

Пантєлєєва І. В.

кандидат технічних наук, доцент,

доцент кафедри фізики, електротехніки і електроенергетики

Української інженерно-педагогічної академії

м. Харків

ПРОБЛЕМА КООРДИНАЦІЇ РІВНІВ СТРУМІВ КОРОТКОГО ЗАМИКАННЯ В ЕНЕРГОСИСТЕМАХ

Вимоги до електричних апаратів, струмоведучих частин, силових трансформаторів та конструкцій розподільчих пристроїв становляться більш жорсткими. Виникає проблема оптимальної координації у динаміці параметрів електрообладнання та вимог енергосистеми або координації параметрів електрообладнання з існуючими рівнями струмів к.з. Ця проблема повинна вирішуватись на базі системного підходу з урахуванням названої динаміки, розробок нових видів обладнання, а також вимог до надійності і економічності режимів роботи енергосистем. Проблема комплексна, багатогранна, потребує проробки ряду взаємопов'язаних питань.

Необхідність обмеження струмів к.з. може виникнути як на стадії проектування електростанцій, так і під час експлуатації. При цьому струмообмежуючі пристрої, які обираються, не повинні істотно впливати на нормальний режим роботи електричної мережі, повинні мати стабільні характеристики при зміні схеми і параметрів режиму.

У статті розглядаються проблеми координації параметрів електрообладнання з існуючим (або які очікуються) величинами струмів коротких замикань (к.з.). Розглянута динаміка рівнів струмів к.з. по енергосистемам України, а також динаміка зміни найбільших рівнів струмів відключення комутаційних апаратів. Застосування методів і засобів обмеження струмів к.з. Достатньо детально розглянута ефективність

розділення електричної мережі та схемних рішень. Проаналізований також розподіл перетоків потужності на шинах електроустановок при розділенні мережі.

Ефективність стаціонарного розділення мережі визначається розрахунками струмів к.з. для існуючої нормальної схеми мережі при максимальному навантаженні та для схеми, де розділення мережі ліквідовано. Проаналізований інтегральний розподіл струмів к.з. по вузлах мережі 110, 220 кВ усередненої регіональної енергосистеми. Дослідження отриманих даних виявляє ряд закономірностей: ліквідація точок стаціонарного розділення дуже збільшує максимальні струми к.з. Зростання спостерігається у схемі з двома секціонованими системами збірних шин, а також при вмиканні двох шиноз'єднувальних і двох секційних вимикачів та одночасному підживленні точки к.з. від сусіднього енерговузла, де також ліквіднуються точки стаціонарного розділення мережі.

Проаналізований узагальнений ефект струмообмеження, а по-третє, завдяки стаціонарному розділенню 20% найбільш великих комутаційних вузлів, вдалося стабілізувати струми к.з. на рівні до 40 кА і використовувати електричні апарати з відносно невисокою комутаційною спроможністю і, відповідно, вартістю.

***Ключові слова:** струм короткого замикання (к.з.), енергосистема, електрична мережа, комутаційні апарати, трансформатор, вимикач, потужність, шини електроустановок.*

Постановка проблеми та аналіз останніх досліджень і публікацій.

У мережах різної напруги енергосистем рівень струмів к.з. безперервно зростає. При цьому вимоги до електричних апаратів, струмоведучих частин, силових трансформаторів та конструкцій розподільчих пристроїв (РП) становляться більш жорсткими. Виникає проблема оптимальної координації у динаміці параметрів електрообладнання та вимог енергосистеми або

координації параметрів електрообладнання з існуючими рівнями струмів к.з. [1, 14].

Ця проблема виникла порівняно недавно (у 60-70 р.р. ХХ ст.) у зв'язку з розвитком електроенергетики: зростанням одиничних потужностей генеруючих агрегатів, електростанцій, підстанцій та енергосистем, мереж середньої та високої напруги. Вона повинна вирішуватись на базі системного підходу з урахуванням динаміки зміни струмів к.з. і параметрів електрообладнання, розробок їх нових видів, а також вимог до надійності і економічності режимів роботи енергосистем. Це частина більш загальної задачі обґрунтування структури, параметрів і режимів роботи енергосистем та їх елементів, яка вирішується на всіх стадіях управління енергосистем: від прогнозування і планування до проектування і експлуатації [2, 3]. Проблема комплексна, багатогранна, потребує проробки ряду взаємопов'язаних питань.

На сучасному етапі розвитку складних електроенергетичних систем (ЕЕС), не дивлячись на те, що використовуються різні струмообмежуючі пристрої, проблема обмеження струмів к.з. до сих пір залишається невирішеною [1, 4]. Зростання струмів к.з. в електричних мережах всіх класів напруги робить актуальною розробку нових ефективних методів і пристроїв, які призначені для їх зниження.

Проблему координації струмів к.з. необхідно особливо вирішувати: для розподільчих пристроїв і мережі генераторної напруги теплоелектростанцій, на зборках генераторної напруги укрупнених блоків гідроелектростанцій, на вторинній стороні (6÷10 кВ) підстанцій, у системі власних потреб конденсаційних і атомних електростанцій, і, нарешті, у розподільчих пристроях і мережах високої напруги потужних районних електростанцій.

Постановка завдання. Метою статті є корегування рівнів струмів к.з. у мережах різної напруги з параметрами комутаційних апаратів на основі аналізу статистичних даних регіональної енергосистеми.

Виклад основного матеріалу дослідження. Проектування і експлуатація ЕЕС – це складні техніко-економічні задачі, які по своїй суті

завжди є динамічними, нелінійними і багатоваріантними. Необхідність обмеження струмів к.з. може виникнути як на стадії проектування електростанцій, так і під час експлуатації. При цьому, як відомо, струмообмежувальні пристрої, які обираються, не повинні надавати істотного впливу на нормальний режим роботи електричної мережі, повинні мати стабільні характеристики при зміні схеми і параметрів режиму.

Рівні струмів к.з. і динаміка їх зміни аналізуються по статистичним даним (10÷20 років) і на перспективу (10÷15 років). Джерелом інформації звичайно є підсумки розрахунків струмів к.з. в електричних мережах у режимі максимуму навантаження. Особливу увагу представляють найбільші значення $I_{k\ max}$ струмів трифазних $I_{k\ max}^{(3)}$ і однофазних $I_{k\ max}^{(1)}$ к.з. у розрахунковому режимі роботи електроустановки або енергосистеми.

Динаміка рівнів струмів к.з. по енергосистемам України приведена у табл. 1, для прикладу розглядаються зміни $I_{k\ max}$ у мережах 110, 220 кВ за 20 років [6, 7].

Таблиця 1

Найбільші діючі значення струмів к.з. у мережі системи

Рік	Струм к.з., кА, при напрузі мережі, кВ			
	110		220	
	$I_{k\ max}^{(3)}$	$I_{k\ max}^{(1)}$	$I_{k\ max}^{(3)}$	$I_{k\ max}^{(1)}$
1999	34,6	38,9	34,1	33,0
2004	30,4	37,6	35,4	34,9
2009	30,9	37,5	35,6	37,9
2014	31,2	37,3	35,5	38,0
2019	31,4	37,4	35,5	38,2

Стабілізація струмів к.з. на рівні до 40 кА у мережах 110, 220 кВ стає наслідком їх цілеспрямованого обмеження. Без цього у значній частині вузлів мереж 110, 220 кВ вони б перевищили 100÷130 кА і вимагали би заміни 1/3 встановленого комутаційного обладнання. Максимально допустимий рівень

струмів к.з. – важлива техніко-економічна характеристика енергосистем. Вимоги до комутаційного обладнання повинні враховувати стратегію розвитку систем, електростанцій і мереж, можливість промисловості розробити і доставити у встановлені терміни обладнання з потрібними параметрами, надійність роботи електростанцій, підстанцій, вузлів навантаження і системи в цілому, витрати на створення мережі з тим чи іншим максимальним рівнем струмів к.з.

Величина струму к.з. залежить від структури і параметрів електричної мережі, встановленої потужності генераторів, які видають енергію у мережу генераторної чи підвищеної напруги, а також від встановленої потужності трансформаторів зв'язку з мережами інших напруг, які мають джерела живлення. Тому максимальний рівень струмів к.з. пов'язаний з інтегральними параметрами мереж. До них можна віднести щільність σ_m електричної мережі, площу електропостачання s_n , яка приходить на одну підстанцію, а також середню довжину $l_{сер}$ лінії класу напруги, який розглядається. Перелічені параметри характеризують жорсткість електричних зв'язків у енергосистемі і розраховуються наступним чином:

$$\sigma_m = \frac{l_{\Sigma}}{s}; s_n = \frac{s}{n_{nc}}; l_{сер} = \frac{l_{\Sigma}}{n_l}, \quad (1)$$

де l_{Σ} - сумарна довжина ліній класу напруги, який розглядається, у регіоні площиною s , км; n_{nc} - кількість підстанцій; n_l - кількість ліній.

Електропромисловість безперервно удосконалює конструкції електрообладнання, покращує його параметри та характеристики з обліком збільшення вимог до енергосистем, які розвиваються [5, 13].

Відомі наступні методи обмеження струмів к.з.: схемні рішення на етапі проектування; стаціонарне та автоматичне розділення існуючої мережі при експлуатації; застосування струмообмежуючих пристроїв різного типу; використання струмообмежуючих реакторів і резисторів, а також часткове розземлення нейтралей трансформаторів [5].

Більш докладніше розглянемо ефективність розділення електричної мережі та схемні рішення. Проблема обмеження струмів к.з. зберігається до теперішнього часу. В якійсь мірі про це можна судити по динаміці розділення мереж регіональної енергосистеми (табл. 2) [8, 12].

Таблиця 2

Динаміка точок розділення мереж усередненої регіональної енергосистеми

Вид розділення	Рік	Кількість точок розділення у мережах		
		110 кВ	220 кВ	Усього
Стаціонарне	1999	45	11	56
	2004	68	11	79
	2009	88	17	105
	2014	84	18	102
	2019	80	18	98
Автоматичне	1999	7	2	9
	2004	21	3	24
	2009	20	3	23
	2014	22	4	26
	2019	20	4	24

З цих даних видно, що приблизно 20% найбільш крупних комутаційних вузлів мережі 110, 220 кВ придатні стаціонарному розділенню на шиноз'єднувальних та секційних вимикачах. Автоматичне розділення мережі використовується рідше, тому що воно не зменшує електродинамічних дій на електрообладнання лінійних приєднань та потребує більш високих співвідношень наскрізних струмів вимикачів та їх струмів відключення.

З 2004 р. почалось зростання електроспоживання (табл. 2). Таким чином, період з кінця 90-х років ХХ ст. до початку ХХІ ст. є фазою, коли вдалося привести у відповідність відмикаючу здатність комутаційних

апаратів зі струмами к.з. Не дивлячись на значні обсяги розділення мереж, як правило, номінальні струми відключення ряду встановлених вимикачів виявляються нижче найбільших розрахункових струмів к.з., тобто, - вимикачі з недостатньою відмикаючою здатністю. Таке положення характерне для будь-якої регіональної енергосистеми країни.

Ефективність стаціонарного розділення мережі визначається розрахунками струмів к.з. для існуючої нормальної схеми мережі при максимальному навантаженні та для схеми, де розділення мережі ліквідовано. Так, розрахункова схема регіональної енергосистеми складається, наприклад, з 958 вузлів 110 кВ, 180 вузлів 220 кВ. Кількість вузлів $n_{вуз}$ у розрахунковій схемі перевищує кількість РП $n_{рп}$ класу напруги, який розглядається. Причина у тому, що кодування вузлів у розрахунковій схемі мережі фіксує кожен систему (схема з двома системами збірних шин з обхідною або без неї) чи секцію системи збірних шин (схема з однією секціонованою системою шин з обхідною або без неї).

На рис. 1 приведений інтегральний розподіл струмів к.з. по вузлам мережі 110, 220 кВ регіональної енергосистеми [4, 12].

Аналіз отриманих даних виявляє ряд закономірностей. По-перше, ліквідація точок стаціонарного розділення дуже збільшує (в $1,9 \div 4,4$ рази) максимальні струми к.з. (табл. 3) у мережі 110, 220 кВ. Вони можуть перевищити 130 кА. Зростання $I_{к\ max}$ у 3-4 та більше разів може бути у схемі електроустановки з двома секціонованими системами збірних шин. У нормальному режимі РП ділиться на чотири безпосередньо не пов'язаних між собою частини, та стаціонарне ділення створюється відключеними двома шиноз'єднувальними і двома секційними вимикачами. Зростання струму к.з. у 4,4 рази спостерігається при їх вмиканні і одночасному підживленні точки к.з. від сусіднього енерговузла, де також ліквідуються точки стаціонарного розділення мережі.

По-друге, по кривим інтегрального розподілу струмів к.з. (рис. 1) виявляється узагальнений ефект струмообмеження по співвідношенню:

$$K_{обм} = \frac{П_1}{П_2}. \quad (2)$$

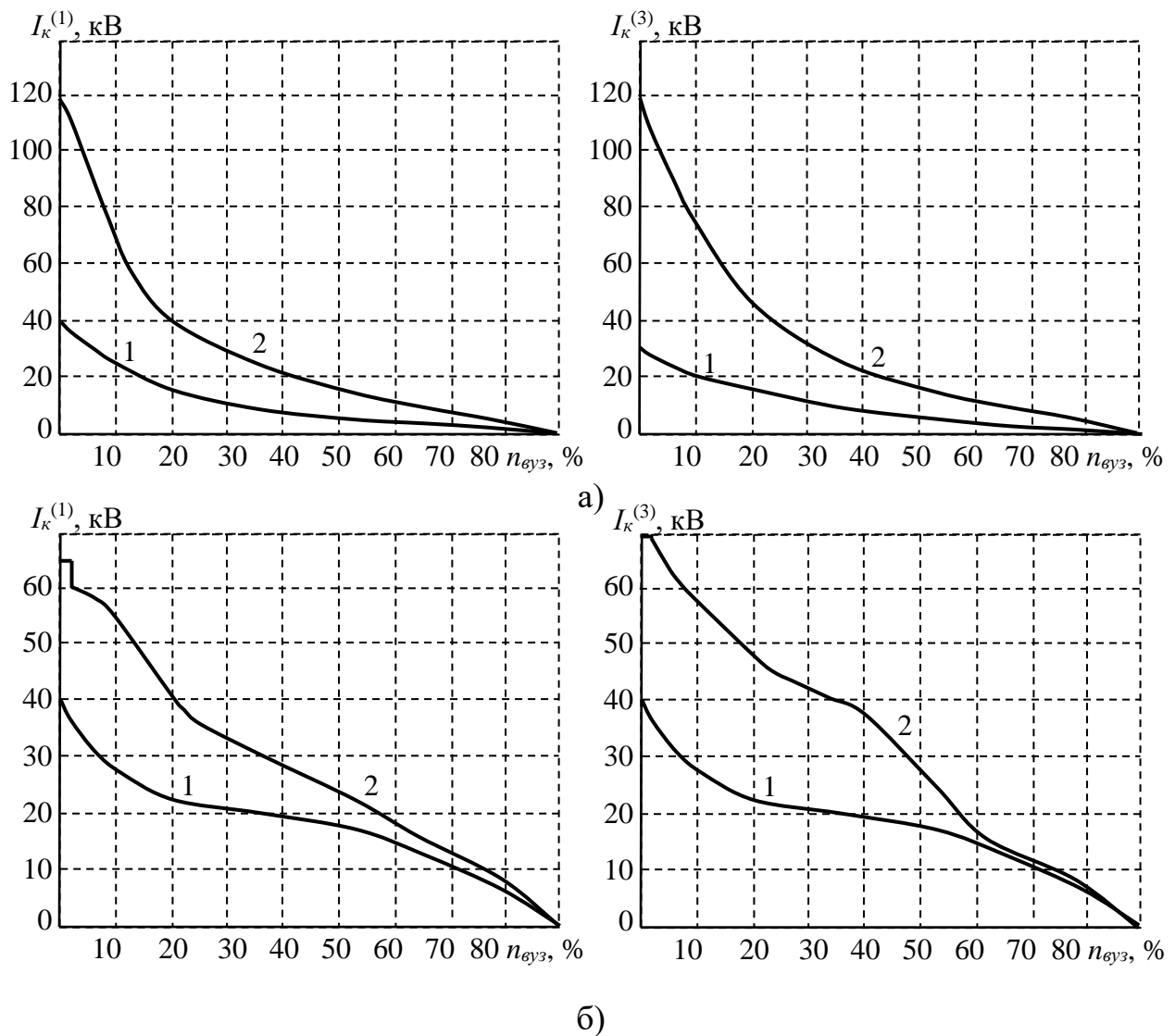


Рис. 1. Інтегральний розподіл струмів однофазного і трифазного к.з. у мережах: а) 110 кВ; б) 220 кВ (1 – фактична схема з розімкнутими точками стаціонарного розділення мережі; 2 – схема з примусово замкнутими точками стаціонарного розділення мережі)

У співвідношенні (2): $П_1$ - площа фігури, яка створюється осями координат та кривою інтегрального розподілу 1, а $П_2$ - те ж саме, але кривою 2. Значення цього коефіцієнта можна трактувати, як середнє обмеження

струмів к.з., яке приходить на кожний вузол мережі: для 110 кВ - $k_{обм}=1,91/2,08$; для 220 кВ - $k_{обм}=1,47/1,56$.

По-третє, за рахунок стаціонарного розділення 20% найбільш великих комутаційних вузлів, вдалося стабілізувати струми к.з. на рівні до 40 кА у всіх вузлах мереж 110÷220 кВ енергосистеми, яка розглядалась, і використовувати електричні апарати з відносно невисокою комутаційною спроможністю і, відповідно, вартістю.

Таблиця 3

Максимальні розрахункові струми к.з. у регіональній енергосистемі

Параметр	Максимальний струм к.з. у мережах, кА	
	110 кВ	220 кВ
Розрахункова схема мережі:		
- фактична з розімкнутими точками стаціонарного розділення мережі	37,5/30,9	37,9/35,6
- з примусово замкнутими точками стаціонарного розділення мережі	121,4/134,4	71,9/74,8
Збільшення струму к.з., відносні одиниці	3,2/4,4	1,9/2,1

Чисельник – струм однофазного к.з.; знаменник – трифазного.

Теоретично ліквідація точок стаціонарного розділення мереж 110÷220 кВ та викликаний цим ріст рівнів струмів к.з можуть привести до того, що, наприклад, з 2500 встановлених вимикачів в енергосистемі потребується заміна 830 ($\approx 30\%$) вимикачів. По обережним оцінкам при ліквідації точок стаціонарного розділення мережі тільки в одній регіональній енергосистемі (табл. 2) вартість заміни вимикачів внаслідок зростання рівнів струмів к.з. складає не менше 120 млн. дол. [9, 10, 11].

Схемні рішення, як правило, виконуються переходом від зв'язаних схем зі збірними шинами електроустановок до блокових або напівблокових схем, в узгодженні схем видачі потужності електростанцій зі схемами прилеглих мереж енергосистеми. Стаціонарне розділення електричної мережі

розукрупнює комутаційні вузли на безпосередньо не зв'язані електрично частини. Частіше всього схемні рішення застосовуються на двохтрансформаторних знижуючих підстанціях. Струмообмежуючий ефект тут носить локальний характер.

Негативний вплив стаціонарного розділення мережі полягає у порушенні природного потокорозподілу активної потужності. Це пов'язане зі зростанням втрат потужності та електроенергії у мережах. На рис. 2 приведений інтегральний розподіл можливих перетоків потужності через шиноз'єднувальні чи секційні вимикачі точок при ліквідації точок стаціонарного розділення мережі 110÷220 кВ (табл. 2) у РП відповідного класу напруги.

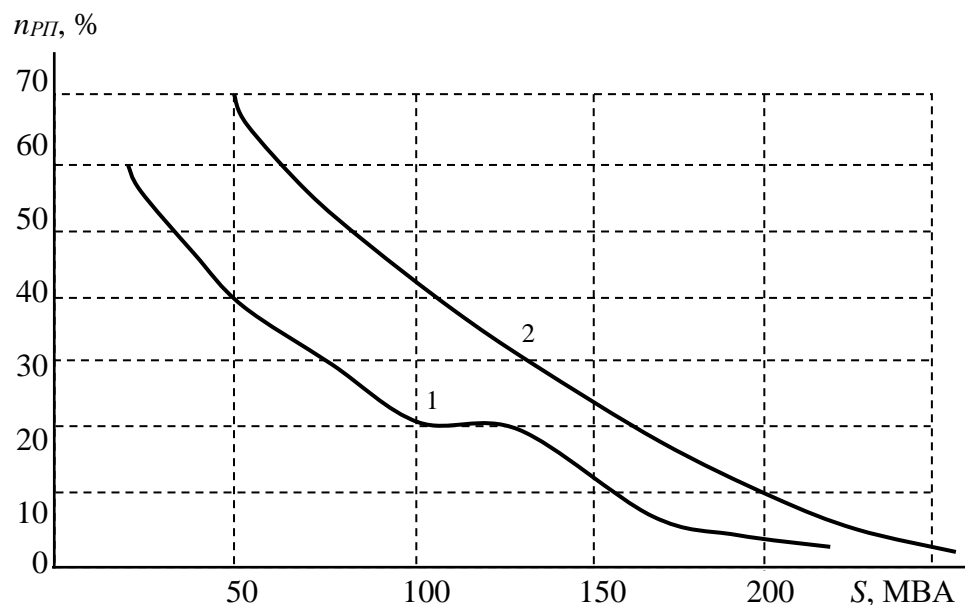


Рис. 2. Інтегральний розподіл перетоків потужності на шинах електроустановок

Як видно з рис. 2, значення перетоків потужності достатньо великі [12]. При розділенні мережі вони розподіляються не по збірним шинам електроустановок, які мають дуже малий опір, а по мережі енергосистеми. Однак, внаслідок відносно невеликих міжвузлових відстаней у мережі не виникає примітного зростання втрат потужності. Стаціонарне розділення

мережі у даній регіональній енергосистемі призводить до збільшення втрат активної потужності з 345 до 381 МВт у мережах 110 кВ і більше. Вартість втрат електроенергії в декілька раз менше витрат на заміну вимикачів з необхідними номінальними струмами відключення. Крім того, до уваги також слід приймати забезпечення електродинамічної стійкості трансформаторів і ошиновки РП.

Висновки. 1. Проаналізований стан проблеми обмеження струмів к.з. на прикладі умовної регіональної енергосистеми.

2. Особлива увага приділена ефективності розділення електричної мережі та схемним рішенням. Розглянуті недоліки та переваги цього методу. Доказано, що стаціонарне розділення електричної мережі об'єктивно є основним, найбільш ефективним методом обмеження рівнів струмів к.з.

Список літератури:

1. Рюденберг Р. Эксплуатационные режимы электроэнергетических систем и установок. Энергия, 2001. С. 2-5.

2. Ковалко М.П., Денисюк С.П. Енергозбереження – пріоритетний напрямок державної політики України. Київ, 1998. 512 с.

3. Крючков И.П. Переходные процессы в электроэнергетических системах. Издательский дом МЭИ, 2008. 416 с.

4. Пантелеева И.В. Воздействие токов короткого замыкания в сети с гибкими проводниками с учетом нелинейности системы. Системи озброєння і військова техніка. ХУПС, 2015. №4(44). С. 92-95.

5. Пантелеєва І.В. Особливості захисту від неповнофазних режимів у розподільчих мережах 6÷110 кВ. Prospects for The Development of Technical Sciences in EU Countries and Ukraine. Poland, 2018. С. 125-128.

6. Зарубіжний досвід енергетичної статистики міжнародних організацій (МЕА, Євростат, ООН). Нормативно-правове забезпечення та автоматизовані системи збору і оброблення інформації енергетичної статистики. Київ, 2015. URL:<https://ua.energy/wp-content/uploads/2018/01/5.-Statystyka-energetyky.pdf>.

7. [Електронний ресурс]. URL:<http://www.kmu.gov.ua/ua/npas/99242859>.
8. Державна служба статистики України. <http://ukrstat.gov.ua/>.
9. Шматько Н.М. Рекомендації щодо оцінки складових фінансового потенціалу гнучкості машинобудівного підприємства. Вісник НТУ «ХП», 2011. - № 25. – С. 79-85.
10. Корнєєв М.В., Шматько Н.М. Оцінка ефективності структурних трансформацій в процесі організаційного розвитку підприємства. Ефективна економіка, 2018. №8. URL:<http://www.kmu.economy.nauka.com.ua/?op=1@z=7222/>.
11. Лепейко Т.І., Шматько Н.М. Особливості прояву синергетичних ефектів в українській економіці. Бізнес Інформ=Business Inform, 2012. № 11. С. 6-8.
12. [Електронний ресурс]. URL:<http://www.energobalans.com/>.
13. Budanov P. Improvement of safety of autonomous electrical installations by implementing a method for calculating the electrolytic grounding electrodes parameters / P. Budanov, K. Brovko, A. Cherniuk, I. Pantielieieva, Yu. Oliynyk, N. Shmatko, P. Vasyuchenko//Eastern-european journal of enterprise technologies. 2018. 5/5 (95). P. 20-28.
14. Олійник Ю.С. Якість електричної енергії//Вісник Харківського національного технічного університету сільського господарства імені Петра Василенка. 2018. - №196. Технічні науки «Проблеми енергозабезпечення та енергозбереження в АПК України». С. 113-115.

Pantielieieva I.

Ukrainian Engineering Pedagogics Academy

THE PROBLEM OF COORDINATION OF SHORT CURRENT CURRENTS IN POWER SYSTEMS

Requirements for electric appliances, current-carrying parts, power transformers and switchgear designs become more stringent. There is a problem of optimal coordination in the dynamics of electrical equipment parameters and power system requirements or coordination of electrical equipment parameters

with the existing levels of s.c. currents. This problem should be solved on the basis of a systematic approach, taking into account the named dynamics, development of new types of equipment, as well as requirements for the reliability and economy of modes of operation of power systems. The problem is complex, multifaceted, and needs to be addressed in a number of related issues.

The need to limit s.c. currents may occur both at the stage of power plant design and during operation. In this case, the current limiting devices that are selected should not significantly affect the normal mode of operation of the electrical network, should have stable characteristics when changing the circuit and mode parameters.

The article deals with problems of coordination of parameters of electrical equipment with existing (or expected) values of short-circuit currents (s.c.). The dynamics of the levels of s.c. currents on the power grids of Ukraine is considered, as well as the dynamics of changing the largest levels of currents of switching off of switching devices.. Application of current limiting methods and methods of limiting currents s.c. The efficiency of the separation of the electrical network and the circuit solutions is considered in sufficient detail. The distribution of power fluxes on the busbars of electrical installations during network division is also analyzed.

The efficiency of stationary network separation is determined by the calculation of s.c. currents for the existing normal network circuit at maximum load and for the circuit where network separation is eliminated. The integrated distribution of s.c. currents over the nodes of the 110, 220 kV network of the averaged regional power grid is analyzed. The study of the obtained data reveals a number of regularities: the elimination of stationary separation points greatly increases the maximum s.c. currents. The increase is observed in the scheme with two partitioned busbar systems, as well as with the activation of two busbar and two section switches, and at the same time recharging of the s.c. point from the adjacent power unit, which also eliminates the points of stationary network separation.

The generalized current limiting effect was analyzed, and thirdly, due to the stationary separation of 20% of the largest switching units, it was possible to stabilize the s.c. currents up to 40 kA and to use electric devices with relatively low switching power and, respectively.

Key words: *short-circuit current (s.c.), power system, electrical network, switchgear, transformer, switch, power, busbar wiring.*