

<https://doi.org/10.31891/2307-5732-2023-317-1-253-256>

УДК 621.311:621.3.064.1

ДАВИДЕНКО Людмила

Луцький національний технічний університет
<https://orcid.org/0000-0002-0176-2045>
l.davydenko@lutsk-ntu.com.ua

ДАВИДЕНКО Володимир

Луцький національний технічний університет
<https://orcid.org/0000-0001-6183-9879>

АНАЛІЗ ЕЛЕКТРОМАГНІТНИХ ПЕРЕХІДНИХ ПРОЦЕСІВ В НИЗЬКОВОЛЬТНІЙ РОЗПОДІЛЬЧІЙ МЕРЕЖІ ПРОМИСЛОВОГО ПІДПРИЄМСТВА

Стаття присвячена питанню аналізу короткого замикання в мережі напругою до 1 кВ промислового підприємства. Методологія аналізу базується на рекомендаціях серії стандартів ANSI/IEEE щодо розрахунку струму короткого замикання для вибору і перевірки комутаційних апаратів і захисних пристроїв за рівнем струму короткого замикання низьковольтних мереж. Як інструмент аналізу застосовано модуль Short Circuit пакету програм ETAP. Результати аналізу забезпечують перевірку відповідності характеристик обладнання струмам короткого замикання, що є основою прийняття висновку щодо коректності проектних рішень.

Ключові слова: струм КЗ, максимальне значення струму КЗ, програмне забезпечення ETAP.

DAVYDENKO Liudmyla, DAVYDENKO Volodymyr
Luts'k National Technical University

ANALYSIS OF ELECTROMAGNETIC TRANSIENTS IN THE LOW-VOLTAGE DISTRIBUTION NETWORK OF AN INDUSTRIAL ENTERPRISE

Analysis of a short circuit in the distribution network with a voltage of up to 1 kV of the power supply system of an industrial enterprise. The procedure for calculating the short-circuit current in accordance with the recommendations of the ANSI/IEEE standard C37 series, which regulates the calculation of the short-circuit current for the selection and verification of switchgear and protective devices according to the short circuit current rating, was used to calculate the short-circuit current in the low-voltage distribution network of an industrial enterprise. The need to automate the process of calculating short-circuit currents in the power supply system of an industrial enterprise was substantiated. The Electrical Transient Analyzer Program (ETAP) software was used as an analysis tool. The design of the low-voltage distribution network was carried out in the ETAP software environment. The Short Circuit package of the ETAP software was used to calculate the short-circuit current on any bus of the distribution network. The result of the analysis is the determination of the short circuit current values and the verification of the compliance of the characteristics of the installed electrical equipment with the short-circuit currents. The effectiveness of using ETAP software for short-circuit analysis in order to select and verify the electrical equipment of the low-voltage distribution network of an industrial enterprise according to the level of short-circuit current was proven. The results of the analysis of the short-circuit current using the ETAP software provided an opportunity to verify the correctness of the decisions made regarding the selection of low-voltage switchgear of the distribution network of the facility's power supply system. Analysis of short-circuit current using ETAP software provides the possibility of selecting switchgear and protective devices according to the level of short-circuit current, which contributes to the design of a reliable power supply system for the facility.

Keywords: short circuit analysis, short circuit current, maximum value of short circuit current, ETAP software.

Постановка проблеми у загальному вигляді та її зв'язок із важливими науковими чи практичними завданнями

Ефективна та надійна система електропостачання (СЕП) є важливим компонентом промислового об'єкту. Специфічною особливістю електропостачання будь-якого об'єкту є одночасна участь великої кількості елементів у передачі та споживання електроенергії, та неминучість аварійних пошкоджень, що має вплив на надійність СЕП та роботу споживачів електроенергії. Однією з причин порушення нормального режиму роботи СЕП та виникнення аварійних ситуацій є коротке замикання (КЗ), що призводить до появи електромагнітних перехідних процесів в СЕП і може мати негативний вплив на стан та роботу електрообладнання. Тому, розрахунок та аналіз КЗ на різних рівнях СЕП є одним із завдань, що потребує вирішення як на етапі проектування, так і на етапі експлуатації СЕП для забезпечення надійності електропостачання об'єкту.

Аналіз досліджень та публікацій

Струми, що виникають в результаті КЗ (випадкового чи навмисного з'єднання точок електроустановки або струмопровідними частинами, спричиненого пошкодженням ізоляції або помилкою персоналу [1, 2]), створюють серйозну небезпеку для елементів СЕП на всіх рівнях напруги. КЗ в СЕП можна зменшити шляхом належного обслуговування та експлуатації системи, але неможливо повністю уникнути [3]. Виникнення КЗ зумовлює істотне збільшення струму в вітках СЕП, яке супроводжується його термічною і динамічною дією на електрообладнання, внаслідок чого можливе механічне ушкодження і навіть загоряння електроустановки. Небезпечний вплив струму КЗ на електрообладнання висуває жорсткі вимоги щодо стійкості електричних апаратів, струмопровідних частин, конструкцій розподільчих пристроїв (РП) до термічної та динамічної дії струму КЗ [4]. Значення струму КЗ є одним із чинників, що використовується для вибору параметрів комутаційних апаратів та РП [5], а також для координації захисних

реле та пристроїв. Комутаційні апарати та захисні пристрої в низьковольтній (НВ) розподільчій мережі промисловості вимагають обов'язкової оцінки їх вимикаючої здатності для підтримки робочого стану системи і підвищення безпеки працівників. Автоматичні вимикачі та запобіжники РП та промислових пультів управління повинні мати достатню вимикаючу (розривну) здатність, тобто, граничний струм вимкнення апарату не повинен бути менший за максимальний струм КЗ, який може протікати у вітці, де встановлено апарат. Кабелі та шинопроводи розподільчої та внутрішньоцехової мережі також мають повинні бути стійкими струму КЗ. Таким чином, всі комутаційно-захисні апарати та струмопровідні елементи повинні мати відповідний рівень стійкості струму КЗ - так званий Short Circuit Current Rating (SCCR), який представляє собою максимально допустиме значення струму КЗ, який може витримати елемент. Важливим моментом для оцінки стійкості елементів СЕП струму КЗ є визначення найбільшого його значення в розрахунковій точці для розрахункового режиму роботи електроустановки [4]. При цьому, значення струму трифазного КЗ є базовим для вибору комутаційної і захисної апаратури та для оцінки параметрів інших видів КЗ [5]. Таким чином, для правильного вибору комутаційних апаратів і налаштування пристроїв захисту на стадії проектування, забезпечення надійності роботи електроустановок та всієї СЕП під час її експлуатації необхідним є детальний розрахунок струму трифазного КЗ та аналіз його значення на всіх рівнях СЕП [2, 6].

Формулювання цілей статті

Метою статті є аналіз КЗ в низьковольтній розподільчій мережі промислового підприємства із застосуванням сучасних інструментів автоматизації розрахунків струму КЗ.

Виклад основного матеріалу

Аналіз КЗ передбачає ідентифікацію величини струму, що протікає через елементи СЕП при КЗ в деякій точці [7], та її порівняння з SCCR електрообладнання і струмопровідних елементів, що є першим кроком до забезпечення надійного захисту енергосистеми. Після визначення струмів КЗ, проводиться дослідження та координація захисту для визначення оптимальних характеристик і налаштувань захисних пристроїв СЕП.

Процедури розрахунків струму КЗ регламентують є американські стандарти ANSI/IEEE і європейський аналог - стандарт Міжнародної електротехнічної комісії IEC 60909. Стандарти ANSI/IEEE серії С37 призначені для розрахунку струму КЗ з метою вибору комутаційних апаратів в мережі до 1 кВ та вище 1 кВ. Стандарт IEC 60909-3:2009 є більш загальним і надає загальні рекомендації щодо аналізу будь-якого виду КЗ (симетричного та несиметричного) в трифазній електричній системі змінного струму промислової частоти 50 Гц.

У розрахунках КЗ згідно рекомендацій стандартів ANSI усі зовнішні та внутрішні джерела напруги електричних машин замінюються еквівалентним джерелом напруги в точці КЗ, яке дорівнює напрузі перед КЗ у точці, і всі електричні машини представлені їхніми внутрішніми опорами [7]. Згідно ANSI визначаються три типи струму КЗ, залежно від періоду часу, який розглядається від початку виникнення КЗ: миттєве значення струму КЗ; значення струму вимкнення (переривання) КЗ; усталене значення струму КЗ. Для цього формуються три різні мережі імпедансів [2]: мережа півперіоду ($\frac{1}{2}T$, де T - період струму КЗ, $T=0,02$ с) (надперехідна мережа), мережа з 1,5-4 періодами (перехідна мережа) і мережа з 30 періодами (мережа усталеного стану). У мережі півперіоду всі синхронні та асинхронні машини зображуються їх надперехідним реактивним опором. Миттєвий струм КЗ розраховується через $\frac{1}{2}T$ після виникнення КЗ і представляє собою найбільше значення струму КЗ до моменту, поки його змінна (вимушена, періодична) та постійна (вільна, аперіодична) складові спадають до усталеного значення [2, 7]. У мережі $\frac{1}{2}$ -4 періодів для розрахунку струму КЗ використовується перехідний реактивний опір синхронних та асинхронних машин, а струм вимкнення (переривання) КЗ розраховується через $4T$ після виникнення КЗ. У схемі з 30 періодами для розрахунку струму КЗ використовується синхронний реактивний опір синхронних і асинхронних машин. Стандарти ANSI/IEEE рекомендують використовувати окремі мережі R і X для обчислення відношення X/R . Для кожної несправної шини визначають відношення X/R , яке використовується для визначення коригуючого коефіцієнта для врахування часового зміщення (затухання) аперіодичної складової струму КЗ [7]. В результаті визначаються відповідні струми КЗ, які використовуються для різних захисних пристроїв: для перевірки спрацювання та вимкнення струму КЗ автоматичних вимикачів високої напруги, перевірки вимикаючої (перериваючої) здатності запобіжників і автоматичних вимикачів низької напруги (НН), перевірки стійкості ізоляторів шин, виконання налаштування реле [7]. Струми КЗ першого періоду (через $\frac{1}{2}T$ після виникнення КЗ), які називають струмами короткочасного КЗ, стосуються роботи автоматичних вимикачів. Ці струми враховують зміну аперіодичної складової та обчислюються на основі припущення про відсутність загасання періодичної складової струму в джерелах живлення точки КЗ. Враховуючи, що вимикачі та запобіжники НН спрацьовують у першому періоді, їх номінальні характеристики відключення порівнюються з миттєвими значеннями струму КЗ.

Залежно від розмірів, СЕП промисловості може містити десятки шин, особливо коли розглядаються шини НН. Необхідність розрахунку струму КЗ в багатьох точках НВ мережі СЕП робить процес розрахунку трудомістким, оскільки кожен сценарій розрахунку - це окрема схема короткозамкненого кола з різним шляхом протікання струму КЗ. За таких умов необхідною є автоматизація розрахунків із

застосуванням відповідного програмного забезпечення (ПЗ). Швидкість і надійність комп'ютерних розрахунків значно вища навіть для невеликих електричних систем. Тому, розрахунок струму КЗ у різних точках СЕП на основі стандартів ANSI/IEEE виконано із застосуванням пакету Short Circuit ПЗ Electrical Transient Analyzer Program (ETAP), яке є комплексним рішенням для моделювання, проектування та аналізу промислових енергосистем [8, 9].

Для забезпечення необхідної точності розрахунку струму короткого замикання необхідне знання схеми системи електропостачання об'єкту. На першому етапі виконується проектування мережі в середовищі ETAP. Фрагмент спроектованої в програмі ETAP однолінійної схеми розподільчої мережі СЕП промпідприємства наведено на рисунку 1. Після проектування однолінійної схеми розподільчої мережі в режимі редагування, поточне представлення перемикається в режим аналізу КЗ. Обчислення струму КЗ контролюються та передаються відповідно до налаштувань досліджуваного випадку, вибраного на панелі інструментів. Редактор випадків аналізу КЗ включає вибір несправної шини, змінні керування рішенням і різні опції для вихідних звітів. Доступ до них здійснюється з панелі інструментів досліджуваного випадку, або з системного менеджера. Враховуючи вихідну схему та параметри елементів в нормальному режимі роботи, кожен вузол індивідуально піддається виходу з ладу за допомогою вибору шини в редакторі аналізу випадків КЗ. Програма обчислює середньоквадратичні значення струмів КЗ за 1/2 періоду на всіх шинах НВ мережі для визначення миттєвих значень струму КЗ. Результати моделювання КЗ відображено на однолінійній схемі СЕП (рис. 2), що є зручним засобом візуалізації результатів аналізу. Результати розрахунку струму трифазного КЗ відображено у зведеному звіті (рис. 3), створеному програмою ETAP та отриманому шляхом вибору менеджера звітів про КЗ ANSI.

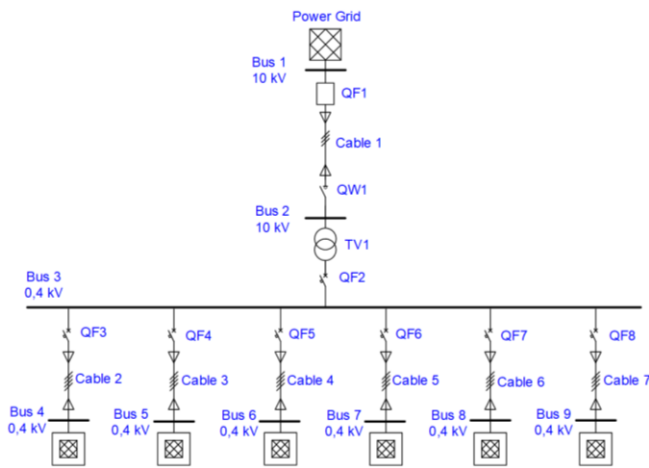


Рис. 1. Фрагмент однолінійної схеми розподільчої мережі

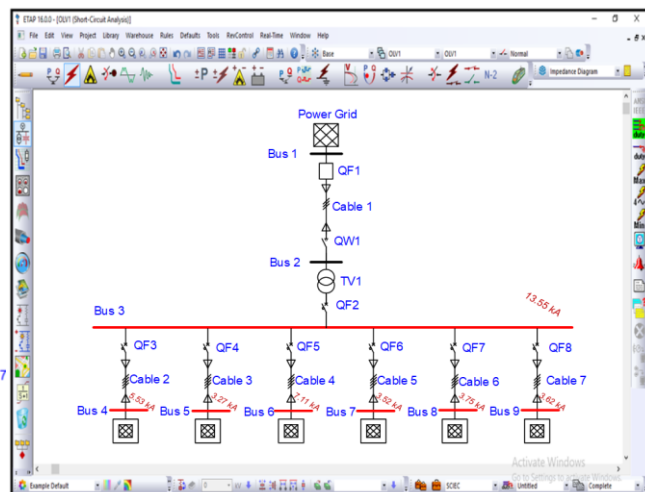


Рис. 2. Результати аналізу короткого замикання в низьковольтній розподільчій мережі

Short-Circuit Summari Report

1/2 Cycle – 3-Phase

Prefault Voltage = 100% of the Bus Nominal Voltage

Bus		3-Phase Fault		
ID	kV	Real	Imag.	Mag.
Bus 3	0.4	7.44	-9.33	13.55
Bus 4	0.4	4.32	-3.91	5.53
Bus 5	0.4	3.75	-2.31	3.27
Bus 6	0.4	6.28	-5.16	7.11
Bus 7	0.4	3.25	-2.51	3.52
Bus 8	0.4	3.45	-2.68	3.75
Bus 9	0.4	3.31	-2.56	3.62

All fault currents are symmetrical (1/2 Cycle network) values in rms kA

Рис. 3. Звіт про аналіз короткого замикання

Обчислені значення струму КЗ через кожен елемент НВ розподільчої мережі порівнюються з його SCCR, та, за необхідності, видаються відповідні попередження. Загальні параметри попередження для аналізу КЗ такі: якщо струм через елемент перевищує 95% номінального значення струму вимкнення КЗ, фіксується граничне попередження; якщо струм через елемент складає 100% номінального значення струму вимкнення КЗ або більше, фіксується критичне попередження. Аналогічні попередження видаються стосовно шин РП 0,4 кВ. Список попереджень про КЗ включає всі пристрої з критичними або граничними порушеннями рейтингу. Якщо немає пристроїв, перелічених у режимі попередження, це свідчить про те, що

електричне обладнання вибрано відповідно до параметрів КЗ. Результати аналізу КЗ в досліджуваній НВ мережі не містять попереджень про порушення SCCR, що підтверджує відповідність характеристик вибраної апаратури рівням струму КЗ.

Висновки з даного дослідження і перспективи подальших розвідок у даному напрямі

Аналіз струмів КЗ в НВ розподільчій мережі є основою для вибору комутаційних апаратів та захисних пристроїв. Розрахунок струму КЗ згідно стандартів ANSI/IEEE серії C37 передбачає визначення миттєвого значення, значення струму вимкнення та усталеного значення струму КЗ залежно від розрахункового періоду часу від початку КЗ. Для перевірки запобіжників і вимикачів НН за SCCR використовується миттєве значення струму КЗ. Розрахунок струму КЗ за допомогою модуля Short Circuit ПЗ ETAP спрощує аналіз КЗ в розгалуженій НВ розподільчій мережі СЕП підприємства. Результатом аналізу є розрахунок струму КЗ в заданих точках НВ мережі та повідомлення щодо відповідності характеристик встановленого обладнання за SCCR.

Література

1. Esen V. The determination of short circuits and grounding faults in electric power systems using time-frequency analysis / V. Esen, B. Oral, T. Akinci // *Journal of Energy in Southern Africa*. - 2015. - Vol. 26. - P. 123-132.
2. Sankar S.L. ANSI and IEC Standards Based Short Circuit Analysis of a Typical 2×30 MW Thermal Power Plant / S.L. Sankar, M.M. Iqbal // *Middle-East Journal of Scientific Research*. - 2015. - Vol. 23(8). - P. 1617-1625.
3. Janiga P. Short-circuit - analysis and calculation / P. Janiga, Ž. Eleschová, D. Viglaš // *WSEAS transactions on power systems*. - 2014. - Vol. 9. - P. 291-299.
4. Пантелєєва І.В. Проблема координації рівнів струмів КЗ в енергосистемах / І.В. Пантелєєва // *Вчені записки ТНУ імені В.І. Вернадського. Серія: технічні науки*. - 2020. - Т. 31. - № 1. - С. 34-39.
5. Ягуп В.Г. Аналіз трифазного короткого замикання із застосуванням сучасних інформаційних технологій / В.Г. Ягуп, К.В. Ягуп // *Комунальне господарство міст*. - 2010. - №97. - С. 199-205.
6. Пантелєєва І.В. Шляхи обмеження рівнів струмів КЗ в електричних мережах / І.В. Пантелєєва, А.В. Глушко // *Вісник НТУ "ХПІ". Серія: Нові рішення у сучасних технологіях*. - 2020. - № 4 (6). - С. 54-59.
7. Mahiwal L.G. Short Circuit Analysis of Electrical Distribution System for Typical Chemical Industry / L.G. Mahiwal, J.G. Jamnani, K.N. Velani // *2019 International Conference on Computing, Power and Communication Technologies (GUCON), Proceedings*. - 2019. - P. 475-480.
8. Latt A.Z. Short Circuit Analysis of 33/11/0.4 kV Distribution System Using ETAP / A.Z. Latt // *International Journal of Latest Technology in Engineering, Management & Applied Science (IJLTEMAS)*. - 2019. - P. 79-85.
9. Prabhu J.A.X. Design of electrical system based on Short Circuit study using ETAP for IEC projects / J.A.X. Prabhu, K.S. Nande, S. Shukla, C.N. Ade // *2016 IEEE 6th International Conference on Power Systems (ICPS)*. - 2016. - P. 1-6.

References

1. Esen V. The determination of short circuits and grounding faults in electric power systems using time-frequency analysis / V. Esen, B. Oral, T. Akinci // *Journal of Energy in Southern Africa*. - 2015. - Vol. 26. - P. 123-132.
2. Sankar S.L. ANSI and IEC Standards Based Short Circuit Analysis of a Typical 2×30 MW Thermal Power Plant / S.L. Sankar, M.M. Iqbal // *Middle-East Journal of Scientific Research*. - 2015. - Vol. 23(8). - P. 1617-1625.
3. Janiga P. Short-circuit - analysis and calculation / P. Janiga, Ž. Eleschová, D. Viglaš // *WSEAS transactions on power systems*. - 2014. - Vol. 9. - P. 291-299.
4. Pantielieieva I.V. The problem of coordination of short current in power systems / I.V. Pantielieieva // *Scientific notes of Taurida National V.I. Vernadsky University. Series: Technical Sciences*. - 2020. - Vol. 31. - № 1. - P. 34-39.
5. Yahup V.H. Analysis of a three-phase short circuit using modern information technologies / V.H. Yahup, K.V. Yahup // *Municipal economy of cities*. - 2010. - №97. - P. 199-205.
6. Pantielieieva I.V. Ways to limit the levels of short circuit currents in electrical grids / I.V. Pantielieieva, A.V. Hlushko // *Bulletin of the NTU "KhPI". Series: New Solutions in Modern Technology*. - 2020. - № 4 (6). - P. 54-59.
7. Mahiwal L.G. Short Circuit Analysis of Electrical Distribution System for Typical Chemical Industry / L.G. Mahiwal, J.G. Jamnani, K.N. Velani // *2019 International Conference on Computing, Power and Communication Technologies (GUCON), Proceedings*. - 2019. - P. 475-480.
8. Latt A.Z. Short Circuit Analysis of 33/11/0.4 kV Distribution System Using ETAP / A.Z. Latt // *International Journal of Latest Technology in Engineering, Management & Applied Science (IJLTEMAS)*. - 2019. - P. 79-85.
9. Prabhu J.A.X. Design of electrical system based on Short Circuit study using ETAP for IEC projects. J.A.X. Prabhu, K.S. Nande, S. Shukla, C.N. Ade // *2016 IEEE 6th International Conference on Power Systems (ICPS)*. - 2016. - P. 1-6.