

Ю. О. Варецький¹
В. М. Горбань¹

ПЕРЕХІДНІ ПРОЦЕСИ В МЕРЕЖІ НИЗЬКОЇ НАПРУГИ, ВИКЛИКАНІ ЗБУРЕННЯМИ В СИСТЕМІ ЗОВНІШНЬОГО ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ

¹Національний університет «Львівська політехніка»

Досліджено особливості перехідних процесів в мережі низької напруги, викликані ввімкненнями конденсаторної батареї 10 кВ та однофазними замиканнями на землю у системі зовнішнього електропостачання промислового підприємства з частотно-регульованими електроприводами змінного струму. Показано, що під час цих перехідних процесів можуть виникати небезпечні перенапруги для перетворювачів частотно-регульованих електроприводів. Проаналізовано вплив конденсаторних установок низької напруги на рівень комутаційних перенапруг.

Ключові слова: перехідний процес, увімкнення конденсаторної батареї, однофазне замикання на землю, частотно-регульовані електроприводи змінного струму, комутаційні перенапруги.

Вступ

Значну частку навантажень систем електропостачання сучасних промислових підприємств складають частотно-регульовані електроприводи змінного струму (ЧРП), які вносять низку особливостей в експлуатацію електричних мереж. Як навантаження вони характеризуються значним споживанням реактивної потужності і спотворенням форми кривої струму в живильній мережі. З іншого боку — ЧРП є значно чутливішими до електромагнітних збурень, ніж інші електроприймачі через наявність напівпровідникових пристроїв у їхніх конструкціях.

Застосування конденсаторних батарей в електричних мережах систем електропостачання є широко розповсюдженою практикою покращення ефективності їх функціонування. Проте, конденсаторні батареї можуть спричиняти резонансні підсилення окремих гармонік струму, поглиблюючи спотворення напруг і струмів в електричних мережах з нелінійними навантаженнями. Тому при застосуванні конденсаторних батарей повинні враховуватися частотні особливості схем електропостачання. Процеси комутації конденсаторних батарей супроводжуються високочастотними коливаннями процесами, які можуть підсилюватися в різних частинах електричної мережі внаслідок резонансних властивостей кола живлення. Проблемі комутацій конденсаторних батарей в електричних мережах та їх впливу на рівень комутаційних перенапруг вже значний час приділяється багато уваги і, як показує аналіз опублікованих результатів досліджень [1—5], значною мірою характер цих процесів залежить від структури та особливостей роботи системи електропостачання.

В експлуатації досліджуваної авторами системи електропостачання, частину навантаження якої складають електроприводи змінного струму, часто виникали проблеми, пов'язані з порушеннями їх нормальної роботи, а іноді й вимкненнями від шин живлення. Помічено, що ці порушення часто збігаються з комутаціями конденсаторних батарей на шинах 10 кВ підстанції 110/10 кВ та іншими збуреннями в мережі зовнішнього електропостачання, яка живить підприємство. Для з'ясування можливості зв'язку цих явищ здійснено аналіз ймовірних факторів впливу на характер перехідних процесів.

Метою роботи є виявлення особливостей перебігу перехідних процесів у мережі низької напруги 0,38 кВ під час найчастіше повторюваних збурень у системі зовнішнього електропостачання (однофазних замикань на землю та увімкнень конденсаторної батареї в мережі 10 кВ).

Результати досліджень

На рис. 1а показано фрагмент досліджуваної системи електропостачання підприємства, що містить технологічні лінії з ЧРП, які живляться від шин 0,38 кВ трансформаторного пункту (ТП) 10/0,38 кВ. На головній підстанції встановлено два трансформатори ТДН-16000/110, від од-

ного з яких отримує живлення досліджуваній ТП. На секції шин 10 кВ головної підстанції встановлено конденсаторну батарею потужністю 3 МВА. Цех підприємства з'єднано з підстанцією кабельною лінією (КЛ) 10 кВ довжиною приблизно 2,2 км. На ТП встановлені дві конденсаторні установки потужністю 100 і 200 квар. Вони мають діапазони регулювання відповідно від 10 до 100 квар (два конденсатори по 10 квар і два по 40 квар) і від 10 до 200 квар (три конденсатори по 50 квар, два по 20 квар і один — 10 квар). Перемикання конденсаторів конденсаторних установок на підприємстві здійснюється автоматичними вимикачами, на які подаються сигнали керування від автоматичних регуляторів коефіцієнта потужності. Понад 70 % лінійного навантаження цеху складають асинхронні двигуни, $\cos \varphi$ навантаження становить приблизно 0,7.

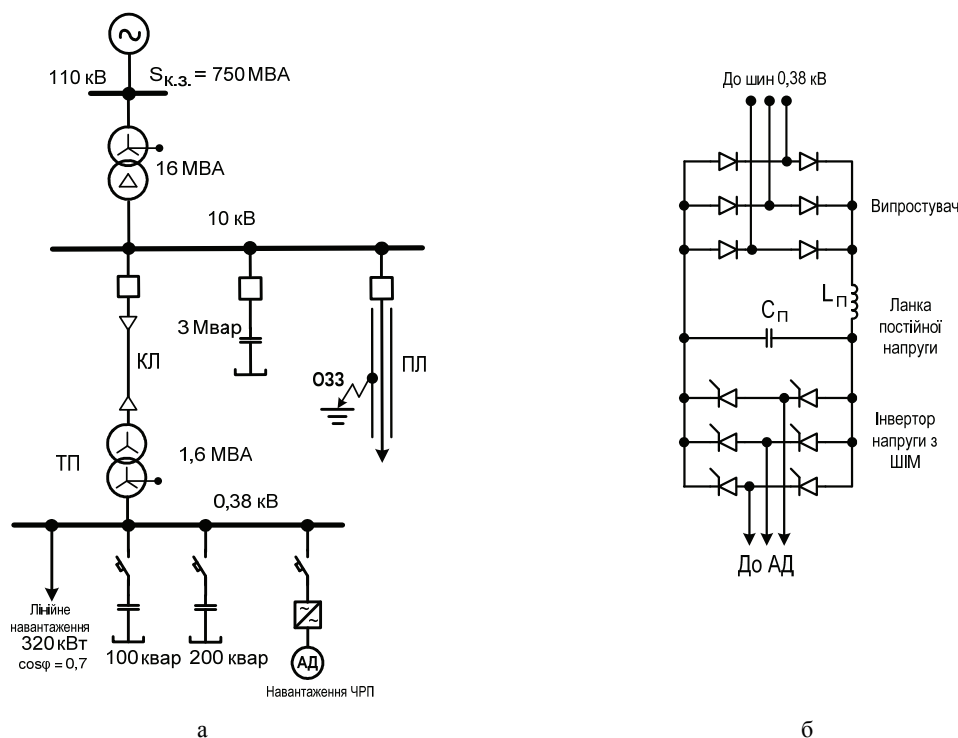


Рис. 1. Принципові схеми: а — системи електропостачання; б — частотно-регульованого електроприводу

У складі навантаження ТП значну частину займає нелінійне навантаження, яке складається з частотно-регульованих електроприводів з одиничними потужностями від 0,75 до 28 кВт. Сумарна потужність навантаження ЧРП становить 240 кВт. Типова схема ЧРП складається з чотирьох основних елементів: шестипульсного (регульованого чи нерегульованого) випростувача, кола постійного струму, інвертора (струму чи напруги) та асинхронного двигуна. Як правило для малопотужних низьковольтних електроприводів застосовують ЧРП з інвертором напруги та конденсатором у колі постійного струму. Це зумовлено вартісними характеристиками електроприводів. Ємність конденсатора $C_{\text{п}}$ вибирають з умови підтримування неперервності робочого процесу та забезпечення відповідного згладжування постійної напруги. Часто в колі постійного струму використовують реактор $L_{\text{п}}$ для зниження швидкості наростання струму через конденсатор і обмеження перенапруги на ньому під час увімкнення випростувача. Керування більшості інверторів цього типу ЧРП здійснюють на основі принципу широтно-імпульсної модуляції. Принципова схема застосовуваних на досліджуваному підприємстві частотно-регульованих електроприводів показана на рис. 1б.

Частотні перетворювачі під час роботи генерують вищі гармоніки струму в живильну мережу. В процесі роботи електроприводів змінюється сумарне навантаження вводу ТП, що спричинює зміну потужності приєднаних до шин 0,38 кВ конденсаторних установок внаслідок дії автоматичного регулятора коефіцієнта потужності. Зміна еквівалентної ємності цих конденсаторних установок є причиною підсилення окремих гармонік, що викликають перевантаження конденсаторів і збільшення несинусоїдності напруги на шинах ТП.

Увімкнення конденсаторної батареї 10 кВ

З метою аналізу впливу увімкнення конденсаторної батареї 10 кВ на рівень перенапруг на шинах 0,38 кВ здійснювалося моделювання комутаційних процесів у схемі системи електропостачання

ня. Розрахунки здійснено для різних комбінацій підключених до шин 0,38 кВ конденсаторів, що визначаються вимогами компенсації реактивної потужності.

На рис. 2 наведено модельні осцилограми напруг на елементах системи електропостачання під час увімкнення конденсаторної батареї 10 кВ, коли вимкнено конденсатори 0,38 кВ. Видно, що ввімкнення викликає перенапруги на шинах 10 кВ (амплітудне значення перенапруги 15 кВ) і на шинах 0,38 кВ (амплітудне значення перенапруги 571 В). Кратності перенапруг складають 1,84 на шинах 10 кВ та 1,84 на шинах 0,38 кВ (для номінальної напруги 10 кВ амплітудне значення фазної напруги дорівнює 8,15 кВ і для номінальної напруги 0,38 кВ амплітудне значення фазної напруги дорівнює 310 В). Для порівняння на рис. 3 показано осцилограми перехідних напруг у випадку підключення до шин 0,38 кВ конденсаторів потужністю 100 квар.

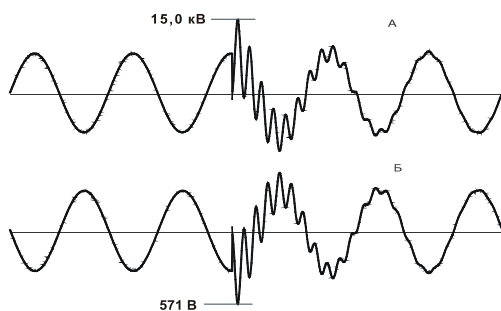


Рис. 2. Осцилограми фазних напруг на шинах:
А — 10 кВ; Б — 0,38 кВ при вимкнених конденсаторах 0,38 кВ

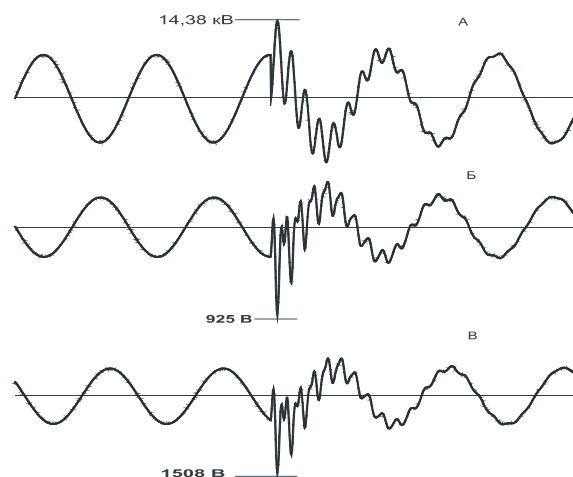


Рис. 3. Осцилограми фазних напруг на шинах:
А — 10 кВ; Б — 0,38 кВ; В' — лінійної напруги на конденсаторах 0,38 кВ (увімкнено конденсатори 0,38 кВ потужністю 100 квар)

Характер показаних на рис. 2 та рис. 3 осцилограм свідчить, що наявність косинусних конденсаторів на шинах 0,38 кВ суттєво підвищує кратність перенапруг на цих шинах. При цьому прослідковується певна тенденція залежності рівня перенапруг від ємності під'єднаних до шин 0,38 кВ конденсаторів. Результати дослідження впливу ввімкнення конденсаторної батареї 10 кВ на рівень перенапруг у електричній мережі наведено у табл.

Перенапруги на шинах електричної мережі при ввімкненні КБ 10 кВ

Потужність під'єднаних конденсаторів 0,38 кВ	Рівні/кратності перенапруг		
	Фазна напруга на шинах 10 кВ	Фазна напруга на шинах 0,38 кВ	Лінійна напруга на шинах 0,38 кВ
немає	15,0 кВ/1,84	571 В/1,84	983 В/1,83
50	14,9 кВ/1,82	752 В/2,4	1197 В/2,23
100	14,38 кВ/1,74	925 В/2,98	1508 В/2,81
150	14,56 кВ/1,78	992 В/3,2	1662 В/3,1
200	13,98 кВ/1,7	961 В/3,1	1597 В/3,0
250	14,32 кВ/1,73	868 В/2,8	1490 В/2,78
300	14,21 кВ/1,73	822 В/2,65	1419 В/2,64

Замикання на землю в мережі 10 кВ

Нестійкі замикання на землю в мережі 10 кВ можуть породжувати перенапруги кратністю до 3,2...3,4, що можуть передаватися в мережі напруги 0,38 кВ. Характер перехідних процесів значною мірою залежать від еквівалентної ємності мережі під час замикання на землю, наявності конденсаторних установок і їх потужності в мережах обох класів. Для моделювання процесу нестій-

кого замикання на землю використано модель, запропоновану у роботі [6]. Ця модель дає можливість генерувати вказані кратності перенапруг на шинах мережі 10 кВ з урахуванням частотних характеристик мережі.

На рис. 4 показано осцилограми перехідних напруг під час однофазного нестійкого замикання на землю в електричній мережі 10 кВ, коли вимкнено конденсаторну батарею 10 кВ. Рис. 5 ілюструє перебіг перехідних процесів у мережі з під'єднаною конденсаторною батареєю 10 кВ.

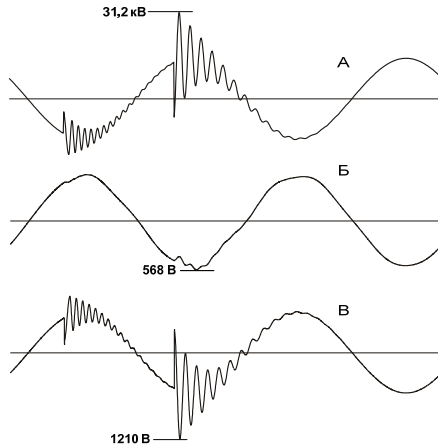


Рис. 4. Осцилограми лінійної напруги на шинах:
А — 10 кВ; Б — 0,38 кВ з конденсаторами 200 квар;
В — без конденсаторів.
Конденсаторна батарея 10 кВ вимкнена

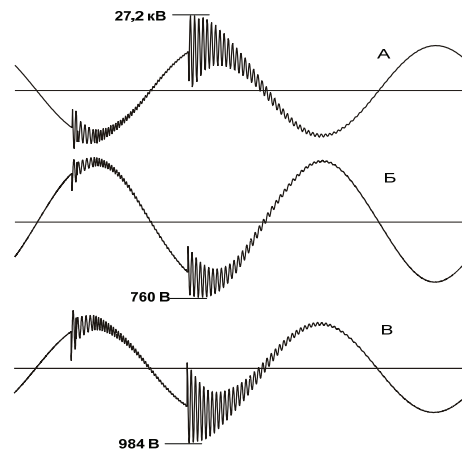


Рис. 5. Осцилограми лінійної напруги на шинах:
А — 10 кВ; Б — 0,38 кВ з конденсаторами 200 квар;
В — без конденсаторів.
Конденсаторна батарея 10 кВ увімкнена

Порівняння наведених осцилограм дозволяє стверджувати, що незалежно від частоти перехідного процесу наявність косинусних конденсаторів 0,38 кВ зменшує амплітуди перенапруг на шинах низької напруги ТП.

Вплив на роботу ЧРП

Як показали дослідження, увімкнення конденсаторних батарей на шинах 10 кВ живильної підстанції та нестійкі замикання на землю в мережі 10 кВ є причиною виникнення значних перенапруг в мережі низької напруги. Причому кратності цих перенапруг в мережі низької напруги можуть бути більшими, ніж у мережі високої напруги. Особливі проблеми у цьому випадку можуть виникати для чутливих електроприймачів у мережі низької напруги, зокрема тих, що містять напівпровідникові перетворювачі. Як уже зазначено, в аналізованій мережі 0,38 кВ промислового підприємства експлуатуються значна кількість ЧРП, виконаних за схемою рис. 1б. У схемах таких ЧРП застосовують захисне вимкнення перетворювачів при перенапругах на згладжувальному конденсаторі C_{Π} в колі постійного струму, які перевищують номінальну в 1,3...1,4 рази. Це призводить до вимкнення приводу і, як наслідок, до порушення технологічного процесу підприємства. На рис. 6 показано осцилограми перехідних напруг на згладжувальному конденсаторі C_{Π} під час деяких досліджуваних збурень. Штриховою лінією на осцилограмах рис. 6 показано рівень спрацювання захисту перетворювача.

Тут потрібно зазначити, що під час замикань на землю в мережі 10 кВ косинусні конденсатори дозволяють суттєво знизити рівень перенапруг в мережі низької напруги. Це зменшує ймовірність вимкнень ЧРП.

Аналізуючи характер перехідних процесів у мережі низької напруги під час увімкнень конденсаторної батареї 10 кВ, бачимо що наявність косинусних конденсаторів призводить до зворотного ефекту. Вони є причиною підсилення перенапруг в мережі низької напруги. Причому кратність

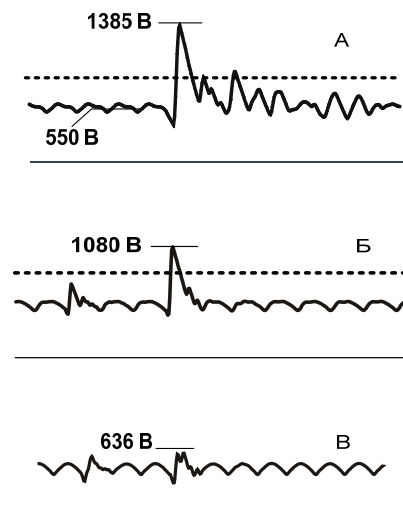


Рис. 6. Осцилограми напруг на конденсаторі C_{Π} :
А — увімкнення конденсаторної батареї 10 кВ;
Б — замикання на землю в мережі 10 кВ без КБ;
В — замикання на землю в мережі 10 кВ з КБ

перенапруг в мережі низької напруги залежить від ємності цих конденсаторів, але завжди є вищою ніж у мережі високої напруги. Тому ймовірність аварійних вимкнень перетворювачів ЧРП під час увімкнень конденсаторної батареї 10 кВ є дуже високою.

Висновки

Здійснено аналіз процесів у мережі низької напруги промислового підприємства під час увімкнення конденсаторної батареї та замикань на землю у мережі зовнішнього електропостачання 10 кВ. Проаналізовано вплив на рівень перехідних перенапруг параметрів системи електропостачання та косинусних конденсаторів у мережі низької напруги. Показано, що під час замикань на землю в мережі 10 кВ косинусні конденсатори дозволяють суттєво знизити рівень наведених перенапруг в мережі низької напруги.

Під час увімкнень конденсаторної батареї 10 кВ наявність косинусних конденсаторів спричиняє ефект резонансного підсилення перенапруг в мережі низької напруги. Кратності перенапруг в мережі низької напруги залежать від співвідношення між параметрами трансформаторів і конденсаторних установок в мережах обох класів і можуть спричинити при певних комбінаціях підключених до шин 0,38 кВ конденсаторів вимкнення чутливих електроприймачів внаслідок виникнення небезпечних перенапруг.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Skeans W. Recent developments in capacitor switching transients reduction / W. Skeans // T&D World exposition substation section. — March 30, 1995. — P. 1—12.
2. Adams R. A. Solving customer power quality problems due to voltage magnification / R. A. Adams, S. W. Middlekauff // IEEE/PES Winter meeting, February 1—5, 1998. — P. 1—6.
3. Girgis F.A. at all. Harmonics and transient overvoltages due to capacitor switching / F. A. Girgis // IEEE Trans. on IA. — 1993. — Vol. 29, № 6. — P. 1184—1188.
4. Grebe T. E. Application of distribution capacitor banks and their impact on power quality / T. E. Grebe // IEEE Trans. on IA. — 1996. — Vol. 32, № 3. — P. 714—719.
5. Varetsky Y., Pavlyshyn R., Taran I. Transients due to capacitor switching in industrial supply system / Proc. of VII Science-Technical Conference SIECI-2012, Szklarska Poreba, Poland, Paper 4.5. — P. 1—6.
6. Беляков Н. Н. Исследование напряжений при дуговых замыканиях на землю в сетях 6—10 кВ / Н. Н. Беляков // Электричество. — 1957. — №. 5. — С. 31—36.

Рекомендована кафедрою електричних станцій і систем ВНТУ

Стаття надійшла до редакції 17.11.2015

Варецький Юрій Омелянович — д-р техн. наук, професор, професор кафедри «Електричні системи і мережі»,

e-mail: j.varetsky@gmail.com;

Горбань Віталій Мар'янович — аспірант кафедри «Електричні системи і мережі».

Національний університет «Львівська політехніка», Львів

Yu. O. Varetskyi¹
V. M. Gorban¹

Transients within Low Voltage Network Caused by Disturbances in External Power Supply System

¹National University Lviv Polytechnic

Characteristics of transients within low voltage network caused by switching 10 kV capacitor battery and single phase ground faults on the external power system supplying an industrial plant containing AC variable speed drives (VSD) are studied. There has been shown the possibility of dangerous overvoltages for VSD converter during the transients. Impact of low voltage capacitor installations on the overvoltage levels has been analyzed in the paper.

Keywords: transient, capacitor battery switching, single phase ground fault, AC variable speed drives, switching overvoltages.

Varetskyi Yuri O. — Dr. Sc. (Eng.), Professor, Professor of the Chair of Electrical Systems and Networks, e-mail: j.varetsky@gmail.com;

Gorban Vitalii M. — Post-Graduate Student of the Chair of Electrical Systems and Networks

Ю. Е. Варецкий¹
В. М. Горбань¹

Переходные процессы в сети низкого напряжения, вызванные возмущениями в системе внешнего электроснабжения

¹Национальный университет «Львовская политехника»

Исследованы особенности переходных процессов в сети низкого напряжения, вызванные включениями конденсаторной батареи 10 кВ и однофазными замыканиями на землю в системе внешнего электроснабжения промышленного предприятия с частотно-регулируемыми электроприводами переменного тока. Показано, что в течение переходных процессов могут возникать опасные перенапряжения для преобразователей частотно-регулируемых электроприводов. Проанализировано влияние конденсаторных установок низкого напряжения на уровень коммутационных перенапряжений.

Ключевые слова: переходный процесс, включение конденсаторной батареи, однофазное замыкание на землю, частотно-регулируемые электроприводы переменного тока, коммутационные перенапряжения.

Варецкий Юрий Емельянович — д-р техн. наук, профессор, профессор кафедры «Электрические системы и сети», e-mail: j.varetsky@gmail.com;

Горбань Виталий Марьянович — аспирант кафедры «Электрические системы и сети»