

UDC 621.311

SCOPUS CODE 2101

<https://doi.org/10.36073/1512-0996-2025-2-188-193>

ელექტროგენერატორების ნომინალურ სიმძლავრეთა კლასიფიკაცია

გურამ მახარაძე	ელექტრული რეჟიმებისა და ანალიტიკის დეპარტამენტი, საქართველოს სახელმწიფო ელექტროსისტემა, საქართველო, 0105, თბილისი, ნ. ბარათაშვილის ქ. №2 E-mail: guram.makharadze@gse.com.ge
თამარ ჯიქია	ელექტრული რეჟიმებისა და ანალიტიკის დეპარტამენტი, საქართველოს სახელმწიფო ელექტროსისტემა, საქართველო, 0105, თბილისი, ნ. ბარათაშვილის ქ. №2 E-mail: tamar.jikia@gse.com.ge
დავით ჯაფარიძე	ელექტრული რეჟიმებისა და ანალიტიკის დეპარტამენტი, საქართველოს სახელმწიფო ელექტროსისტემა, საქართველო, 0105, თბილისი, ნ. ბარათაშვილის ქ. №2 E-mail: datojaparidze1995@gmail.com

რეცენზენტები:

გ. არზიანი, სტუ-ის ენერგეტიკის ფაკულტეტის პროფესორი

E-mail: g.g.arziani@gmail.com

ი. გორდიაშვილი, სტუ-ის ენერგეტიკის ფაკულტეტის ასოცირებული პროფესორი

E-mail: gordiashviliirakli02@gtu.ge

ანოტაცია. დღეისათვის ელექტროსისტემაში გენერატორთა კლასიფიკაცია მკაცრად განსაზღვრული არ არის. ყველა ქვეყანას გენერატორთა კლასიფიკაციის საკუთარი კრიტერიუმები აქვს. მოცემული სტატიის ავტორთა რეკომენდაციაა ელექტროგენერატორების მიკრო-, მილი-, საშუალო, დიდ (მძლავრ) და ზემოდად გენერატორებად კლასიფიკაცია განხორციელდეს მოცემული P_n ნომინალური სიმძლავრის მქონე გენერატორის სისტემის მუშაო-

ბაზე იმ ნეგატიური გავლენის მასშტაბის მიხედვით, რომელსაც ადგილი აქვს ამ გენერატორის ავარიულად გამორთვისას (ნომინალური სიხშირიდან გადახრა).

საკვანძო სიტყვები: აქტიური სიმძლავრე; ელექტროგენერატორი; ელექტროსისტემა; კლასიფიკაცია; სიხშირე.

შესავალი

დღეისათვის ელექტროგენერატორების მიკრო-, მილი-, საშუალო და დიდი სიმძლავრის გენერატორებად კლასიფიკაცია მკაცრად განსაზღვრული არ არის. ყველა ქვეყანას თავისი საზღვრები აქვს. ლოგიკურია თუ ელექტროგენერატორების კლასიფიკაციას განვახორციელებთ მოცემული P_{Σ} ნომინალური სიმძლავრის მქონე გენერატორის ელექტროსისტემის მუშაობაზე იმ ნეგატიური გავლენის მასშტაბის მიხედვით, რომელსაც ადგილი აქვს ამ გენერატორის ავარიულად გამორთვისას.

როგორც კვლევები გვიჩვენებს, წლის განმავლობაში ელექტროსისტემაში მომუშავე გენერატორების ავარიულად გამორთვის ალბათობა $(1 \div 5 \%)$ -ის ფარგლებშია. ეს ნიშნავს, რომ წლის განმავლობაში ელექტროსისტემაში მოსალოდნელია ყოველი 100 მომუშავე გენერატორიდან ავარიულად გამორთოს $(1 \div 5)$ გენერატორი [1].

ელექტროსისტემის მომხმარებელთა მუშაობის რეჟიმებიდან გამომდინარე, სისტემის ჯამური აქტიური დატვირთვა ($P_{\text{დატ}}$) დროში ცვლადი სიდიდეა და, შესაბამისად, სიხშირის ნომინალურიდან გადახრა სისტემის მუშაობის თანამდევ მოვლენაა. სიხშირის ნომინალურიდან გადახრა $\pm 0,1$ ჰერცის ფარგლებში გავლენას ვერ ახდენს მომხმარებლის მუშაობაზე და, აქედან გამომდინარე, „ქსელის წესების“ თანახმად სიხშირის $\Delta f = \pm 0,1$ ჰერცის ფარგლებში გადახრა მიღებულია დასაშვებ სიდიდედ. გამონაკლის შემთხვევებში (ავარიის შემდგომი ან სხვა განსაკუთრებული რეჟიმი) სიხშირის $\Delta f = \pm 0,2$ ჰერცის ფარგლებში ხანმოკლე გადახრა, ასევე, დასაშვებია [2, 3].

ძირითადი ნაწილი

ელექტროსისტემაში აქტიური სიმძლავრის დეფიციტის $P_{\text{დეფ}}$ წარმოქმნა იწვევს სიხშირის ნომინალურიდან გადახრას

$$\Delta f = \frac{P_{\text{დეფ}} \cdot f_{\Sigma}}{(K_{\text{დატ}} + \rho \cdot K_{\text{სისტ}}) \cdot P_{\text{დატ}}}, \quad (1)$$

სიდიდით [2, 3, 4]:

სადაც $K_{\text{სისტ}} = (\sum_{i=1}^n K_{\Sigma,i} \cdot P_{\Sigma,i}) / (\sum_{i=1}^n P_{\Sigma,i})$ არის მუშაობაში ჩართული გენერატორების ბრუნთა რიცხვის რეგულატორების ეკვივალენტური სიხშირული მახასიათებლის დახრილობის კოეფიციენტი;

K_{Σ} – ელექტროსისტემის ჯამური დატვირთვის სიხშირული მახასიათებლის დახრილობის კოეფიციენტი;

$\rho = (\sum_{i=1}^n P_{\Sigma,i} \cdot P_{\Sigma,i}) / (P_{\text{დატ}})^2$ – აქტიური სიმძლავრის ცხელი რეზერვის კოეფიციენტი.

ელექტროსისტემის სტრუქტურულ შემადგენლობაშია სხვადასხვა ნომინალური სიმძლავრის ელექტროგენერატორი. სისტემის მუშაობის ნორმალურ რეჟიმში მომუშავე გენერატორის დატვირთვა თითქმის მისი ნომინალური სიმძლავრის თანაზომადია $P_{\text{დატ,გენ}} \leq P_{\text{ნომ,გენ}}$. აქედან გამომდინარე, ნომინალურ სიმძლავრემდე დატვირთული გენერატორის ავარიული გამორთვა გამოიწვევს $P_{\text{დეფ}} \cong P_{\text{ნომ,გენ}}$ აქტიური სიმძლავრის დეფიციტის წარმოქმნას და სიხშირის შემცირებას

$$\Delta f = \frac{P_{\text{ნომ,გენ}} \cdot f_{\Sigma}}{(K_{\text{დატ}} + \rho \cdot K_{\text{სისტ}}) \cdot P_{\text{დატ}}} \quad (2)$$

სიდიდით [3, 4, 5]

აქედან:

$$\begin{aligned} P_{\text{ნომ,გენ}} &= \frac{\Delta f \cdot (K_{\text{დატ}} + \rho \cdot K_{\text{სისტ}}) \cdot P_{\text{დატ}}}{f_{\Sigma}} = \\ &= 2 \cdot 10^{-2} \cdot \Delta f \cdot (K_{\text{დატ}} + \rho \cdot K_{\text{სისტ}}) \cdot P_{\text{დატ}} \end{aligned}$$

ანუ პროცენტებით $P_{\text{დატვ}}$ -ის მიმართ:

$$P_{\text{ნომ.გენ.}} \% = \frac{P_{\text{ნომ.გენ.}}}{P_{\text{დატვ}}} \cdot 100 = 2 \cdot \Delta f \cdot (K_{\text{დატვ}} + \rho \cdot K_{\text{სისტ}}) \% \quad (3)$$

(3) გამოსახულების შესაბამისად:

– მიკროსიმძლავრის გენერატორად მივიჩნიოთ ის გენერატორი, რომლის მუშაობიდან ავარიულად გამორთვა გამოიწვევს სიხშირის $\Delta f \leq 0,1$ ჰერცით შემცირებას:

$$P_{\text{გენ.მიკრო}} \% \leq 0,2 \cdot (K_{\text{დატვ}} + \rho \cdot K_{\text{სისტ}}) \%$$

შევნიშნოთ, რომ სიხშირის $\Delta f \leq 0,1$ ჰერცით შემცირებისას გენერატორების ბრუნთა რიცხვის რეგულატორები არ რეაგირებს და, შესაბამისად, $\rho \cdot K_{\text{სისტ}} = 0$. ანუ:

$$P_{\text{გენ.მიკრო}} \% \leq 0,2 \cdot K_{\text{დატვ}} \%$$

– მილისიმძლავრის გენერატორად მივიჩნიოთ ის გენერატორი, რომლის მუშაობიდან ავარიულად გამორთვა გამოიწვევს სიხშირის $0,1 < \Delta f \leq 0,2$ ჰერცით შემცირებას:

$$P_{\text{გენ.მიკრო}} \% < P_{\text{გენ.მილი}} \% \leq 0,4 \cdot (K_{\text{დატვ}} + \rho \cdot K_{\text{სისტ}}) \%$$

შევნიშნოთ, რომ სიხშირის $0,1 < \Delta f \leq 0,2$ ჰერცით შემცირებისას სიხშირის რეგულირების პროცესში მონაწილეობს მხოლოდ სიხშირის წამყვანი სადგური, შესაბამისად:

$$\rho \cdot K_{\text{სისტ}} = \frac{K_{\text{მაბ.გენ.}} \cdot P_{\text{ნომ.მაბ.გენ.}}}{P_{\text{დატვ}}}$$

და გვაქვს:

$$P_{\text{გენ.მიკრო}} \% < P_{\text{გენ.მილი}} \% \leq 0,4 \cdot \left(K_{\text{დატვ}} + \frac{K_{\text{მაბ.გენ.}} \cdot P_{\text{ნომ.მაბ.გენ.}}}{P_{\text{დატვ}}} \right) \%$$

– საშუალო სიმძლავრის გენერატორად მივიჩნიოთ ის გენერატორი, რომლის მუშაობიდან ავა-

რიულად გამორთვა გამოიწვევს სიხშირის $0,2 < \Delta f \leq 0,3$ ჰერცით შემცირებას:

$$P_{\text{გენ.მილი}} \% < P_{\text{გენ.საშ.}} \% \leq 0,6 \cdot (K_{\text{დატვ}} + \rho \cdot K_{\text{სისტ}}) \%$$

– დიდი სიმძლავრის გენერატორად მივიჩნიოთ ის გენერატორი, რომლის მუშაობიდან ავარიულად გამორთვა გამოიწვევს სიხშირის $0,3 < \Delta f \leq 0,5$ ჰერცით შემცირებას:

$$P_{\text{გენ.საშ.}} \% < P_{\text{გენ.დიდი}} \% \leq (K_{\text{დატვ}} + \rho \cdot K_{\text{სისტ}}) \%$$

– ზემდგომ გენერატორად მივიჩნიოთ ის გენერატორი, რომლის მუშაობიდან ავარიულად გამორთვა გამოიწვევს სიხშირის $\Delta f > 0,5$ ჰერცით შემცირებას

$$P_{\text{გენ.ზემდ.}} \% > (K_{\text{დატვ}} + \rho \cdot K_{\text{სისტ}}) \%$$

როგორც ვხედავთ:

1. მიკრო- და მილისიმძლავრის გენერატორების ნომინალურ სიმძლავრეთა შორის საზღვარი დამოკიდებულია მხოლოდ სისტემის ჯამური დატვირთვის მახასიათებელ პარამეტრებზე ($K_{\text{დატვ}}, P_{\text{დატვ}}$):

$$P_{\text{მიკრო.მაქს.}} \% = P_{\text{მილი.მინ.}} \% = 0,2 \cdot K_{\text{დატვ}} \%$$

2. მილი- და საშუალო სიმძლავრის გენერატორების ნომინალურ სიმძლავრეთა შორის საზღვარი დამოკიდებულია, ერთი მხრივ, მაბალანსებელი გენერატორის პარამეტრებზე ($K_{\text{მაბ.გენ.}}, P_{\text{ნომ.მაბ.გენ.}}$) და, მეორე მხრივ, სისტემის ჯამური დატვირთვის მახასიათებელ პარამეტრებზე ($K_{\text{დატვ}}, P_{\text{დატვ}}$):

$$P_{\text{მილი.მაქს.}} \% = P_{\text{საშ.მინ.}} \% = 0,4 \cdot \left(K_{\text{დატვ}} + \frac{K_{\text{მაბ.გენ.}} \cdot P_{\text{ნომ.მაბ.გენ.}}}{P_{\text{დატვ}}} \right) \%$$

3. საშუალო და დიდი სიმძლავრის გენერატორების ნომინალურ სიმძლავრეთა შორის საზღვარი და, ასევე, დიდი და ზემდგომი გენერატორების

ნომინალურ სიმძლავრეთა შორის საზღვარი დამოკიდებულია, ერთი მხრივ, სიხშირის რეგულირებაში მონაწილე ყველა გენერატორის პარამეტრებზე ($K_{გენ.i}, P_{ნომ.გენ.i}$ ანუ $\rho, K_{სისტ}$) და, მეორე მხრივ, სისტემის ჯამური დატვირთვის მახასიათებელ პარამეტრებზე ($K_{დატვ}, P_{დატვ}$):

$$P_{საშ.მაქს.} \% = P_{დიდი.მინ.} \% = 0,6 \cdot (K_{დატვ} + \rho \cdot K_{სისტ}) \%$$

$$P_{დიდი.მაქს.} \% = P_{ზემმლ.მინ.} \% = (K_{დატვ} + \rho \cdot K_{სისტ}) \%$$

(1) გამოსახულების თანახმად აქტიური სიმძლავრის მოცემული დეფიციტის დროს სიხშირის გადახრა მით უფრო დიდია, რაც უფრო მცირეა სისტემის ჯამური აქტიური დატვირთვა. ამიტომ, მოცემულ ელექტროსისტემაში გენერატორების ნომინალურ სიმძლავრეთა მიხედვით კლასიფიკაცია უნდა ჩატარდეს ელექტროსისტემის მინიმალური დატვირთვის რეჟიმიდან გამომდინარე.

მინიმალური დატვირთვის რეჟიმში სისტემის გენერატორების ბრუნთა რიცხვის რეგულატორების ეკვივალენტური სიხშირული მახასიათებლისა და ჯამური დატვირთვის სიხშირული მახასიათებ-

ლის დახრილობის კოეფიციენტები შედარებით დაბალია: $K_{სისტ} \cong 8 \div 10$; $K_{დატვ} \cong 1,7 \div 1,9$. აქტიური სიმძლავრის ცხელი რეზერვის კოეფიციენტი კი შედარებით მაღალია $\rho \cong 1,15 \div 1,20$. მაშასადამე, როცა ელექტროსისტემის შესახებ არ გაგვაჩნია მკაცრად განსაზღვრული საწყისი ინფორმაცია, მაშინ გენერატორების ნომინალური სიმძლავრის მიხედვით კლასიფიკაციის თვალსაზრისით, ზემოთ მოცემულ გამოსახულებებში საანგარიშოდ შეგვიძლია მივიღოთ:

$$K_{სისტ} \cong 8 \div 10; K_{დატვ} \cong 1,7 \div 1,9; \rho \cong 1,15 \div 1,20.$$

პრაქტიკული მაგალითი. მოცემული ელექტროსისტემის ჯამური მინიმალური დატვირთვა შეადგენს $P_{დატვ.მინ} = 1200$ მგვტ-ს. ამ რეჟიმში: $K_{სისტ} = 8$; $K_{დატვ} = 1,8$; $\rho = 1,15$. სიხშირის წამყვანი გენერატორის: $P_{ნომ.მაბ.გენ} = 100$ მგვტ; $K_{მაბ.გენ} = 10$.

გამოვთვალოთ ამ ელექტროსისტემის მიკრო-, მილი-, საშუალო, დიდი სიმძლავრის და ზემოდავარი გენერატორების ნომინალური სიმძლავრე:

- $P_{გენ.მიკრო} \% \leq 0,2 \cdot K_{დატვ} \% = 0,36 \%$ ანუ $P_{გენ.მიკრო} \leq 4,32$ მგვტ;
- $P_{გენ.მიკრო} \% < P_{გენ.მილი} \% \leq 0,4 \cdot \left(K_{დატვ} + \frac{K_{მაბ.გენ} \cdot P_{ნომ.მაბ.გენ}}{P_{დატვ}} \right) \% = 1,053 \%$
 $4,32 < P_{გენ.მილი} \leq 12,64$;
- $P_{გენ.მილი} \% < P_{გენ.საშ} \% \leq 0,6 \cdot (K_{დატვ} + \rho \cdot K_{სისტ}) \% = 6,6 \%$ ანუ $12,64 < P_{გენ.საშ} \leq 79,2$ მგვტ;
- $P_{გენ.საშ} \% < P_{გენ.დიდი} \% \leq (K_{დატვ} + \rho \cdot K_{სისტ}) \% = 11 \%$ ანუ $79,2 < P_{გენ.დიდი} \leq 132$ მგვტ;
- $P_{გენ.ზემმლ} \% > (K_{დატვ} + \rho \cdot K_{სისტ}) \% = 11 \%$ ანუ
 $P_{გენ.ზემმლ} > 132$ მგვტ.

აღვნიშნოთ, რომ დიდი სიმძლავრის ელექტროსისტემებში მახალანსებელ გენერატორად ირჩევენ

შედარებით დიდი ნომინალური სიმძლავრის გენერატორს და, შესაბამისად, გენერატორების კლასიფი-

კაციისას შეიცვლება მათი ნომინალურ სიმძლავრეთა შორის საზღვრებიც. მაგალითად, თუ 1200 მგვტ მინიმალური დატვირთვის მქონე ელექტროსისტემაში ($K_{\text{დ}} = 1,8$, $P_{\text{ნომ.მაზ.გენ.}} = 100$ მგვტ, $K_{\text{მაზ.გენ.}} = 10$) მილი- და საშუალო სიმძლავრის გენერატორებს შორის საზღვარი 1,053 %-ია, 10000 მგვტ მინიმალური დატვირთვის მქონე ელექტროსისტემაში, სადაც $K_{\text{დ}} = 1,8$, $P_{\text{ნომ.მაზ.გენ.}} = 300$ მგვტ და $K_{\text{მაზ.გენ.}} = 10$, იგივე საზღვარი შეადგენს 0,84 %-ს. კერძოდ, აქ აღნიშნულ პირველ ელექტროსისტემაში 80 მგვტ ნომინალური სიმძლავრის გენერატორს ($\frac{80}{1200} \cdot 100 = 6,67 \%$) დიდი სიმძლავრის სტატუსი აქვს, ხოლო იმავე 80 მგვტ სიმძლავრის გენერატორს მეორე (უფრო მძლავრ) ელექტროსისტემაში ($\frac{80}{10000} \cdot 100 = 0,8 \%$) – მილიგენერატორის (თითქმის მიკროგენერატორი) სტატუსი. ანალოგიურად შეიცვლება სხვა საზღვრებიც.

დასკვნა

ელექტროსისტემაში ელექტროგენერატორების კლასიფიკაცია შესაძლებელია განხორციელდეს სისტემის მინიმალური დატვირთვის რეჟიმში, მოცემული $P_{\text{დ}}$ ნომინალური სიმძლავრის მქონე გენერატორის ავარიული გამორთვის შედეგად სიხშირის ნომინალურიდან გადახრის კრიტერიუმით, კონკრეტულად:

- ❖ მიკროგენერატორი: $\Delta f \leq 0,1$ ჰერცი;
- ❖ მილიგენერატორი: $0,1 < \Delta f \leq 0,2$ ჰერცი;
- ❖ საშუალო სიმძლავრისას გენერატორი: $0,2 < \Delta f \leq 0,3$ ჰერცი;
- ❖ დიდი სიმძლავრის გენერატორი: $0,3 < \Delta f \leq 0,5$ ჰერცი;
- ❖ ზემოქმედების გენერატორი: $\Delta f > 0,5$ ჰერცი.

ლიტერატურა

1. Sumereder, G. (2008). Statistical lifetime of hydro generators and failure analysis. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation N15(3), pp.678 – 685.
2. Makharadze, G. (2015). Electricity (Electric) Systems, Tbilisi: Universal, p.470.
3. Venikov, V. A., et al. (1971). Electrical Systems, Vol. 2. Electrical Networks. Ed. by V. A. Venikov. Higher School, p. 440.
4. Melnikov, N. A. (1975). Electrical networks and systems. Moscow: Energy, p. 464.
5. Markovich, I. M. (1969). Regimes of energy systems. 4th ed., revised and enlarged, Moscow: “Energy”, p.352.

UDC 621.311

SCOPUS CODE 2101

<https://doi.org/10.36073/1512-0996-2025-2-188-193>

Classification of Nominal Powers of Electric Generators

Guram Makharadze	Department of Electrical Regimes and Analytics, Georgian State Electrosystem, Georgia, 0105, Tbilisi, 2, Baratashvili str. E-mail: guram.makharadze@gse.com.ge
Tamar Jikia	Department of Electrical Regimes and Analytics, Georgian State Electrosystem, Georgia, 0105, Tbilisi, 2, Baratashvili str. E-mail: tamar.jikia@gse.com.ge
David Japaridze	Department of Electrical Regimes and Analytics, Georgian State Electrosystem, Georgia, 0105, Tbilisi, 2, Baratashvili str. E-mail: datojaparidze1995@gmail.com

Reviewers:

G. Arziani, Professor, Faculty of Power Engineering, GTU

E-mail: g.g.arziani@gmail.com

I. Gordiashvili, Associate Professor, Faculty of Power Engineering, GTU

E-mail: gordiashviliirakli02@gtu.ge

Abstract. Nowadays, classification of generators in the power system is not strictly defined. Moreover, each country and international organization has its own criteria for generator classification. The authors of this article recommend classifying electric generators into micro, milli, medium, large, and ultra-high-power categories based on the scale of the negative impact (frequency deviation from the nominal value) that occurs when a generator with a given nominal power (P_{nom}) is suddenly shut down.

Keywords: Active power; Classification; Electric generator; Frequency; Power system.

განხილვის თარიღი 06.01.2025

შემოსვლის თარიღი 28.01.2025

ხელმოწერილია დასაბეჭდად 16.06.2025