

The Protection of Generator Stator Windings by Means of Subharmonic Current Method

E.N. Huseynov¹, R.M. Abbasov², F.H. Huseynov²

¹*Azerbaijan State Oil and Industry University (Azadlig ave. 16/21, Baku, AZ1010, Azerbaijan)*

²*Azerbaijan National Aviation Academy (Mardakan ave. 30, Baku, AZ1045, Azerbaijan)*

For correspondence:

Huseynov Farid / e-mail: huseynovferid17525257@gmail.com

Abstract

The article examines the subharmonic current method that protects the stator winding of the generator from ground faults. In the protection scheme based on the subharmonic current, the criteria of the subharmonic current angle ensure the high sensitivity of the relay protection. In modern microprocessor-based relay protection systems, more reliable and stable protection can be ensured by taking into account subharmonic currents.

Keywords: generator protection, stator winding, subharmonic currents, short circuits.

DOI: 10.52171/2076-0515_2023_15_04_70_76

Received 11.04.2023

Revised 13.12.2023

Accepted 20.12.2023

For citation:

Huseynov E.N., Abbasov R.M., Huseynov F.H.

[The Protection of Generator Stator Windings by Means of Subharmonic Current Method]

Herald of the Azerbaijan Engineering Academy, 2023, vol. 15, no. 4, pp. 70-76 (in Azerbaijani)

Subharmonik cərəyanlar metodu vasitəsilə generatorun stator dolağının mühafizəsinin qurulması

E.N. Hüseynov¹, R.M. Abbasov², F.H. Hüseynov²

¹Azərbaycan Dövlət Neft və Sənaye Universiteti (Azadlıq pr. 16/21, Bakı, AZ1010, Azərbaycan)

²Azərbaycan Milli Aviasiya Akademiyası (Mərdəkan pr. 30, Bakı, AZ1045, Azərbaycan)

Yazışma üçün:

Hüseynov Fərid / e-mail: huseynovferid17525257@gmail.com

Xülasə

Məqalədə generatorun stator dolağını yerlə qapanmalardan mühafizə edən subharmonik cərəyan metodundan bəhs edilir. Subharmonik cərəyan əsasında qurulmuş mühafizə sxemində subharmonik cərəyan bucağının meyarları rele mühafizəsinin yüksək həssaslığını təmin edir. Müasir mikroprosessorlu rele mühafizəsi sistemlərində subharmonik cərəyanların nəzərə alınmasıyla daha etibarlı və dayanıqlı mühafizəni təmin etmək olar.

Açar sözlər: generatorun mühafizəsi, stator dolağı, subharmonik cərəyanlar, qısa qapanmalar.

DOI 10.52171/2076-0515_2023_15_04_70_76

УДК 621.316

Защита обмоток статора генератора методом субгармонических токов

Е.Н. Гусейнов¹, Р.М. Аббасов², Ф.Х. Гусейнов²

¹Азербайджанский государственный университет нефти и промышленности (пр. Азадлыг, 16/21, Баку, AZ1010, Азербайджан)

²Азербайджанская Национальная авиационная академия (пр. Мардакян, 30, Баку, AZ1045, Азербайджан)

Для переписки:

Гусейнов Фарид / e-mail: huseynovferid17525257@gmail.com

Аннотация

В статье рассматривается метод субгармонических токов, защищающий обмотку статора генератора от замыканий на землю. В схеме защиты по субгармоническому току критерии угла субгармонического тока обеспечивают высокую чувствительность релейной защиты. В современных микропроцессорных системах релейной защиты более надежная и устойчивая защита может быть обеспечена за счет учета субгармонических токов.

Ключевые слова: защита генератора, обмотка статора, субгармонические токи, короткие замыкания.

Giriş

Elektrik enerjisini istehsal edən stansiyalarda istismar olunan generatorlarda müxtəlif növ zədələnmələr və qeyri-normal rejimlər əmələ gələ bilər. Generatorun stator və rotor dolağlarında baş verə biləcək zədələnmələri aşağıdakı növlərə ayırmaq olar: generatorun stator dolağında fazalararası qısa qapanmalar; generatorun stator dolağının bir fazasında sargılararası qapanması; neytralı torpaqlanmış generatorunda stator dolağının bir fazasının yerlə və ya gövdə ilə qapanması; generatorun rotor dolağının bir və iki nöqtədə yerlə qapanması. Generatorun qeyri-normal rejimlərinə isə aşağıdakılar aiddir: xarici qısa qapanmalar zamanı generatordan ifrat cərəyanın keçməsi; simmetrik və qeyri-simmetrik artıq yüklənmələr.

Qeyd edildiyi kimi, qısa qapanmanın baş verdiyi halda generator rele mühafizəsi və sistem avtomatıkası tərəfindən mümkün qədər tez şəbəkədən açılmalıdır. Qeyri-normal rejimlərin yaranması halında mühafizə qurğusu xəbərdar edici signala işləməlidir ki, texniki personal tərəfindən normal iş rejiminin bərpa olunması üçün lazımi tədbirlər görülsün [1, 3-5].

Məsələnin qoyuluşu

Böyük güclü generatorların bir fazasının yerlə qapanması zədələnmənin inkişafına və maşının daha ağır zədələnməsinə səbəb olur. Ənənəvi sıfır ardıcılıqlı cərəyan mühafizələrinin çatışmayan cəhəti ondan ibarətdir ki, qısa qapanmanın neytrala yaxın nöqtəsində baş verdiyi halda qapanmış sargıların sayı kiçik olur, bu da mühafizə tərəfindən əhatə olunmayan qeyri-həssas ("ölü") zonasının əmələ gəlməsinə gətirib çıxarır. Bu problemi aradan qaldırmaq üçün subharmonik cərəyanlar metodundan istifadə olunur.

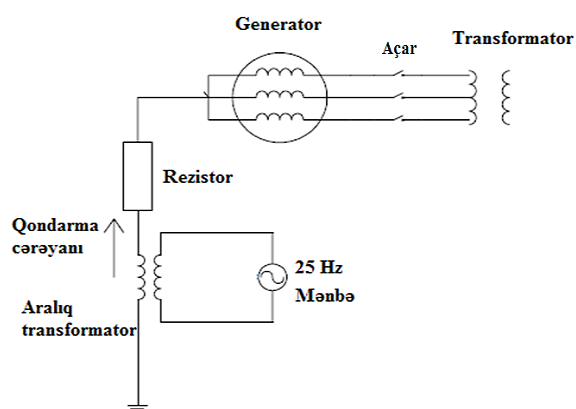
Məsələnin həlli

Subharmonik gərginlik (adətən 25 Hs tezliyində) generatorun torpaqlama elementi (rezistor, paylayıcı transformator və ya reaktor) ilə yer arasındakı aralıq transformatoru vasitəsilə ötürülür. Mühafizənin iş prinsipi statorun yerlə qapanması zamanı ötürülən subharmonik cərəyanın ölçülməsinə əsaslanır. Qəza baş verən andan statorla yer arasında tam müqavimət dəyişdiyindən subharmonik mühafizə sxemi subharmonik cərəyanın bu dəyişməsinə aşkar edir, generatorun açılmasına signal verir.

Normal rejimdə ötürülən subharmonik cərəyan yerlə olan müqavimətlə (rezistor, reaktor və s) məhdudlaşdırılır. Bu halda stator dolağının induktivliyi kiçik olduğuna görə nəzərə alınmır.

Yerlə qısa qapanma baş verdikdə, qapanma müqaviməti ekvivalent tutum müqaviməti ilə paralel olaraq qoşulur. Beləliklə, subharmonik cərəyanın məhdudlaşdıran tam müqavimət azalır, bu da cərəyanın artmasına gətirib çıxarır. Beləliklə, sxemin iş prinsipi subharmonik cərəyanın bu dəyişmələrinə əsaslanır (şəkil 1).

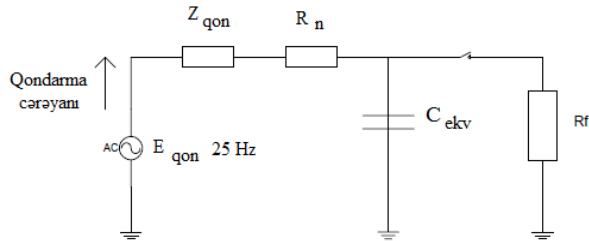
Subharmonik signalının tezliyi 25 Hs olduğuna görə statorun tutum müqavimətini artır, bu da sxemin həssaslığının artırılmasına gətirib çıxarır.



Şəkil 1 – Subharmonik cərəyanlar metodu əsasında işləyən sxem

Figure 1 – The scheme works on the basis of the method of subharmonic currents

Neytralı effektiv torpaqlanması ilə işləyən generatoru torpaqlamaq üçün rezistordan istifadə olunur. Subharmonik gərginlik torpaqlama rezistoru ilə yer arasında yerləşən aralıq transformatoru vasitəsilə ötürülür. Ötürülən cərəyan transformatorun ikinci tərəf dolağında ölçülür [2-6].



Şəkil 2 – Sadələşdirilmiş ekvivalent sxemi
Figure 2 – Simplified equivalent circuit

Aralıq transformatoru və ötürülmə dövrəsinin bütün elementləri (signal kontrollerləri, test dövrələri və s.) tam qondarma müqaviməti ilə əvəz olunacaqdır ($Z_{qon} = R_{qon} + jX_{qon}$). Ona görə də 25 Hz tezlikli gərginlik mənbəyi (E_{qon}) transformasiya əmsalından istifadə etməklə transformatorun generator tərəfinə keçirilir. Subharmonik mənbəyin daxili müqaviməti də həmçinin transformatorun generator tərəfinə keçəcək və tam qondarma müqavimətinə daxil ediləcək (Z_{qon}). Şəkil 2-də generatorun və sistemin ekvivalent sxemi göstərilibdir. Burada $C_{ekv} = 2.035 \text{ mF}$ – sistemin ekviva-

lent tutumu; $Z_{qon} = 36 + j125$ – tam qondarma müqaviməti; $E'_{qon} = 56 \text{ V}$ – subharmonik qondarma EQ-si; R_n – neytralın aktiv müqaviməti; R_f – qısa qapanma müqaviməti.

Öncəliklə qəza olmadığı normal iş rejimində subharmonik cərəyana baxaq.

$$I = \frac{E_{qon}}{Z_{qon} + R_n + Z_{cekv}}$$

Ötürülmə dövrəsinin müqavimətinin, torpaqlama rezistoru və torpaqla cəm tutumun qiymətləri məlum olduqda qəza olmayan hal üçün cərəyanın qiymətini tapmaq mümkündür.

$$I_{norm} = 0.0088e^{j78^\circ}$$

Qəza olmayan halda yerlə tutum müqaviməti çox böyük olduğundan cərəyan çox kiçikdir. Bu böyük tutumun təsirindən həmin cərəyanın bucağı 90° -yə yaxındır. Yerlə qapanma baş verdikdə subharmonik cərəyanı məhdudlaşdıran müqavimət dəyişir. Nəticədə subharmonik cərəyan iki cərəyana bölünür: kondensatordan axan cərəyan və qəza müqavimətində axan cərəyana. 2-ci tənlik qəza prosesində cəm subharmonik cərəyanı ifadə edir.

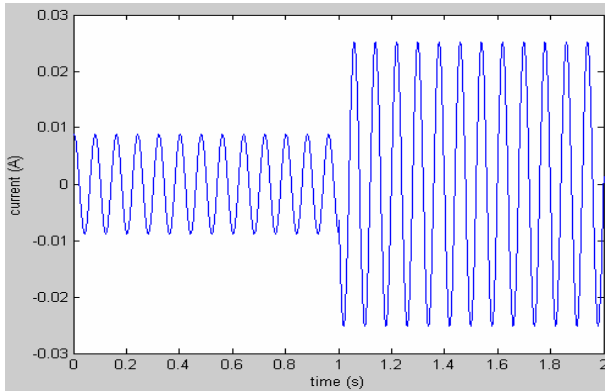
$$I_{qap} = I_c + I_{Rf} = \frac{E_{qon}}{Z_{qon} + R_n + \frac{Z_{cekv}R_f}{Z_{cekv} + R_f}}$$

Məlum olan qiymətləri yerinə qoyub hesablasaq:

$$I_{qap} = \frac{56}{1248 + \frac{39150049R_f}{R_f^2 + 39150049} + j \left(26 - \frac{6257R_f^2}{R_f^2 - \frac{6257R_f^2}{R_f^2 + 39150049}} \right)}$$

Qəza cərəyanı qəza müqavimətindən asılıdır. Subharmonik cərəyanın qiymətlərini analiz etmək üçün MATLAB proqramından istifadə olunur.

Öncəliklə qısa qapanma müqaviməti $R_f = 1 \text{ k}\Omega$ olduğunu qəbul edək və subharmonik cərəyanda nə baş verdiyinə baxaq (şəkil 3).



Şəkil 3 – Subharmonik cərəyanın dəyişməsi
Figure 3 – Subharmonic current variation

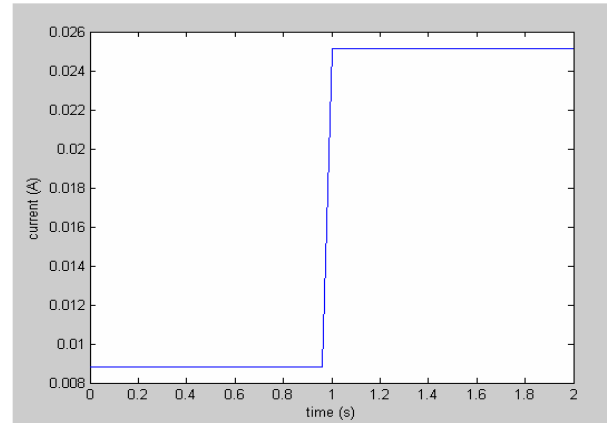
Birinci görə biləcəyimiz budur ki, $t=1$ san-də subharmonik cərəyan qəflətən dəyişir. Birinci saniyə ərzində cərəyanın qiyməti 9 mA-ə yaxın olur, lakin $t=1$ san-dən sonra cərəyanın qiyməti təxminən 25 mA-ə qədər artır. Göründüyü kimi, statorun yerlə qapanması baş verdikdə cərəyan öz qiymətini dəyişir. Üstəlik, əgər cərəyanın əyrisinə diqqətlə baxsaq görürük ki, $t=1$ san ətrafında yerlə qapanma qəzası baş verdikdə cərəyanın həmçinin bucağı da dəyişir. Beləliklə, bütün bunlardan alınır ki, statorun yerlə qapanması baş verdikdə subharmonik cərəyan həm qiymət həm faza baxımından dəyişir (şəkil 4 və 5). Göründüyü kimi, qısa qapanma cərəyanı normal rejimdəki cərəyandan həmişə böyükdür (0-dan 12 kOm-a qədər).

Həmçinin bunu da görmək olur ki, qısa qapanma cərəyanının qiyməti qəza müqaviməti artdıqca azalır. R_f 8 kOm-dan böyük olduqda qısa qapanma və normal rejimdəki cərəyanlar arasındakı fərq çox kiçikdir. Bir anlıq, $R_f = 8$ kOm olduqda subharmonik cərəyan 9.7 mA olur, bu isə o deməkdir ki, qəza və qəza olmayan hallar arasındakı cərəyan fərqi cəmi 0.9 mA olur. Qəza cərəyanını qəza olmayan haldakı cərəyana bərabərləşdirən qəza aktiv

müqaviməti aşağıdakı tənlikdən istifadə etməklə tapıla bilər.

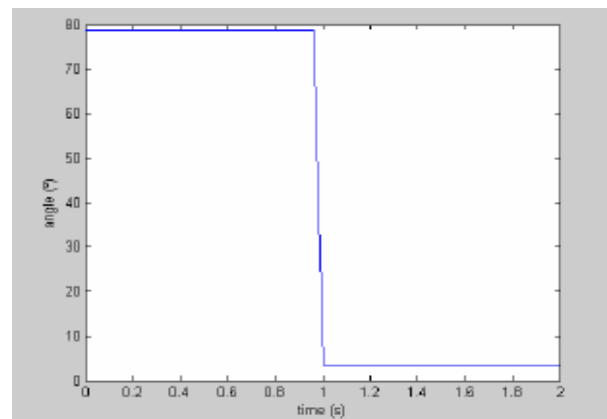
$$I_q = 0.0088 \text{ A} \rightarrow R_f = 15.9 \text{ kOm}$$

15.9 kOm-dan daha yüksək qəza müqavimətləri üçün qısa qapanma cərəyanının qiyməti qəza olmayan haldakı cərəyanın qiymətindən kiçikdir. Ona görə də yüksək müqavimətli qəzalar üçün başqa bir metod tapılmalıdır. Şəkil 7-də qısa qapanma müqaviməti 0-dan 12 kOm-a qədər dəyişdikdə cərəyanın bucağının dəyişməsi göstərilmişdir.

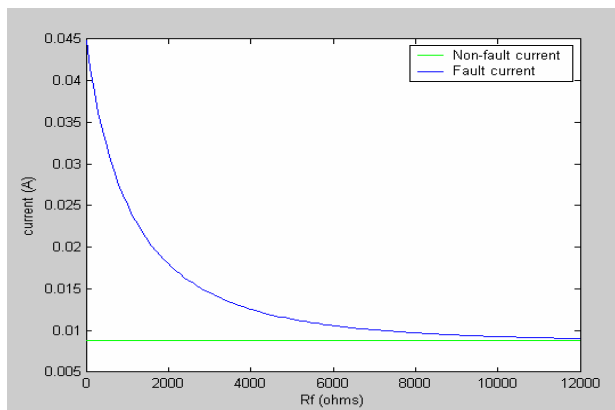


Şəkil 4 – Subharmonik cərəyanın amplitudasının dəyişməsi

Figure 4 – Variation of the amplitude of the subharmonic current

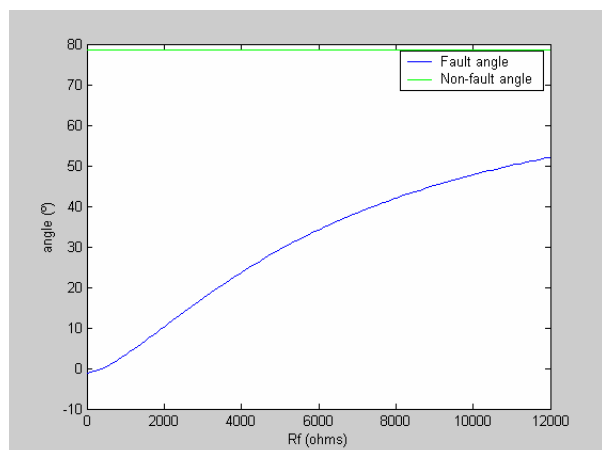


Şəkil 5 – Subharmonik cərəyanın fazasının dəyişməsi
Figure 5 – Variation of the phase of subharmonic current



Şəkil 6 – Subharmonik cərəyanın amplitudasının qısa qapanma müqavimətinin qiymətindən asılılığı

Figure 6 – Dependence of the amplitude of the subharmonic current on the value of the short-circuit resistance



Şəkil 7 – Subharmonik cərəyanın fazasının qısa qapanma müqavimətinin qiymətindən asılılığı

Figure 7 – Dependence of the phase of the subharmonic current on the value of the short-circuit resistance

Göründüyü kimi, subharmonik cərəyanın fazası həmişə qəza olmayan haldakı cərəyanın bucağından kiçikdir. Həmçinin qəza müqaviməti artdıqca subharmonik cərəyanının fazası artır. $R_f=12$ kOm olduqda cərəyanının bucağı 52.07° olur, bu isə o deməkdir ki, qəza və qəza olmayan hallar üçün cərəyanlar fazalararası fərqi $78.67-52.07=26.6^\circ$. Bu fazalar fərqi signal emalı qurğu tərəfindən asanlıqla aşkar oluna bilər və bu isə o deməkdir ki, subharmonik cərəyanın bucağının tapılması qiymətinin tapılmasından həssaslığa

görə daha əlverişlidir [3, 7-11].

Qəza müqavimətlərin müxtəlif qiymətlər üçün aparılmış hesablamaların nəticələri cədvəl 2-də göstərilmişdir. Göründüyü kimi, qəza müqaviməti 30 kOm olduğu halda subharmonik cərəyanın fazası 67.29° olur. Yəni, qəza olmayan haldakı cərəyan fazası ilə fərqi 11.38° -dir. Həmçinin bu qiymət də mühafizə sistemi tərəfindən heç bir problem olmadan aşkar oluna bilər. Beləliklə, subharmonik mühafizə sxemi statorun yerlə qapanma qəzasını subharmonik ötürülən gərginliyin yaratdığı cərəyanın dəyişməsilə aşkar edə bilər.

Cədvəl 1 – Müxtəlif qısa qapanma müqavimətlərinə uyğun olan subharmonik cərəyanın fazaları

Table 1 – Phases of subharmonic current corresponding to different short-circuit resistances

Qəza müqaviməti (Om)	Bucaq ($^\circ$)
≈ 0	-1.1933
2000	10.254
4000	23.642
6000	34.192
8000	41.99
10000	47.746
12000	52.074
14000	55.408
16000	58.036
18000	60.151
20000	61.886
22000	63.332
24000	64.554
26000	65.598
28000	66.502
30000	67.29

Bir tərəfdən əgər sxem qiymət dəyişməsindən istifadə etsə statorun yerlə qapanması yalnız müəyyən qəza müqavimətində aşkar oluna bilər. Yüksək müqavimətli qəzalar üçün, qəza olmayan və olan hallardakı cərəyanın qiymət dəyişməsi kifayət qədər böyük olmur ki, bu da sxemin həssaslıq probleminə gətirib çıxarır.

Digər tərəfdən əgər sxem cərəyanın bucaq dəyişməsindən istifadə etsə hətta çox yüksək qəza müqavimətlərində belə statorun yerlə qapanması aşkar oluna bilər. Simulyasiyalar göstərir ki, 30 kOm qəza müqavimətləri müəyyən oluna bilər.

Nəticə

Beləliklə, generatorun stator dolağını yerlə qısa qapanmalardan mühafizə edən subharmonik cərəyanlar metodunu tətbiq etməklə aşağıdakı nəticələri alırıq:

Subharmonik cərəyanlar metodu generatorun stator dolağının 100% mühafzəsini təmin

edir. Rele mühafizəsinin qoyulmuş parametrlərinin subharmonik cərəyanın amplitud qiymətinə görə deyil, subharmonik cərəyanın fazasına görə sazlanmalıdır.

Subharmonik cərəyanlar metodu generatorun stator dolaqlarını müqaviməti $R_f=30$ kOm qədər olan qısa qapanmalardan mühafizə edir.

Maraqlar münaqişəsi

Müəlliflər bu məqalədə araşdırılması tələb olunan maraqlar münaqişəsinin olmadığını qeyd edirlər.

REFERENCES

1. **Tai, NengLing et al.** (2000), Research subharmonic injection schemes for hydrogenerator stator ground protection, 2000 IEEE, pp.1928-1932. *(in English)*
2. **Sirota I.M., Shapoval A.P., Bogachenko A.E., Dovbnya G.N.** Zashchita ot zamykanij na zemlyu obmotki statora blochnyh generatorov. Elektricheskie stancii, 2009, №4. s.62-65. *(in Russian)*
3. **Pope, J.W.** A comparison of 100% stator ground fault protection schemes for generator stator windings, IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, Vol. PAS-103, No.4, April 2004, pp. 832-840. *(in English)*
4. **Badri Ram and Vishwakarma D.N.** Power System Protection and Switchgear, 2nd edition, Tata McGraw Hill Education Pvt. Ltd., New Delhi. 2017, 684 p. *(in English)*
5. **Balametov A.B., Halilov E.D.** Primenenie kombinirovannyh uravnenij ustanovivshegosya rezhima i teplovogo balansa dlya modelirovaniya rezhimov elektricheskix setej. Vestnik Azerbajdzhanskoj Inzhenernoj Akademii, Tom 11. № 2, 2019, c. 93-103. *(in Russian)*
6. **Tavner P., Ran L., Penman J., and Sedding H.** Condition Monitoring of Rotating Electrical Machines. 2nd ed. The Institution of Engineering and Technology, London, UK, 2008. *(in English)*
7. **Tierney D., Kasztenny B., Finney D., Haas D., and Lee B.** "Performance of Generator Protection Relays During Off-Nominal Frequency Operation," proceedings of the 67th Annual Conference for Protective Relay Engineers, College Station, TX, March 2014. *(in English)*
8. **Soñez P., Vicentini F., Skendzic V., Donolo M., Patel S., Xia Y., and Scharlach R.C.** "Injection-Based Generator Stator Ground Protection Advancements," proceedings of the 41st Annual Western Protective Relay Conference, Spokane, WA, October 2014. *(in English)*
9. **Koepl G. and Braun D.** "New Aspects for Neutral Grounding of Generators Considering Intermittent Faults", CIDEF 2010, Sept. 2010. *(in English)*
10. **Klingerman N., Wright L., Cockerham B.** "Field Experience with Detecting an Arcing Ground Fault on a Generator Neutral Point", 42nd Annual Western Protective Relay Conference, October 2015. *(in English)*
11. **Safari-Shad N. and Franklin R.** "Adaptive 100% Stator Ground Fault Protection Based on Third-Harmonic Differential Voltage Scheme," in IEEE Transactions on Power Delivery, vol. 31, no. 4, Aug. 2016, pp. 1429-1436. *(in English)*