

ЛОБОДА ЮРІЙ

Вінницький національний технічний університет

<https://orcid.org/0000-0002-5397-4656>e-mail: lobodaeseem@gmail.com

СЛОБОДЯН РУСЛАН

Вінницький національний технічний університет

<https://orcid.org/0000-0001-6355-2337>e-mail: [ruslan.slobodyan@gmail.com](mailto:rusan.slobodyan@gmail.com)

ЗАСТОСУВАННЯ SOFT OPEN POINT ДЛЯ ОПТИМІЗАЦІЇ ВТРАТ ЕЛЕКТРОЕНЕРГІЇ В РОЗПОДІЛЬНИХ ЕЛЕКТРИЧНИХ МЕРЕЖАХ

В статті проведено аналіз залежності втрат електроенергії від режиму роботи SOP та визначено закономірності оптимізації режиму його функціонування за критерієм мінімуму втрат електроенергії. Також запропоновано стратегія управління, яка базується на зрівноваженні дійсних та уявних складових напруги між вузлами встановлення SOP.

Ключові слова: Soft Open Point, електричні мережі, втрати електроенергії.

LOBODA YURIY, SLOBODIAN RUSLAN

Vinnytsia National Technical University

APPLICATION OF SOFT OPEN POINT FOR OPTIMIZATION OF ELECTRICITY LOSSES IN DISTRIBUTION NETWORKS

The increase in consumer load and the introduction of renewable energy sources lead to the need for reconstruction or modernization of distribution electrical networks. In global practice, unified devices based on modern power electronics are increasingly being used. This equipment is expensive, but in recent years in Ukraine the cost of electricity has increased significantly, which ensures the technical and economic efficiency of installing these devices. One such device is the Soft Open Point (SOP), which is used in distribution networks to reduce electrical energy consumption by compensating reactive power and redistributing active power in adjacent feeders. The article analyzes the dependence of electricity consumption on the mode of operation of the SOP and determines the regularities of optimizing the mode of its operation according to the criterion of minimum electricity consumption. A calculation was made based on real data of F-33 and F-45 of Khmelnytskyi REM using a typical daily load schedule of household consumers, which showed a reduction of active electricity losses by 14.2%. We also offer a control strategy based on balanced real and apparent component voltages between nodes of the installed SOP. The results of the control strategy were verified according to the steady-state calculation of the network with fixed loads. Then, before analyzing the results, the reduction of annual electricity costs due to the placement of the SOP was calculated, and its useful life was calculated, which is 8 years, and when the load is tripled, the useful life decreases to 2.8 years. The obtained results substantiate the possibility of abandoning the SOP, in order to optimize electricity losses, in the distribution power networks of Ukraine.

Keywords: Soft Open Points, electrical networks, power losses.

Постановка проблеми

У зв'язку із зростанням навантажень та активним впровадженням відновлюваних джерел енергії в розподільних електричних мережах, виникає необхідність у реконструкції та модернізації існуючих систем. Все частіше в світовій практиці для оптимізації роботи розподільних електричних мереж використовують Soft Open Point (SOP), тому розробка принципів їх керування є актуальною задачею.

Метою роботи є обґрунтування використання SOP в мережах операторів систем розподілу та визначення оптимальних режимів їх роботи за критерієм мінімуму втрат електроенергії та мінімальних відхилень напруги, а також розробка принципів їх керування.

Аналіз останніх джерел

Soft Open Point (SOP) – це силові електронні пристрої, які встановлюють паралельно до нормально відкритих контактів секційних роз'єднувачів між двома фідерами розподільної електричної мережі. Вони здатні забезпечувати перерозподіл активної потужності між фідерами, компенсацію реактивної потужності в кожному з фідерів, тим самим, здійснюючи регулювання напруги за нормальних умов роботи мережі, а також швидко ізоляцію несправності та відновлення електропостачання після усунення пошкодження [1-3]. Вибір місць для розміщення SOP розглянуто в багатьох працях, наприклад [4-7].

Схема приєднання SOP між двома фідерами показана на рис. 1. SOP виконано з використанням двох інверторів напруги, що приєднані через реактори і (або) трансформатори до відкритих точок мережі, зі спільним конденсатором в колі постійного струму. В нормальному режимі SOP виконує регулювання трьома параметрами: реактивними потужностями, що генеруються або споживаються SOP наприкінці першого та другого фідерів, відповідно, Q_1 , Q_2 , та перерозподілом активної потужності між фідерами P .

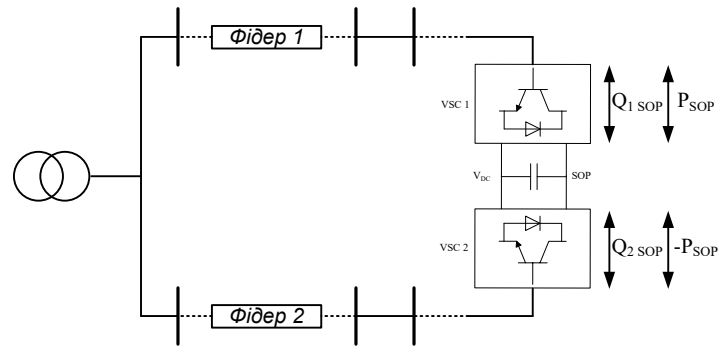


Рис. 1. Схема присіднання SOP між двома фідерами

Результати досліджень

Для аналізу використання SOP було розглянуто схему (рис. 2) частини мережі 10 кВ, що складається з фідерів Ф-33 та Ф-45 Хмельницького РЕМ. Встановлення SOP виконано паралельно нормально розімкненому лінійному роз'єднувачу №131.

Для розрахунку оптимальних потужностей SOP побудуємо функцію залежності втрат активної потужності від трьох параметрів SOP: Q_1 , Q_2 , P , де Q_1 , Q_2 – ін'єкції реактивної потужності відповідно в вузол 32 та 51, P – активна потужність, що перерозподіляється за допомогою SOP між вузлами 32 та 51.

Відповідно до вузлового рівняння в матричній формі функція втрат активної потужності в залежності від режиму роботи SOP має такий вигляд:

$$\Delta P = \sqrt{3} \cdot \text{Re} \left[U_{\Delta}^T \cdot \hat{J} \right], \tag{1}$$

де $U_{\Delta} = Y^{-1} J$ – вектор комплексних напруг вузлів відносно балансувального вузла; J – вектор комплексних спряжених струмів вузлових навантажень; $J = -\hat{S} / \sqrt{3} U_{\text{ном}}$ – вектор комплексних струмів вузлових навантажень; \hat{S} – вектор комплексних спряжених потужностей вузлових навантажень. Вектори в (1) є функціями від параметрів Q_1 , Q_2 , P .

Графіки втрат активної потужності в залежності від регульованих параметрів SOP зображено на рис. 3. Їх побудовано для максимального режиму потужностей навантажень на початку фідерів: $S_{F-33} = 742 + j 299,5$ кВ·А та $S_{F-45} = 371 + j 149,7$ кВ·А.

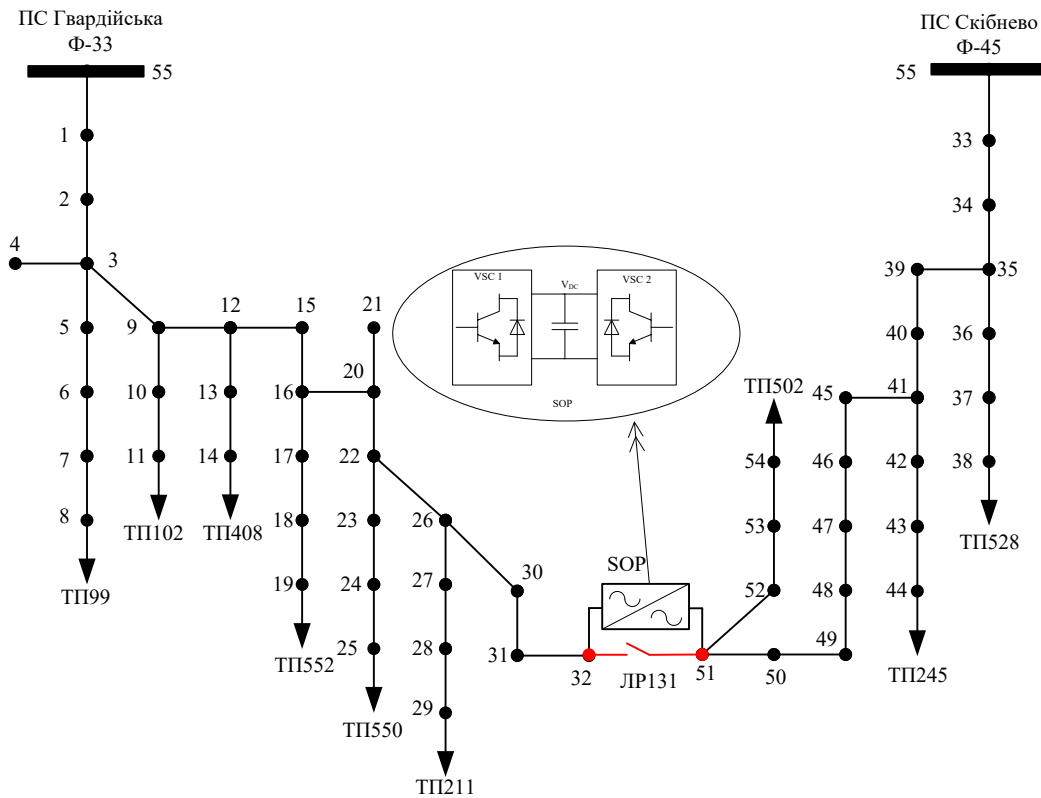


Рис. 2. Схема присіднання SOP між Ф-33 та Ф-45

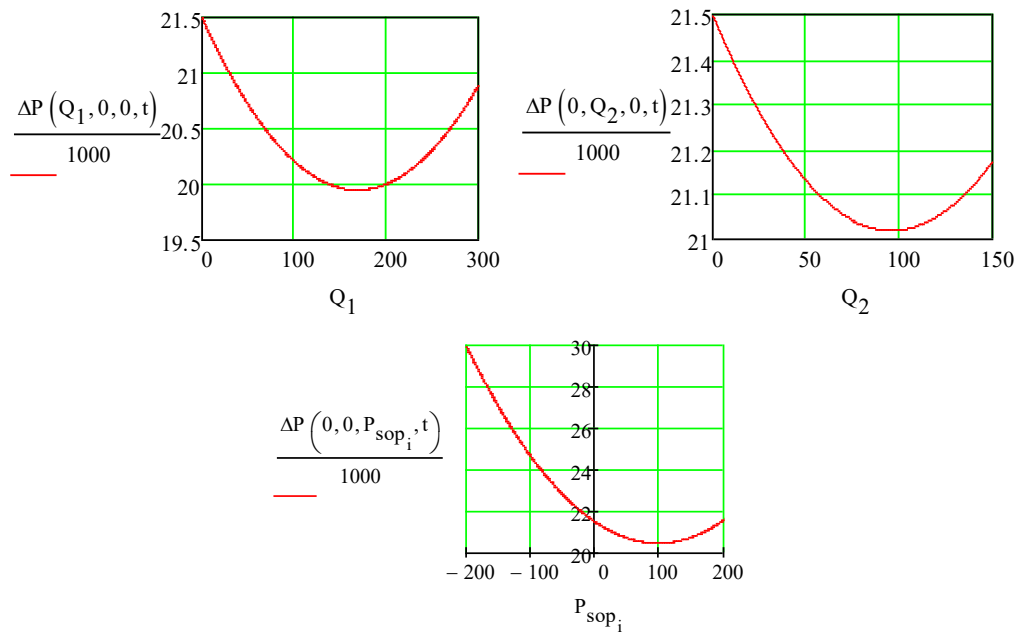


Рис. 3. Залежності втрат активної потужності від режиму роботи SOP

Зменшення втрат в режимі максимального навантаження складає 3 кВт. Оптимальні значення комплексних потужностей для мінімізації втрат складають $S_1=97 + j 148$ кВ·А та $S_2=-97 + j 95$ кВ·А.

Для знаходження річної економії розглянемо режими роботи SOP відповідно до типового графіка електричних навантажень комунально-побутових споживачів який зображено на рис. 4.

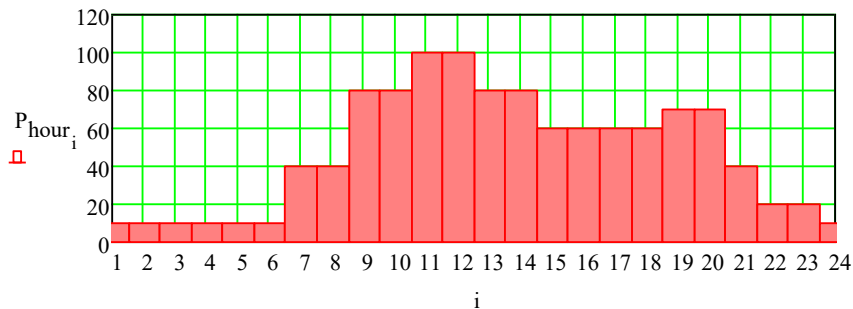


Рис. 4. Графік споживання комунально-побутових споживачів

Зменшення втрат електроенергії відповідно до добового графіка навантажень наведено в табл. 1.

Таблиця 1

Зменшення втрат в залежності від добового графіка навантажень

Часовий інтервал	$S_1, \text{кВ}\cdot\text{А}$	$S_2, \text{кВ}\cdot\text{А}$	$\Delta P, \text{кВт}$ (без SOP)	$\Delta P, \text{кВт}$ (з SOP)	Зменшення втрат $\partial P, \text{кВт}$
1-6	$9.526+16.64i$	$-9.526+9.137i$	0.215	0.185	0.03
7-8	$39+67i$	$-39+38i$	3.44	2.952	0.487
9-10	$78+134.119i$	$-78+76.094i$	13.758	11.809	1.949
11-12	$97.26+168i$	$-97.26+95.368i$	21.497	18.451	3.046
13-14	$78+134.119i$	$-78+76.094i$	13.758	11.809	1.949
15-18	$58.156+100.839i$	$-58.156+57i$	7.739	6.642	1.096
19-20	$68+117.479i$	$-68+66.957i$	10.534	9.041	1.492
21	$39+67i$	$-39+38i$	3.44	2.952	0.487
22-23	$19.052+33.28i$	$-19.052+19i$	0.86	0.738	0.122
24	$9.526+16.64i$	$-9.526+9.137i$	0.215	0.185	0.03
Загалом					23,171

Отже, зменшення втрат електроенергії при використанні SOP буде приблизно 23 кВт·год/добу, що становить 14,2%.

Питома вартість пристроїв SOP приблизно становить 60 доларів за 1 кВт·А потужності. Максимальна потужність SOP складає $|97.26+168i| = 194$ кВт·А. Вартість пристрою становить 11,65 тис. дол., що еквівалентно 454 тис. грн. Відповідно до даних оператора системи розподілу [8] вартість електричної енергії для побутових споживачів 2-го класу напруги становить 6,45 грн./кВт·год. При застосуванні даних показників термін окупності SOP на даних ділянках мережі становить 8,2 роки. Але варто зазначити, що дані ЛЕП несуть досить незначне навантаження і при збільшенні навантаження фідерів, принаймні втричі, термін окупності зменшиться до 2,8 роки.

Також SOP позитивно впливає на напругу вузлів навантаження. На рис. 5 зображено значення напруги вузлів в максимальному режимі з використанням SOP та без нього.

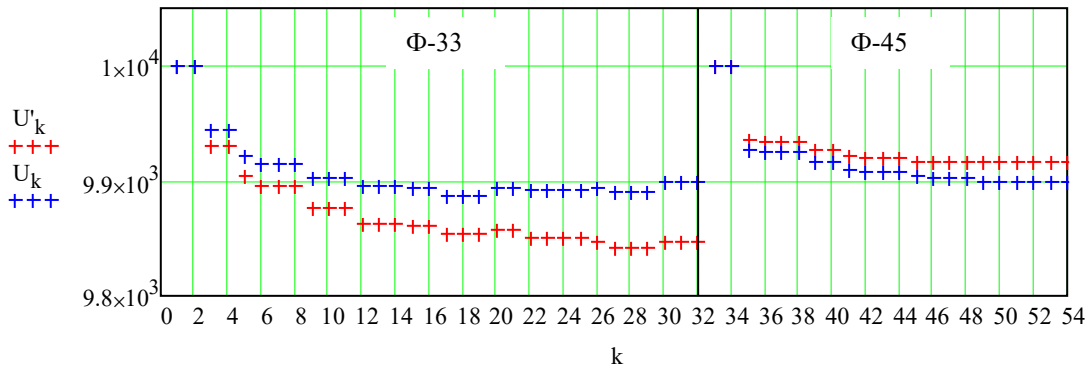


Рис. 5. Значення напруг у вузлах мережі з SOP (U_k) та без нього (U'_k)

З рис. 5 видно, що мінімальне значення напруги Ф-33 спостерігається у вузлі 29 і становить 9842 В, а в Ф-45 – у вузлі 54 – 9917 В. За рахунок генерування реактивної та перерозподілу активної потужності між фідерами, мінімальне значення напруги для Ф-33 у вузлі 29 становить 9890 В, а для Ф-45 у вузлі 54 – 9890 В.

В процесі регулювання параметрів SOP напруги наприкінці фідерів зрівнюються, при цьому мінімальне значення напруги збільшується. Це може бути використано як критерій оптимізації параметрів SOP.

В табл. 2 наведені результати розрахунку зменшення різниці напруг $\Delta U = U_1 - U_2$ наприкінці фідерів (у вузлах 32 та 51) в процесі регулювання параметрів SOP.

Таблиця 2

Зменшення різниці напруг наприкінці фідерів як функція параметрів SOP

Q_1 , кВАр	Q_2 , кВАр	P , кВт	U_1 , В	U_2 , В	ΔU , В
0	0	0	9847-0,4i	9917-0,2i	-70-0,2i
100	0	0	9860-32i	9917-0,2i	-57-31,8i
0	100	0	9847-0,4i	9929-30,4i	-82+30i
0	0	100	9878+12,5i	9887-12,5i	-9+25i
100	0	100	9891-19,1i	9887-12,5i	4-6,6i
150	70	100	9898-34,9i	9895-33,6i	3-1,3i

Що стосується регулювання перетоку активної потужності, то в цьому випадку використовують рівність дійсних частин напруг на сусідніх фідерах в точках встановлення SOP. Аналогічно, для регулювання реактивної потужності на сусідніх фідерах можна використовувати рівність уявних складових цих напруг. Якщо синхронізація напруг, які вимірюються в точках встановлення SOP, здійснюється за напругою джерела живлення, то функціонально система керування описується такими залежностями:

$$P = f(\operatorname{Re} \Delta U), Q_1 = f(\operatorname{Im} U_1), Q_2 = f(\operatorname{Im} U_2) \text{ при } \Delta U \rightarrow \min; \min \{|U_1|, |U_2|\} \rightarrow \max. \quad (2)$$

У разі синхронізації за однією з напруг, наприклад U_1 , значення ΔU не змінюються. Другим інформативним параметром може виступати модуль напруги U_1 :

$$P = f(|U_1|); Q_1, Q_2 = f(\Delta U \rightarrow \min; \min \{|U_1|, |U_2|\} \rightarrow \max). \quad (3)$$

Однак керування у такому випадку значно ускладнюється.

Ще один підхід до визначення оптимальних значень реактивної потужності, яку має генерувати SOP у вузлі k у випадку однорідної електричної мережі полягає у їх визначенні за формулою:

$$Q_k = \operatorname{Im} \left(\frac{\dot{U}_{\Delta k}}{Z_{kk}} U_{\text{ном}} \right), \quad (4)$$

де $\dot{U}_{\Delta k}$ – комплексна напруга вузла k відносно вузла живлення; Z_{kk} – власний комплексний опір вузла k (елемент матриці вузлових опорів).

У цьому випадку необхідно здійснювати вимірювання напруг одночасно на початку і наприкінці фідерів, що істотно ускладнює систему керування.

У разі неоднорідної мережі оптимальне значення реактивної потужності зміщується, що вимагає додаткового дослідження стосовно введення поправки.

Висновки з даного дослідження і перспективи подальших розвідок у даному напрямі

В даній статті проаналізовано застосування SOP в мережах 10 кВ операторів систем розподілу для зменшення втрат електроенергії. Розрахунок на реальних даних Ф-33 та Ф-45 Хмельницького РЕМ показав, що застосування SOP призводить до зменшення втрат електроенергії в мережах 10 кВ на 14,2%, термін окупності встановлення пристрою становить 8,2 роки, а при збільшенні навантаження в 3 рази очікуване значення терміну окупності – 2,8 роки.

Запропоновано принципи керування SOP, в основу яких покладено порівняння напруг наприкінці фідерів з синхронізацією та без синхронізації нульового початкового кута напруги на початку фідерів, а також використання різниці напруг наприкінці фідерів та на їх початку. Останній алгоритм є найбільш точним у випадку однорідних мереж. Подальший напрям дослідження – поширення алгоритму на неоднорідні мережі.

Література

1. Wang C., Wu J., Ekanayake J., and Jenkins N. (2017). Smart Electricity Distribution Networks. CRC Press. 416 p.
2. Cao W., Wu J., Jenkins N., Wang C., Green T. (2016). Operating principle of Soft Open Points for Electrical Distribution Network Operation. Applied Energy, 164, 245-257.
3. Cao W., Wu J., Jenkins N., Wang C., Green T. (2016). Benefits Analysis of Soft Open Points for Electrical Distribution Network Operation. Applied Energy, 165, 36-47.
4. Qi Q., Wu J., Long C. (2017). Multi-objective Operation Optimization of an Electrical Distribution Network with Soft Open Point. Applied Energy, 208, 734-744.
5. Popov V., Yarmoliuk O., Tkachenko V., Frolov I., Natalych V., Feature of Optimal Network Reconfiguration Problem Statement in Distribution Systems with Local Energy Sources. Вісник КрНУ імені Михайла Остроградського. Випуск 4/2022 (135). 53-62.
6. Farzamia A., Marjani S., Galvani S. and Kin K. T. T. Optimal Allocation of Soft Open Point Devices in Renewable Energy Integrated Distribution Systems. IEEE Access. Vol. 10. 2022.
7. Shamam Alwash, Sarmad Ibrahim, and Azher M. Abed, Distribution System Reconfiguration with Soft Open Point for Power Loss Reduction in Distribution Systems Based on Hybrid Water Cycle Algorithm. Energies 2023, 16, 199. 22 p.
8. Вартість універсальних послуг для малих непобутових споживачів. ТОВ «Хмельницькенергозбут». – Режим доступу : <https://energo.km.ua/Content/Uploads/2023/11/file20231109144328929.pdf>

References

1. Wang C., Wu J., Ekanayake J., and Jenkins N. (2017). Smart Electricity Distribution Networks. CRC Press. 416 p.
2. Cao W., Wu J., Jenkins N., Wang C., Green T. (2016). Operating principle of Soft Open Points for Electrical Distribution Network Operation. Applied Energy, 164, 245-257.
3. Cao W., Wu J., Jenkins N., Wang C., Green T. (2016). Benefits Analysis of Soft Open Points for Electrical Distribution Network Operation. Applied Energy, 165, 36-47.
4. Qi Q., Wu J., Long C. (2017). Multi-objective Operation Optimization of an Electrical Distribution Network with Soft Open Point. Applied Energy, 208, 734-744.
5. Popov V., Yarmoliuk O., Tkachenko V., Frolov I., Natalych V., Feature of Optimal Network Reconfiguration Problem Statement in Distribution Systems with Local Energy Sources. Вісник КрНУ імені Михайла Остроградського. Випуск 4/2022 (135). 53-62.
6. Farzamia A., Marjani S., Galvani S. and Kin K. T. T. Optimal Allocation of Soft Open Point Devices in Renewable Energy Integrated Distribution Systems. IEEE Access. Vol. 10. 2022.
7. Shamam Alwash, Sarmad Ibrahim, and Azher M. Abed, Distribution System Reconfiguration with Soft Open Point for Power Loss Reduction in Distribution Systems Based on Hybrid Water Cycle Algorithm. Energies 2023, 16, 199. 22 p.
8. Vartist universalnykh posluh dlia malykh nepobutovykh spozhyvachiv. TOV «Khmelyntskenerhozbut». – Rezhym dostupu : <https://energo.km.ua/Content/Uploads/2023/11/file20231109144328929.pdf>