

control system. The tests were carried out on the production capacities of the Scientific and Production Association "Energy-efficient technologies" in the Ternopil region. The results confirmed suitability of the proposed coherent method in order to supply the autonomous models of heating generator plant which is operated by solid biofuels.

Keywords: *Peltier elements, thermoelectric module, heat generator, energy efficiency, alternative fuel, coherent system*

*Рекомендовано до публікації докт. техн. наук
М.Г. Тарасенком. Дата надходження рукопису 03.12.13.*

УДК 621.314.057

**М.С. Сегеда, д-р техн. наук, проф.,
Н.О. Равлик**

Національний університет „Львівська політехніка“, м.Львів,
Україна, e-mail: mshedha@ukr.net

ОБМЕЖЕННЯ ВНУТРІШНІХ ПЕРЕНАПРУГ В ЕЛЕКТРИЧНИХ МЕРЕЖАХ ВЛАСНИХ ПОТРЕБ ЕЛЕКТРОСТАНЦІЙ ПІД ЧАС ОДНОФАЗНИХ ЗАМИКАНЬ НА ЗЕМЛЮ

**M.S. Shcheda, Dr. Sci.(Tech.), Professor,
N.O. Ravlyk**

Lviv Polytechnic National University, Lviv, Ukraine,
e-mail: mshedha@ukr.net

LIMITING OF INTERNAL OVERVOLTAGES IN ELECTRIC NETWORKS OF POWER STATION AUXILIARIES DURING SINGLE-PHASE GROUND FAULTS

Мета. Розроблення заходів щодо обмеження внутрішніх перенапруг в електричних мережах власних потреб електричних станцій під час однофазних замикань на землю для забезпечення їх надійної роботи.

Методика. Запропонована математична модель електричної мережі, пристроїв керування та захисту в контурних координатах з урахуванням асинхронного двигуна для дослідження електромагнітних процесів у мережах власних потреб електричних станцій. Методами математичних експериментів на цифрових моделях досліджені внутрішні перенапруги в електричних мережах власних потреб електричних станцій під час однофазних замикань на землю та запропоновані заходи щодо їх обмеження. Для моделювання поперечних несиметрій, зокрема однофазних замикань на землю, запропоновано здійснювати їх поперечними ємнісними елементами заступної схеми лінії електропередавання з урахуванням другого закону комутації.

Результати. Досліджені внутрішні перенапруги в електричних мережах власних потреб електричних станцій під час однофазних замикань на землю з використанням різних заходів їх обмеження, зокрема: встановленням обмежувачів перенапруг нелінійних (ОПНів); встановленням конденсаторних батарей.

Наукова новизна. У роботі запропоновано для обмеження внутрішніх перенапруг та покращення пуску синхронних та асинхронних двигунів встановлення конденсаторних батарей на шинах власних потреб електричних станцій, що також дозволяє розв'язати проблему регулювання напруги.

Практична значимість. Надійність роботи електричних мереж власних потреб електричних станцій, а також забезпечення технологічного процесу вироблення електричної енергії електричними станціями залежить від координації їх ізоляції під час однофазних замикань на землю. На даний час такі дослідження можна виконати шляхом математичних експериментів на цифрових моделях.

Ключові слова: *внутрішні перенапруги, математичне моделювання, цифрова модель, конденсаторна батарея, обмежувачі перенапруг нелінійні*

Вступ. Розв'язання задачі аналізу ustalених режимів і перехідних процесів в електричних мережах власних потреб електричних станцій найефективніше можна здійснити шляхом математичних експериментів на цифрових моделях, що забезпечує необхідну адекватність і економічність моделювання за повної автоматизації основних операцій, пов'язаних з такими дослідженнями [1,2].

Є декілька заходів обмеження рівнів перенапруг під час однофазних замикань на землю в електричних мережах власних потреб електричних станцій: встано-

вленням обмежувачів перенапруг нелінійних (ОПНів); вмиканням високовольтного резистора в нейтралі додаткового трансформатора; вмиканням низьковольтного резистора в нейтралі двообмоткового трансформатора через додатковий однофазний трансформатор; вмиканням низьковольтного резистора в обмотку нижчої напруги, з'єднаної в розімкнутий трикутник, у первинній обвиті використовуються три однофазних трансформатори; захисне шунтування [1, 3–5].

У статті пропонується для обмеження внутрішніх перенапруг та покращення пуску синхронних та асинхронних двигунів встановлення конденсаторних батарей на шинах власних потреб електричних станцій.

Встановлення конденсаторних батарей на шинах власних потреб електричних станцій також дозволяє як під час короткотривалих, так і довготривалих перехідних процесів покращити самозапуск двигунів, вирішити проблему регулювання напруги, що забезпечує неперервність технологічного процесу.

Виклад основного матеріалу. Математична модель електричної мережі та пристроїв керування й захисту в контурних координатах з урахуванням асинхронного двигуна має такий вигляд [1, 2]

$$\Gamma \text{diag}(R, 0) \Gamma_t (\vec{i}_k, \vec{\psi}_k) + \Gamma \begin{pmatrix} M_1 & \cdot & \cdot \\ \cdot & M_2 & WW_1^{-1} \\ \cdot & W_t W_{It}^{-1} & -R_m \end{pmatrix} \times \quad (1)$$

$$\times \Gamma_t (d\vec{i}_k / dt, d\vec{\psi}_k / dt)_t + \Gamma (\vec{u}_C, 0)_t + (\vec{u}(\vec{i}), 0)_t - (\vec{e}, 0)_t - \vec{e}_r - \vec{e}_M = 0;$$

$$\text{diag}(C, 0) (d\vec{u}_C / dt, 0)_t = \Gamma_t (\vec{i}_k, 0)_t + C_0 (\vec{j}, 0); \quad (2)$$

$$R_m = R_m (\Gamma_e (0, \vec{\psi}_k)_t); \quad (3)$$

$$T_1 d\vec{y} / dt + \vec{y} = T_2 d\vec{x} / dt + \vec{x}; \quad (4)$$

$$d\omega_r / dt = J^{-1} p_0 (M_{em} - M_m(\omega_r)), \quad (5)$$

де $\vec{e}_r = (K_r \vec{j}, 0)_t$; $\vec{e}_M = (K_M d\vec{j} / dt, 0)_t$; R – діагональна матриця резистивних опорів електричного кола; M_1 – квадратна матриця індуктивностей і взаєміндуктивностей електричного кола; M_2 – квазідіагональна матриця індуктивностей і взаєміндуктивностей електромагнітних апаратів (ЕМА); W – квазідіагональна матриця їх витків (містить прямокутні блоки з квадратними підматрицями окремих обмоток); W_1 – аналогічна матриця витків первинної обмотки ЕМА; C – матриця ємностей електричних кіл; \vec{j} – вектор-стовпець джерел струму; $\vec{i}_k, \vec{u}_C, \vec{u}(\vec{i}), \vec{e}$ – вектор-стовпці струмів, напруг на ємностях, напруг на нелінійних резистивних елементах (передусім, вентилях елементах) і ЕРС віток; $\vec{\psi}_k$ – стовпець контурних потокозчеплень; T – стала часу регулятора; \vec{x}, \vec{y} – вектори-стовпці вихідних і вхідних сигналів регулятора; k – коефіцієнт підсилення регулятора; $R_m = WW_{It}^{-1} \partial \vec{F}' / \partial \vec{\Phi}$ – діагональна матриця диференціальних магнітних опорів віток магнітних кіл ЕМА, що зведені до квадрата витків їх первинних обмоток; \vec{F}' – вектор-стовпець спадів магнітних напруг віток кола; $\vec{\Phi}$ – вектор-стовпець магнітних потоків віток кола; $M_{em} = p_0 (\Psi_{\delta a} (i_{sb} - i_{sc}) + \Psi_{\delta b} (i_{sc} - i_{sa}) + \Psi_{\delta c} (i_{sa} - i_{sb})) / \sqrt{3}$ – електромагнітний момент асинхронного двигуна (АД); i_{sa}, i_{sb}, i_{sc} – струми фаз обмоток статора АД; $\Psi_{\delta a}, \Psi_{\delta b}, \Psi_{\delta c}$ – робочі потокозчеплення статорних

обмоток; ω_r – зведена до полюсної ділянки статора кутова швидкість обертання ротора; p_0 – кількість пар полюсів; J – момент інерції ротора з приводним механізмом; $M_m(\omega_r)$ – механічний момент приводного механізму.

Параметричне моделювання поперечних несиметричних елементами здійснюється з урахуванням другого закону комутації відносно вузлів для моменту виникнення несиметрії у вигляді

$$\vec{Q}_{(-)} = \vec{Q}_{(+)}; \quad (6)$$

$$\vec{Q}_{(-)} = C_{(-)} \vec{u}_{C(-)}; \quad (7)$$

$$\vec{Q}_{(+)} = C_{(+)} \vec{u}_{C(+)}, \quad (8)$$

де $\vec{Q}_{(-)}, \vec{Q}_{(+)}, \vec{u}_{C(-)}, \vec{u}_{C(+)}$ – вектори сумарних зарядів вузлів і вузлових напруг до та після комутації відповідно; $C_{(-)}, C_{(+)}$ – матриці вузлових ємностей до та після комутації відповідно.

Послідовність інтегрування диференціальних рівнянь стану електричної мережі в методі контурних координат така. У заданий момент комутації за відомими $C_{(-)}$ й $\vec{u}_{C(-)}$ обчислюється вектор $\vec{Q}_{(-)}$. Формується нова матриця вузлових ємностей $C_{(+)}$. З урахуванням (6) за формулою (8) обчислюється нове значення вузлових напруг $\vec{u}_{C(+)}$, що використовується для подальшого інтегрування. Аварійний режим ліквідується тільки зміною ємнісних елементів вузлової матриці. В обох випадках крок інтегрування практично не відрізняється від кроку інтегрування до комутації.

Результати реалізації математичної моделі. Розрахункова заступна схема власних потреб електричної станції подана на рис. 1.

Живлення власних потреб здійснюється від трансформатора власних потреб з розщепленими обмотками, з'єднаними у трикутник. Дослідження внутрішніх перенапруг на шинах власних потреб електричної станції під час однофазних замикань на землю виконано без засобів обмеження перенапруг, обмеження перенапруг за допомогою комбінованої схеми ОПНів, тобто до шин вмикаються одночасно ОПН, з'єднані в зірку та трикутник, обмеження вмиканням конденсаторної батареї, а також обмеження ОПНами, з'єднаними в зірку. Гістограми рівнів перенапруг на різних споживачах власних потреб для фазних та лінійних напруг показано на рис. 2, 3.

Під час однофазного замикання максимальна кратність фазної напруги 4,33 U_ϕ і лінійної напруги 2,94 U_L є на приєднанні ЦН-1 без встановлення засобів обмеження перенапруг. Якщо обмежувати перенапруги встановленням комбінованої схеми ОПНів на шинах власних потреб, на цьому ж самому приєднанні зменшуються як фазна до 3,3 U_ϕ , так і лінійна напруга

до $1,99 U_{\Delta}$. Встановлення конденсаторної батареї потужністю $5Mvar$ зменшує перенапруги відповідно до значень: фазна – $3,35 U_{\phi}$, лінійна – $2,18 U_{\Delta}$. Обмеження внутрішніх перенапруг ОПНами, з'єднаними в зірку, перенапруги обмежуються до рівнів, відповідно, фазна до $4,04 U_{\phi}$ і лінійна до $2,83 U_{\Delta}$.

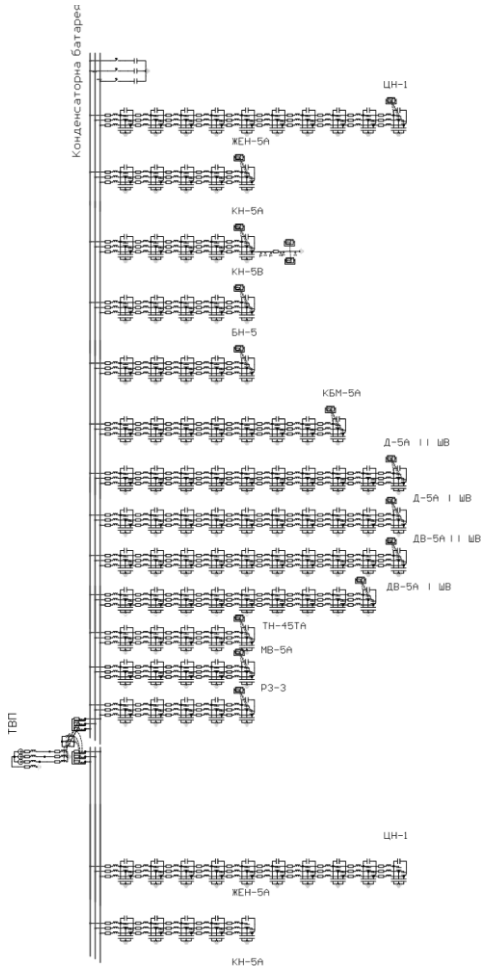


Рис. 1. Розрахункова заступна схема власних потреб електричної станції

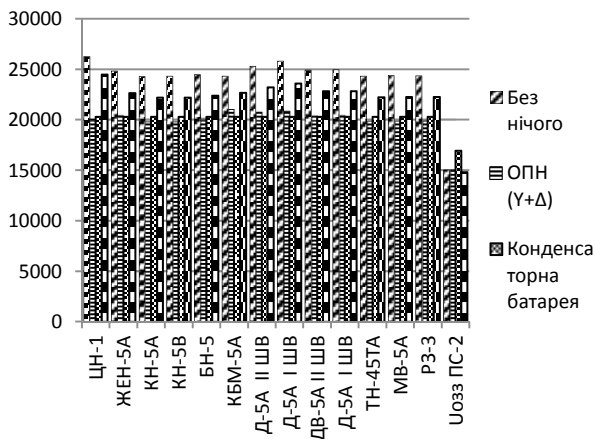


Рис. 2. Гістограми рівнів перенапруг на різних споживачах власних потреб (фазні напруги)

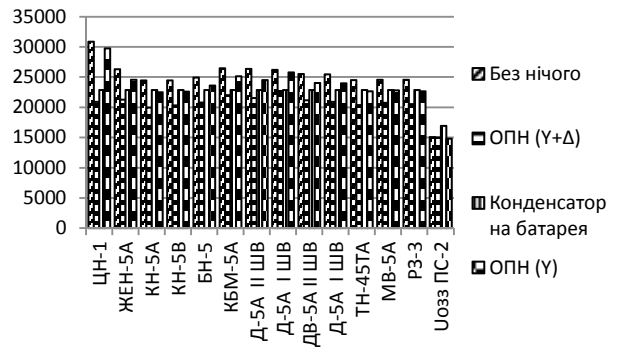


Рис. 3. Гістограми рівнів перенапруг на різних споживачах власних потреб (лінійні напруги)

Аналізуючи наведені гістограми, встановлення комбінованої схеми ОПНів та конденсаторної батареї, практично, дають однакові обмеження внутрішніх перенапруг на шинах власних потреб електростанції під час однофазних замикань на землю.

Висновки. Виходячи з наведених результатів, дослідження на цифровій моделі внутрішніх перенапруг на шинах власних потреб електростанцій під час однофазних замикань на землю, практично, однаково обмежують перенапруги як комбінована схема ОПНів, так і конденсаторна батарея.

Однак комбінована схема ОПНів є більш складнішим пристроєм, а з'єднання ОПНів у трикутник може спричинити трифазне КЗ.

Встановлення конденсаторних батарей на шинах власних потреб електричних станцій дозволяє покращити самозапуск електричних двигунів, а також регулювати напругу.

Список літератури / References

1. Внутрішні перенапруги в електричних мережах 6–10кВ та захист від перенапруг / М.С. Сегада, З.М. Бахор, Н.О. Равлик, Г.Ш. Бакало // Праці Інституту електродинаміки НАН України. – 2006. – №1(13) – С. 23–30.
 Seheda, M.S., Bahor, Z.M., Ravlyk, N.O. and Bakalo, G.Sh. (2006), "Internal overvoltage in networks 6...10 kv and overvoltage protection", *Pratsi Instytutu Elektrodynamiky NAN Ukrainy*, no. 1 (13), pp. 23–30.
2. Сегада М.С. Покращення пуску асинхронних двигунів власних потреб електричних станцій / М.С. Сегада, Н.О. Равлик, Г.Ш. Бакало // Вісник Національного університету „Львівська політехніка“. Електроенергетичні та електромеханічні системи. – 2009. – № 654. – С. 199–202.
 Seheda, M.S., Ravlyk, N.O. and Bakalo, G.Sh. (2009), "Improvement of start-up conditions of asynchronous motors of power station auxiliaries", *Visnyk Natsionalnogo Universytetu "Lvivska Politechnika" "Elektroenergetychni ta Elektromechanichni Systemy"*, no. 654, pp. 199–202.
3. Сивокобыленко В.Ф. Переходные процессы в электрических сетях с резисторным заземлением нейтрали: материалы международной научно-технической конференции „Перспективы и инновации в науке, образовании, производстве 2010“ / В.Ф. Сивокобы-

ленко, В.К. Лебедев, Р.П. Сердюков // Технические науки. Проект SWorld. – Одесса: Черноморье, 2010. – Т. 6. – С. 27–35.

Sivokobylenko, V.F., Lebedev, V.K. and Serdiukov, R.P. (2010), “Transient processes in electric networks with resistor grounded neutral”, *Proc. of the Int. Conf. “Perspektivy i innovatsii v nauke, obrazovanii i proizvodstve”*, Vol. 6, Engineering Science, Proekt SWorld, Chernomorye, Odessa, pp. 27–35.

4. Сивокобыленко В.Ф. Развитие математической модели для анализа переходных процессов в системе собственных нужд электростанции при замыкании фазы на землю / В.Ф. Сивокобыленко, В.К. Лебедев, Р.П. Сердюков // Наукові праці Донецького національного технічного університету. Серія „Електротехніка і енергетика“. – Донецьк, 2011. – вип. 10 (180). – С. 153–161.

Sivokobylenko, V.F., Lebedev, V.K. and Serdiukov, R.P. (2011), “Development of mathematical models for transient processes analysis during the phase ground fault”, *Naukovi Pratsi Donetskogo Natsionalnogo Technichnogo Universytetu*, Electronics and Power Engineering, Vol. 10 (180), Donetsk: DVNZ “Don NTU”, pp. 153–161.

5. Шкрабец Ф.П. Применение напряжения 35 кВ для систем электроснабжения подземных электроприемников глубоких энергоемких шахт / Ф.П. Шкрабец, А.В. Остапчук // Науковий вісник Національного гірничого університету. – 2013. – № 1(133). – С. 83–90.

Shkrabets, F.P. and Ostapchuk, A.V. (2013), “Application of 35 kilovolt voltage for underground power consumers supply systems of deep power-intensive mines”, *Naukovyy Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu*, no. 1. (133), pp. 83–90.

Цель. Разработка мероприятий ограничения внутренних перенапряжений в электрических сетях собственных нужд электрических станций во время однофазных замыканий на землю для обеспечения их надежной работы.

Методика. Предложена математическая модель электрической сети, устройств управления и защиты в контурных координатах с учетом асинхронного двигателя для исследования электромагнитных процессов в сетях собственных нужд электрических станций. Методами математических экспериментов на цифровых моделях исследованы внутренние перенапряжения в электрических сетях собственных нужд электрических станций во время однофазных замыканий на землю и предложены мероприятия их ограничения. Для моделирования поперечных несимметрий, конкретно однофазных замыканий на землю, предложено их осуществлять поперечными емкостными элементами схемы замещения линии электропередачи с учетом второго закона коммутации.

Результаты. Исследованы внутренние перенапряжения в электрических сетях собственных нужд электрических станций во время однофазных замыканий на землю с использованием различных мероприятий их ограничения, конкретно: установкой ограничителей перенапряжений нелинейных (ОПНов); установкой конденсаторных батарей.

Научная новизна. В работе предложена для ограничения внутренних перенапряжений и улучшения пуска синхронных и асинхронных двигателей установка конденсаторных батарей на шинах собственных нужд электрических станций, что также позволяет решить проблему регулирования напряжения.

Практическая значимость. Надежность работы электрических сетей собственных нужд электрических станций, а также обеспечение технологического процесса производства электрической энергии электрическими станциями зависит от координации их изоляции во время однофазных замыканий на землю. В данное время такие исследования можно выполнить путем математических экспериментов на численных моделях.

Ключевые слова: *внутренние перенапряжения, математическое моделирование, цифровая модель, конденсаторная батарея, ограничители перенапряжений нелинейные*

Purpose. Development of measures to limit the internal overvoltages in electric networks of power stations auxiliaries during single-phase ground faults in order to ensure the reliability of their operation.

Methodology. Mathematical model of the electrical network, control and protection devices in mesh-node coordinates was proposed. The asynchronous motor processes to analyze the electromagnetic processes in electric networks of power stations auxiliaries were taken into account. The internal overvoltages in electric networks of power stations auxiliaries during single-phase ground faults were analyzed using the methods of mathematical modeling based on digital models. The special measures to limit the internal overvoltage were proposed. In order to simulate the transverse asymmetry, including single-phase ground faults the capacitive elements were proposed for usage considering the second law of commutation.

Findings. The internal overvoltage in electric networks of power stations auxiliaries were investigated during single-phase ground faults using different limitation measures, in particular by installing of nonlinear surge protection devices and capacitor banks.

Originality. In the paper in order to restrict the internal overvoltage and improve the start-up conditions of synchronous and asynchronous motors it was proposed to install the capacitor banks on buses of power station auxiliaries. Proposed measures also allow solving the problem of the voltage regulation.

Practical value. The reliability of electrical networks of power station auxiliaries, as well as providing the technological process of electrical energy production by electrical stations depends on coordination of their insulation during single-phase ground faults. Currently such studies can be performed using mathematical experiments on digital models.

Keywords: *internal overvoltage, mathematical modelling, digital model, capacitor bank, surge protection device*

Рекомендовано до публікації докт. техн. наук О.С. Бештою. Дата надходження рукопису 16.11.13.