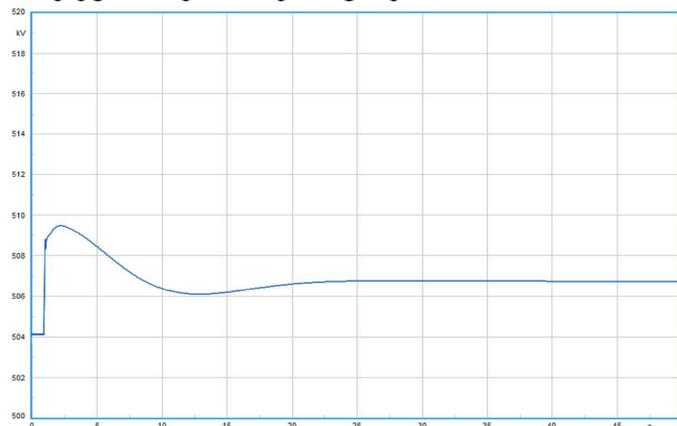
ქ/ს ქსანის რეაქტორის გამორთვა (ბატარეის გარეშე)



ნახ.2. ძაბვის სიდიდე ქ/ს ქსანი 500-ზე.

მე-2 ნახაზზე ნაჩვენებია გრაფიკი მიუთითებს, რომ რეაქტორის გამორთვისას ბატარეის გარეშე სისტემა ძაბვის მდგრადობას ვერ ინარჩუნებს და დიდია სისტემის დაშლის რისკი.

ქ/ს ქსანის რეაქტორის გამორთვა (ბატარეით)



ნახ.3. ძაბვის სიდიდე ქ/ს ქსანი 500-ზე.

მე-3 ნახაზზე ნაჩვენებია გრაფიკი მიუთითებს, რომ ბატარეის ჩართვა მნიშვნელოვნად ზრდის სისტემის მდგრადობის პოტენციალს, უზრუნველყოფს რხევების სწრაფ ჩახშობას და ძაბვის შენარჩუნებას ნომინალურთან ახლოს.

დასკვნა. საქართველოს ელექტროსისტემის ძაბვის მდგრადობის ანალიზმა აჩვენა, რომ ბატარეების ინტეგრირება მნიშვნელოვნად ზრდის სისტემის საიმედოობას და უზრუნველყოფს სტაბილურ ძაბვას. ბატარეების გარეშე რამდენიმე კვანძში შეინიშნება ძაბვის მნიშვნელოვანი ცვლილება, რაც მიუთითებს პოტენციურ არამდგრადობაზე. განსაკუთრებით აღსანიშნავია, რომ აღმოსავლეთ საქართველო, დასავლეთთან შედარებით, რეაქტიული სიმძლავრის გენერაციის კუთხით უფრო სუსტი რეგიონია. ზაფხულის პერიოდში იზოლირებულ რეჟიმში მიზანშეწონილია ბატარეების განთავსება სწორედ აღმოსავლეთ საქართველოში, სადაც მათი ეფექტი ყველაზე მეტად გააძლიერებს სისტემის მდგრადობას. საბოლოოდ, ბატარეები შეიძლება ჩაითვალოს ელექტროსისტემის მდგრადობისა და განახლებადი ენერჯის წყაროების ინტეგრაციისთვის ერთ-ერთ მთავარ კომპონენტად.

ლიტერატურა

საქართველოს ენერგეტიკისა და წყალმომარაგების მარეგულირებელი ეროვნული კომისია (სემეკი). 2022. საქართველოს ელექტროსისტემის განვითარების გეგმა.

Arziani, G., Kvatadze, B., & Baramidze, L. 2023. „Analyzing the Behavior of PI Section and T Section High Voltage Line Models in Harmonic Load Flow“. *Georgian Scientists*, 5(4), 2023:177–187.

<https://doi.org/10.52340/g.s.2023.05.04.16>

Arziani, G. and T., Elizarashvili. 2025. “FACTS for effective DER integration into the Georgia distribution grids,” *Turk J Electr Power Energy Syst.*, 2025; 5(2), 105-113. Published online May 5, 2025.

<https://doi.org/10.5152/tepes.2025.24036>

Arziani, G. and G. Chkhaidze, 2025. “The Impact of the Level of Detail in the Distributed Parameter Model of a Transmission Line on Its Frequency Characteristics”, *GS*, vol.7, no.2, 2025:493–502.

<https://doi.org/10.52340/g.s.2025.07.02.44>

- Anderson, P. M., & Fouad, A. A. 2003. *Power System Control and Stability*. IEEE Press.
- Bakič, K. 2020. *SEERC CIGRE History: Early Electrification and Empowerment of Region where Current Electricity was Born*. Ljubljana, Slovenia: Slovenian Association of Electric Power Engineers CIGRE&CIRED.
- Hingorani, N. G., & Gyugyi, L. 2000. *Understanding FACTS: Concepts and Technology of Flexible AC Transmission Systems*. IEEE Press.
- IEEE/CIGRÉ Joint Task Force on Stability Terms and Definitions. 2004. „Definition and Classification of Power System Stability“. *IEEE Transactions on Power Systems*, 19(3), 1387–1401.
- Kundur, P., Balu, N. J., & Lauby, M. G. 1994. *Power System Stability and Control*. McGraw-Hill.
- U.S. Department of Energy (DOE). 2013. *Grid Energy Storage*.

კვლევა განხორციელდა „შოთა რუსთაველის საქართველოს ეროვნული სამეცნიერო ფონდის“ მხარდაჭერით [გრანტის ნომერი - PHDF-25-3153].

Energy Engineering and Power Technology

Voltage Stability Analysis of the Power System of Georgia under Renewable Energy Integration

Giorgi Gogia

giorgi.gogia@gse.com.ge

Akaki Tsereteli State University

Kutaisi, Georgia

DOI:<https://doi.org/10.52340/atsu.2025.2.26.12>

The article addresses the analysis of voltage stability in power system of Georgia under conditions of renewable energy integration. The inclusion of renewable generation significantly changes the dynamic characteristics of the power system and makes it more difficult to maintain voltage within acceptable limits, which is particularly critical in low-inertia systems. The presented analysis is based on both simulation modeling and analytical methods, taking into account the network topology, generation structure, load characteristics, and the effectiveness of existing control mechanisms. Main objectives of the study are the identification of critical voltage points, the investigation of the dynamics of voltage dips and recovery processes, and the evaluation of the stabilization potential of existing regulation means. Special attention is

given to identifying voltage stability risks under high shares of renewable sources and defining mitigation measures. The obtained results provide both technical recommendations and practical approaches for the operation and planning of Georgia's power system.

Keywords: *dynamic characteristics, generation integration, control mechanisms, system stabilization, simulation modeling*

Introduction. The Georgian power system is relatively small and largely dependent on hydro resources. Approximately 74% of the country's installed capacity is associated with hydroelectric power plants, which results in generation being highly reliant on hydro stations. At the same time, Georgia experiences a steady increase in electricity consumption, with total demand growing on average by 4.3% per year (GNERC 2022). This trend is expected to impose additional stress on the grid in the future and necessitates optimal allocation of system resources (Bakić 2020).

The planned integration of solar and wind power plants into the Georgian power system, on the one hand, increases generation capacity, but on the other hand, reduces the overall system inertia. Moreover, power plants based on non-traditional renewable energy resources (solar and wind) practically do not participate in reactive power balancing and voltage regulation within the system (Kundur ... 1994). These challenges are wide-ranging and, in addition to the above, create power quality issues, including sinusoidal waveform distortions, asymmetry in three-phase systems, and rapid voltage fluctuations (Arziani ... 2025).

In the event of significant load changes in the system or emergency generator outages, a high share of renewables gives rise to a new type of dynamic voltage problem, which requires specialized analysis and the effective integration of supporting resources (e.g., BESS or capacitor banks).

The Georgian power system can be provisionally divided into eastern and western parts, with the system's dividing node being the „Zestafoni 500“ kV substation. Western Georgia is characterized by a surplus of active power, whereas eastern Georgia experiences a deficit. From the perspective of reactive power, the western part of the Georgian power system is balanced throughout the year. On the other hand, in the eastern part, a reactive power deficit is observed during the summer period. This problem becomes particularly acute under isolated (islanded) operation conditions.

The electrical connection between the eastern and western parts of the Georgian power system is weak. Specifically, in the event of an emergency outage of the high-voltage line of this connection, the N-1 criterion is not met in certain operating conditions.

In low-inertia systems, voltage stability issues become particularly critical and problematic. In a power system, active power imbalances almost always lead to reactive power imbalances, which in turn cause voltage fluctuations within the system (Anderson ... 2003).

Based on the above, it is necessary to conduct a voltage stability analysis for the Georgian power system, which involves:

- Assessing the dynamic voltage stability of the power system under characteristic load conditions;
- Identifying voltage drop and fluctuation challenges under high renewable penetration conditions;
- Determining the required capacity of reserve and supporting resources;
- Ensuring supply continuity and system stability in the context of power system development and the integration of renewable energy sources.

This analysis will serve as a basis for optimized power system management, facilitating the efficient integration of solar and wind energy, as well as ensuring reliable and secure system operation in the coming years.

Voltage Stability Criterion. Voltage stability is the ability of a power system to maintain voltage within an optimal range under any dynamic or static load changes (IEEE/CIGRÉ 2004). Ensuring voltage stability is important both for reliable system operation and for the integration of inertial and non-inertial resources. In low-inertia systems, voltage drops occur more rapidly, and recovery mechanisms are less effective. For this reason, voltage stability analysis should take into account:

- Consideration of the network topology and the functional parameters of transmission lines;
- Assessment of the interdependence between generation and transmission lines;
- Modeling the dynamic characteristics of solar and wind power plants;
- Simulation of the network under both normal and contingency load conditions.

Various mechanisms are used to enhance voltage stability:

- Automatic Voltage Regulators (AVR) – maintain generator voltage at nominal levels;
- Battery Energy Storage Systems (BESS) – provide active and reactive power to support voltage stability (U.S. Department of Energy (DOE) 2013);
- FACTS devices (SVC, STATCOM) – manage reactive power in the network and ensure voltage stability (Hingorani ... 2000).

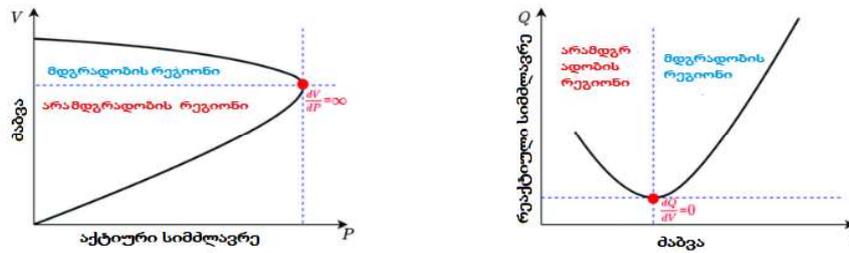


Fig.1. Voltage Stability Criterion.

The main condition for voltage stability in a system is that, at any bus under operational conditions, an increase in reactive power injection should result in a voltage increase at the same bus. If, in any case, an increase in reactive power causes a voltage drop, this is considered a condition of voltage instability.

In short, the overall system stability is defined as follows:

- The system is stable when the Q–V relationship is positive at all buses (Q – reactive power, V – voltage).
- The system is unstable if the Q–V relationship is negative at even a single bus.

Thus, in practice, stability means that an increase in reactive power always contributes to a voltage rise at any point in the system.

$$S_V = \lim_{\substack{\Delta Q \rightarrow 0 \\ \Delta V \rightarrow 0}} \frac{\Delta Q}{\Delta V} = \frac{dQ}{dV} > 0$$

The voltage stability analysis of the Georgian power system can be presented in the following stages:

Operating Condition Description. The Georgian power system is operating in islanded mode. Under the peak summer load, the total system demand is 2,384 MW, generation is 3,129 MW, and exports to Turkey are 700 MW. Renewable generation accounts for 25% of the total. Voltage regulators are active in the system.

Contingency Scenario Modeling

Outage of the Ktsani Substation Reactor (without battery)

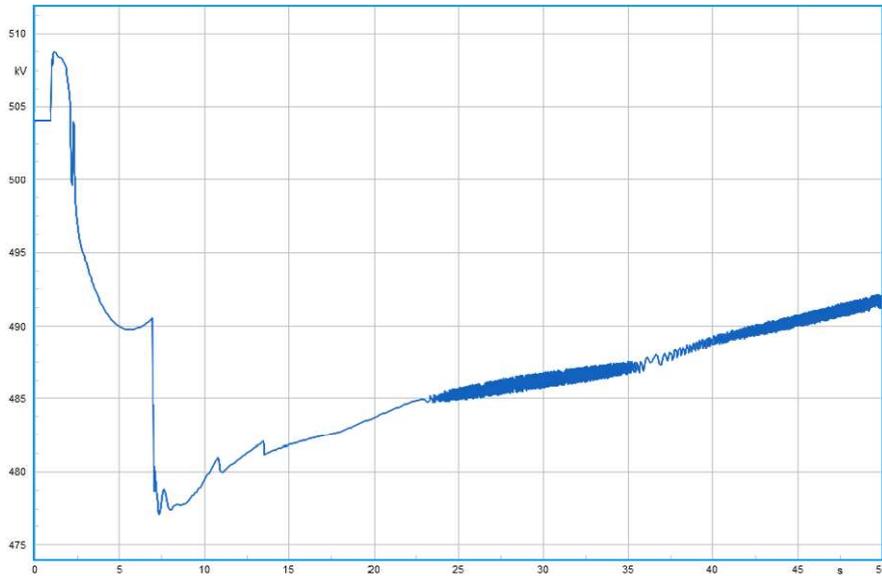


Fig.2. Voltage Magnitude at Ktsani 500 kV Substation.

The graph shown in Figure 2 indicates that, when the reactor is out of service and no battery is installed, the system cannot maintain voltage stability, and there is a high risk of system collapse.

Outage of the Ktsani Substation Reactor (with battery)

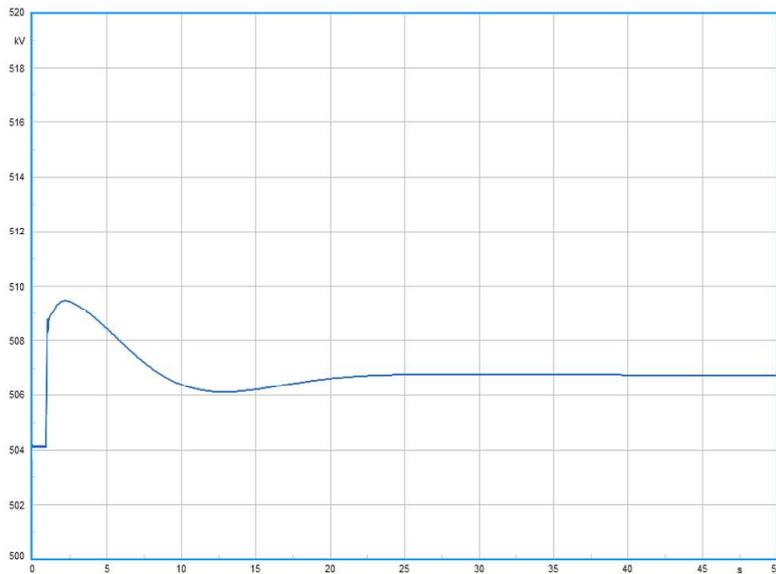


Fig.3. Voltage Magnitude at Ktsani 500 kV Substation.

The graph shown in Figure 3 indicates that connecting the battery significantly increases the system's voltage stability potential, ensures rapid damping of oscillations, and maintains voltage close to nominal values.

Analysis of result. The voltage stability analysis of the Georgian power system demonstrated that integrating batteries significantly enhances system reliability and ensures stable voltage. Without batteries, several buses exhibit substantial voltage variations, indicating potential instability. Notably, eastern Georgia is weaker in terms of reactive power generation compared to the western region. During the summer in islanded mode, it is advisable to place batteries specifically in eastern Georgia, where their impact most effectively strengthens system stability. Ultimately, batteries can be considered a key component for ensuring both power system stability and the integration of renewable energy sources.

This work was supported by "Shota Rustaveli National Science Foundation of Georgia" (SRNSFG) [Grant number - PHDF-25-3153].