

ИЗСЛЕДВАНЕ НА ПРЕХОДНИТЕ ПРОЦЕСИ ПРИ КОМУТИРАНЕ НА КОНДЕНЗАТОРНИ БАТЕРИИ

Иван Стоилов, Диана Ташева, Кирил Джустров

Минно-геоложки университет "Св. Ив. Рилски", 1700 София

РЕЗЮМЕ: Включването и изключването на кондензаторни батерии за компенсиране на реактивната мощност води до поява на преходни процеси, при които протичат големи ударни токове и се генерират пренапрежения. Това създава опасност от повреди в кондензаторните батерии, комутационните апарати и другите електрически съоръжения.

В доклада се разглеждат резултатите от експериментални изследвания на преходните процеси при комутиране на кондензаторни батерии, монтирани в разпределителната уредба 6kV на рудничен комплекс "Елаците". Токовете и напреженията на трите фази са регистрирани в цифров вид при комутиране на кондензаторни батерии с маломаслени прекъсвачи и елегазови контактори. Обработката на информацията е осъществена в средата на MATLAB. За получаване на преходните процеси в "изчистен" вид са отстранени периодичните съставни на установения ток, с разработена оптимизационна програма. Определени са максималните амплитудни стойности на ударния ток, честотата, времената за установяване и др. Регистрирани са нивата на пренапреженията върху кондензаторните батерии при включване и изключване. Резултатите са използвани за преценка на необходимостта от ограничаване на ударните токове с оглед електрическата износостойчивост на приложените комутационни апарати.

STUDING THE TRANSIENT PROCESSES OF THE COMUTATION OF CAPACITOR BATTERIES

Ivan Stoilov, Diana Tasheva, Kiril Dzhustrov

University of Mining and Geology "St. Ivan Rilski" – Sofia

ABSTRACT: The switching on and off of capacitor banks of power factors compensating circuit results in the origination of transitional processes, which are accompanied with high inrush current and generation of over-voltage. This means risk of faults in the capacitor banks commutation apparatuses and the other electrical devices.

Results have been discussed based on the experiments on transitional processes of the commutation of capacitor batteries, installed at the 6 kV distribution network of the "Elacite" mining company. Currents and voltage of the three phases have been registered digitally after the commutation of capacitor batteries with oil circuit-breakers and contactors uses SF₆ gas for insulation and circuit breaking. Processing of the information has been performed in the medium of MATLAB. For obtaining the transitional processes in a "pure" type, the periodical components of the current have been removed by an optimizing software program. The maximum amplitude values of the impact current, frequency, periods of time etc. The levels of the over-voltage on the capacitor batteries in case of switching on and off have been registered. Results have been used for an assessment of the need for limiting the impact current with the aim of improving the electrical wearing capacity of applied commutation apparatuses.

Увод

За ефективно използване на електрическата енергия, промишлените предприятия е необходимо да реализират средномесечен фактор на мощността $\cos \varphi \geq 0,9$.

Открития рудник "Елаците" се характеризира с рязко променлив активен товар и ниска стойност на естествения фактор на мощността, което налага компенсирането му с кондензаторни батерии. Съществуващата уредба бе реализирана в централната разпределителна подстанция на напрежение 6 kV и включваше две секции с мощност 750 kVAr и 1650 kVAr. Комутацията се извършваше ръчно с български маломаслени прекъсвачи от серия А. През 2004 г. в ЦРП 110/6kV на рудника е внедрена микро-процесорна система за контрол и управление на електропотреблението, в която има модул за реализиране на автоматично управление на кондензаторни батерии (Стоилов и др., 2004). За вземане на обосновано техническо решение по отношение на новите комутационни

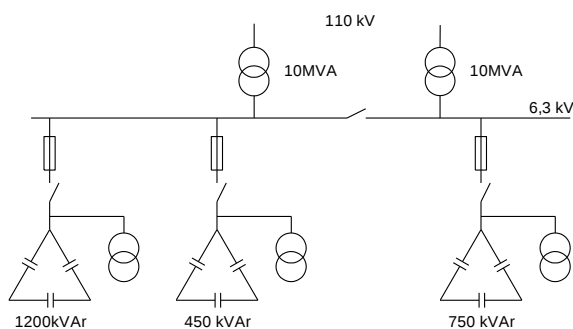
апарати бяха проведени експериментални изследвания на преходните процеси при комутиране на съществуващите кондензаторни уредби.

Известни са проблемите с ударния ток при включване на кондензаторни батерии и те са предмет на множество изследвания (Adly et al. 1993, Kojovic et Falcao 2001, Bansode 2003, Liu et Chen 1998). Големите стойности на ударния ток в съчетание с по-високата му честота (300÷1000Hz) води до много по-интензивно износване на контактните тела на комутационния апарат. Ударният ток нараства многократно при включване на кондензатори паралелно на други вече включени кондензаторни батерии. Повечето изследователи (Koch 2000) препоръчват в тези случаи да се използват индуктивности за ограничаване на големината на ударния ток. Разработват се и специални хибридни прекъсвачи, които да ограничават големината на ударния ток (Witte et al. 2005).

Проблемите при изключване на кондензаторни батерии, особено когато част от тях остават включени, са свързани

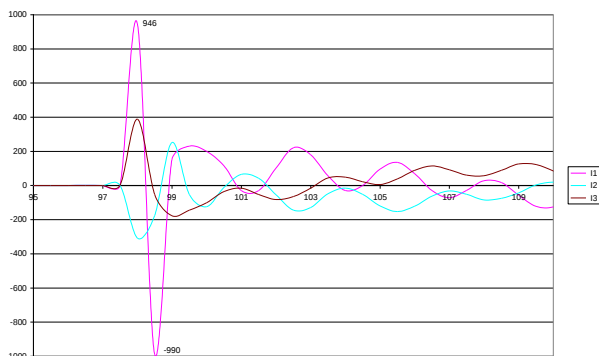
с възможността за повторно зареждане на дъгата и поява на значителни пренапрежения.

Анализът на резултатите от изследванията на преходните процеси при комутация на кондензаторните батерии спомогна за оптималния избор на комутационните апарати на реконструираната уредба, чиято опростена схема е представена на фиг. 1. Кондензаторните батерии се управляват от елегазови контактори "Rollarc-400D" в комбинация с токоограничаващи предпазители "Fusarc CF". Монтиране на индуктивности за ограничаване на ударния ток не е необходимо.



Фиг. 1. Опростена схема на кондензаторната уредба

Тъй като характерът на преходните процеси зависи и от конструкцията на комутационните апарати бяха проведени измервания на реконструираната кондензаторна уредба. С цифров уред "Multiver 3SN" са регистрирани тока и напреженията в трите фази. Токът се измерва директно с амперклепци, а напреженията са заснети от измервателните трансформатори към всяка от батериите. Преходният процес на тока при включване на батерия 750 kVAr паралелно на вече включени батерии 1200 kVAr и 450 kVAr е представен на фиг. 2.



фиг. 2. Преходен процес на тока

Обработка на данните от експерименталните изследвания

Регистрираните изменения в стойностите на тока при включване на кондензаторни батерии се дължат на наслагване на два процеса:

- установен колебателен, предопределен от захранващото напрежение;
- преходен, активиран от включването на кондензаторните батерии.

Въпреки че в множество публикации обект на изследване са характеристиките на този обобщен процес, той не може

да бъде считан за показателен, тъй като силно зависи от момента на включване на кондензаторните батерии. Затова се постави задачата да се изолира и изследва само "чистия" преходен процес. Решаването и обхвана следните три етапа:

Числово моделиране на установения колебателен процес.

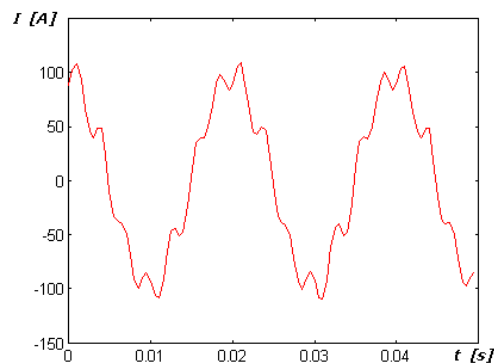
Дискретното описание на установения колебателен процес има вида:

$$A_1 \sin(w_1 i T_0) + A_2 \sin(w_2 i T_0) + \dots + A_n \sin(w_n i T_0), \\ i = 0, 1, \dots, q,$$

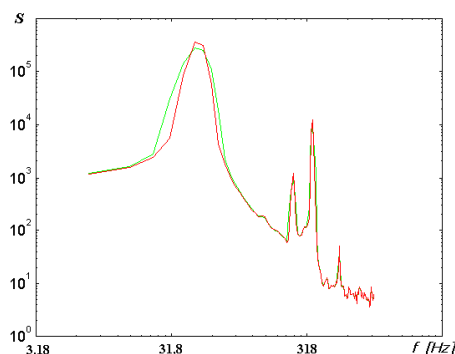
където $A_1, A_2, \dots, A_n$ са амплитудите, а $w_1, w_2, \dots, w_n$ честотите на хармоничните съставни на колебателния процес. Интервалът на дискретизация T_0 съвпада с този на проведените експериментални изследвания, а q определя продължителността на времевия интервал, в който е необходимо извършване на числова симулация на колебателния процес.

Чрез спектрален анализ за всеки експеримент са определени броят на хармоничните съставни в установения колебателен процес, техните честоти и амплитуди. Използвани са данните получени след затихване на преходния процес в резултат на включване на кондензаторните батерии.

Като пример на фиг. 3 е представена извадка от установения колебателен процес на ток I_1 при изследване влиянието от включване на кондензаторна батерия 750 kVAr. На фиг. 4 е показана спектралната плътност S за същия процес, като двете характеристики са получени при използване на корелационни прозорци на Бартлет и Хеминг.



фиг. 3. Извадка от установения процес



фиг. 4. Спектрална плътност на установения колебателен процес

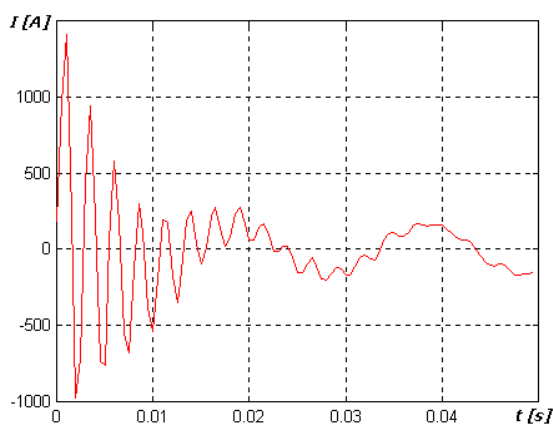
В случаят за съществени могат да се приемат три хармонични съставни, съответно с честоти: 50.2880, 255.9540 и 352.1519 Hz.

Отстраняване влиянието на колебателния процес.

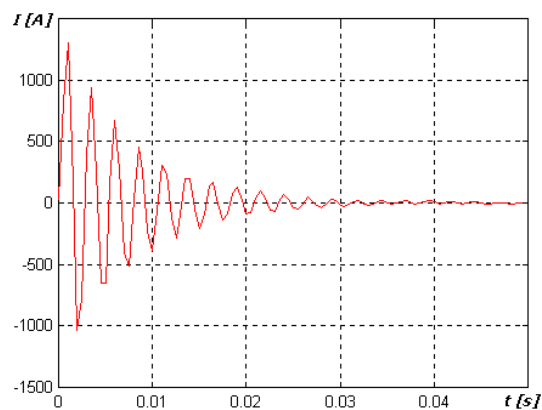
Директното изваждане на симулирания колебателен процес от експерименталните данни е невъзможно, тъй като включването на кондензаторните батерии се извършва в случаен момент от време. Следователно преди изваждането трябва да се оредели номерът на дискретата от развитието на колебателния процес, съответстваща на момента на включване. При правилното и определяне, след изваждане на двата процеса, ще се получи "чистия" преходен процес, който за време $T_y = pT_o$, затихва при стойност 0. Този факт е използван при разработване на алгоритъма и програмата за определяне на относителното изместване на момента на включване спрямо нулевия момент от развитие на установения колебателен процес. По същество те представляват оптимизационна процедура в която управляващ фактор се явява номерът на дискретата k от описанието на колебателния процес, която се приема за начална спрямо момента на включване на кондензаторните батерии. Възприет е интегрален квадратичен критерий за оптималност $Q = \sum_{i=2}^N [e(iT_o)]^2$, където с $e(t)$

е означен процесът получен след изваждането на колебателния процес от експерименталните данни. На него е търсен минимум. Целенасочено формирането на критерий се извършва на база на данните от момент $2T_y$ до продължителността на наблюдението NT_o , тъй като преди получаване на "чистия" преходен процес не може точно да бъде определено времето за затихването му T_y .

Ефектът от работата на оптимизационната програма е илюстриран на фиг. 5 и 6, където са представени експериментално получените данни за изменението на ток при включване на кондензаторна батерия 750 kWAr и "изчистения" преходен процес.



Фиг. 5. Експериментални данни за изменението на тока



Фиг. 6. "Изчистен" преходен процес

Определяне характеристиките на чистия преходен процес

За преходните процеси, получени след отстраняване на съответните периодични съставни от експерименталните данни са определени:

време за установяване t_0 ;

честота f_0 ;

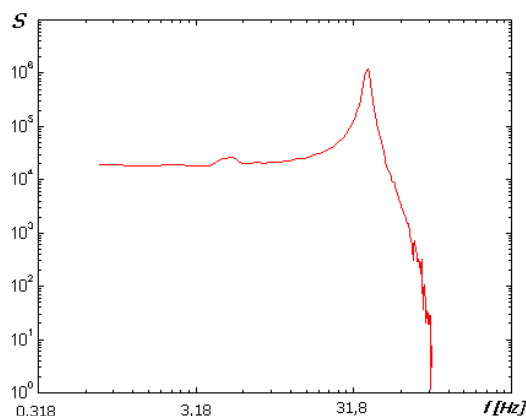
максимална амплитуда I_m ;

коефициент на затихване $\alpha = \frac{\ln\left(\frac{a_1}{a_3}\right)}{T}$;

скорост на затихване $\nu = \left|\frac{a_1}{a_2}\right|$.

С a_1 , a_2 и a_3 са означени стойностите на трите последователни оптимума от развитието на преходната характеристика.

За достигане на по-висока точност честотата (респективно периодът T) не са определяни пряко, а чрез използване на средствата на спектралния анализ. Графиката на спектралната плътност за "изчистения" преходен процес е представена на фиг. 7.



Фиг. 6 Спектрална плътност на преходния процес

Разработеното специализирано програмно осигуряване и цялостната обработка на експерименталните данни са реализирани в средата на MATLAB.

Резултати от изследванията

Установен режим

Изследванията на установения ток за кондензаторните батерии с мощност 750 kVAr и 1650 kVAr, комутирани с маломаслени прекъсвачи показваха наличие на 5-ти и 7-ми хармоник, като по-силно изразен е седмия.

С промяната на конфигурацията на кондензаторните уредби (разделянето на батерията 1650 kVAr на две отделни - 1200 kVAr и 450 kVAr) се регистрираха и нови хармонични съставлящи. Макар и с незначителни стойности при част от измерванията освен 5-ти и 7-ми хармоник са регистрирани 3-ти, 9-ти, 11-ти и 13-ти хармоник в тока на батерията. Тези хармонични съставлящи нямат практическо значение. От предишни измервания (Стоилов и др., 2005), е установено, че кондензаторните батерии не се претоварват по ток от висши хармоници над допустимия - $1,3I_C$. Кривата на напрежението не е деформирана, тъй като мощността на късо съединение в точката на монтиране на кондензаторните батерии е много голяма.

Преходни процеси

Резултатите от преходните процеси при комутиране на кондензаторните батерии с български маломаслени прекъсвачи от серията А са дадени в Таблица 1.

Таблица 1.

Комутиране на батериите с маломаслен прекъсвач

№	I	I_m, A	f_0, Hz	$t_{0..}, ms$	α	v
Батерия 750 kVAr						
1	I_1	387	375	27,8	205,4	2,86
	I_2	1308	341	32,4	509,6	9,27
	I_3	1580	568	26,9	935,0	5,58
2	I_1	826	352	26,4	250,0	6,72
	I_2	405	354	32,0	297,0	2,67
	I_3	963	330	21,8	1158,0	12,50
Батерия 1650 kVAr						
1	I_1	689	382	44,0	48,0	1,14
	I_2	635	382	44,0	88,5	1,37
	I_3	1323	385	33,8	86,1	1,28
2	I_1	804	392	43,3	85,7	1,16
	I_2	515	385	39,0	86,7	1,38
	I_3	1304	392	38,4	83,4	1,26
3	I_1	1396	329	23,4	462,7	8,30
	I_2	1032	329	49,6	139,5	1,97
	I_3	1694	335	34,9	212,8	2,74

Максималните кратности са изчислени като за всяка батерия е определена най-голямата стойност на ударния ток I_m и към него е добавена амплитудната стойност на номиналния ток на батерията:

$$K_{\max} = \frac{I_m + \sqrt{2}I_C}{\sqrt{2}I_C},$$

където I_C е номиналната ефективна стойност на тока на батерията.

Максималната кратност на ударния ток, която е регистрирана е за батерията 750kVAr е 17,4, а за батерията 1650kVAr е 8,9. Времето за достигане на първия екстремум е в интервала 0,5÷1,5 ms. Собствената честота

в преобладаващите случаи е в границите 330÷390 Hz. Времето за затихване на преходния процес за батерията 750 kVAr е в границите 21,8÷32,4 ms, а при 1200 kVAr – 23,4÷49,6 ms.

При комутиране на кондензаторните батерии с елегазовите контактори "Rollarc-400D", значителни изменения в изследваните параметри не се забелязват (таблица 2).

Таблица 2.

Комутиране на батериите с елегазов контактор.

№	I	I_m, A	f_0, Hz	$t_{0..}, ms$	α	v
Батерия 450 kVAr						
1	I_1	1130	-	12,2	1332	5,34
	I_2	1700	-	10,8	963	6,87
	I_3	1087	-	14,5	212	14,9
2	I_1	252	346	19,9	161	8,10
	I_2	1637	-	15,4	1641	4,16
	I_3	153	365	26,4	320	1,07
3	I_1	52	659	21,0	135	1,14
	I_2	505	647	16,5	207	2,26
	I_3	401	635	18,4	228	1,6
Батерия 750 kVAr						
1	I_1	1627	346	21,6	625	3,10
	I_2	1179	372	22,2	186	5,75
	I_3	1688	352	27,3	546	2,32
Батерия 1200 kVAr						
1	I_1	636	385	40,2	86,5	1,37
	I_2	324	437	41,8	137,4	1,18
	I_3	911	429	36,4	4,7	1,06
2	I_1	160	421	34,6	171,5	1,21
	I_2	872	437	35,9	60,9	1,24
	I_3	832	437	35,9	92,9	1,39
Включване на 750 kVAr при включени 450 kVAr и 1200 kVAr						
1	I_1	776	340	20,5	740	5,11
	I_2	262	359	47,2	240	1,26
	I_3	683	359	25,3	813	1,68
2	I_1	516	359	32,5	462	2,69
	I_2	1776	-	24,1	302	6,08
	I_3	1030	365	31,3	851	3,00
3	I_1	111	346	45,0	315	1,22
	I_2	1405	371	29,1	234	2,15
	I_3	1622	340	28,4	1121	9,07
4	I_1	1013	372	30,7	548	6,05
	I_2	357	378	30,4	218	1,87
	I_3	459	358	31,6	363	6,59

Максималните кратности, които бяха регистрирани са както следва:

- за батерия с мощност 450 kVAr – $K_{\max} = 30,3$
- за батерия с мощност 750 kVAr – $K_{\max} = 18,4$
- за батерия с мощност 1200 kVAr – $K_{\max} = 6,9$

Тези данни кореспондират с публикуваните от Koch (2000) кратности на ударния ток в зависимост от мощността на батерията и мощността на късо съединение в точката на присъединяването и.

При комутирането на батерията 750 kVAr при включени - батерии 1200 kVAr и 450 kVAr не се забелязва значително - увеличение на пиковия ток. Максималната регистрирана кратност е 19,3. Това може да се обясни със сравнително високата индуктивност на връзката между отделните батерии.

От получените резултати се вижда, че максималната регистрирана стойност на пиковия ток е 1776 A (получена при включване на батерия 750 kVAr при включени батерии 450 kVAr и 1200 kVAr). При наслагване с максималната стойност на тока на батерията ($\sqrt{2}I_c$) се очаква, че максималната стойност на ударния ток, комутирани от контакторите "Rollarc R400D" в случая ще бъде 1873 A и не надхвърля 2000A. Това означава, че решението да не се използват индуктивности за ограничаване на ударния ток е правилно. Производителите (Catalogue Schneider Electric – Merlin Gerin, 1998) гарантират електрическа износоустойчивост на контакторите "Rollarc" 300000 комутационни цикъла при стойност на ударния ток 2000 A със собствена честота по-малка или равна на 1600 Hz. Заслужава да се отбележи фактът, че при двойно увеличаване на комутирания ударен ток, броят на комутационните цикли намалява 6 пъти.

Времето за достигане на максималната амплитуда не надхвърля 2 ms.

Собствената честота на преходния процес

$$f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{L_0C}}$$

очевидно се определя основно от

индуктивността L_0 на източника на напрежение (трансформатор 110/6kV – 10MVA), тъй като при отделните батерии тя не се различава значително. Преобладаващите честоти са в границите на 340-440 Hz. Изключение прави едно измерване при включване на кондензаторна батерия 450 kVAr, където преходния процес е протекъл с честота около 650 Hz.

Сравнително ниските собствени честоти на преходния процес са предпоставка за намалено износване на контактните тела.

Резултатите от проведените изследвания на преходните процеси на ударния ток при включване на кондензаторни батерии дават основание да се твърди, че дори и при най-тежките експлоатационни режими контакторите "Rollarc R400D" ще са в състояние да реализират каталожния брой комутационни цикли.

Регистрираните стойности на ударния ток при включване не са опасни и за кондензаторите. При тях е важно ударният ток никога да не надхвърля 100 пъти номиналния им ток. При кратности $30 I_c$, кондензаторите могат да поемат това натоварване 100000 пъти годишно. Следователно не е необходимо да се инсталират индуктивности за ограничаване на ударния ток през кондензаторите.

При включване и при изключване на кондензаторните батерии се генерират и пренапрежения. Максималните кратности спрямо номиналното напрежение, които са регистрирани към страната на кондензаторните батерии са както следва:

при включване - $K=1,16$;
при изключване - $K=1,28$.

Тези стойности на пренапреженията не представляват опасност за кондензаторите и останалите апарати в подстанцията. Възприетата от "Merlin Gerin" технология за комутиране в елегазова среда (SF6) при относително ниско налягане (по-малко или равно на 2,5 bar) осигурява изключване на капацитивния ток без повторно запалване на дъгата и съответно няма опасност от високи стойности на пренапреженията.

Изводи

1. Получени са експериментални данни за ударния ток и пренапреженията при комутиране на кондензаторни батерии на средно напрежение.
2. Чрез средствата на спектралния анализ са определени хармоничните съставни на установения ток и честотата на преходните процеси.
3. Предложен е оригинален подход при обработка на данните от измерванията, позволяващ елиминирание на периодичната съставна на установения ток и намиране на "изчистен" преходен процес. Той е реализиран програмно в средата на MATLAB. Определени са основни характеристики на "изчистените" преходни процеси. Прилагането на този подход позволява точното определяне на максималния ударен ток и се явява предпоставка за по-ефективен анализ на условията на работа на комутационната апаратура и кондензаторите.
4. Установено е, че за конкретната кондензаторна уредба не е необходимо да се въвеждат допълнителни индуктивности, тъй като ударният ток не е опасен за комутационните апарати и кондензаторите.
5. Комутирането на кондензаторни батерии с елегазови контактори "Rollarc" изключва възможността за поява на опасни пренапрежения.

Литература

- Стоилов, И., К. Джустров, М. Ментешев. 2004. Едно нетрадиционно решение за управление на реактивната енергия в рудник "Елаците". *Годишник на МГУ "Св. Иван Рилски"*, т.47, св. III, 77-80.
- Стоилов, И., К. Джустров. 2005. Изследване на висшите хармоници в електрическите мрежи на минни предприятия. *Енергиен форум 2005*, том 2, 213-226.
- Adly, A., C. Fallon, J. Rubino, R. Catoe. 1993. Harmonics and Transient Overvoltages Due to Capacitor Switching. *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 29, No 6, 1184-1188.
- Bansode, V. 2003. Testing Measurements and Analysis of Transient Characteristics in Power System. *IEEE Bologna PowerTech Conference*.
- Koch D., 2000. Control Equipment for MV Capacitor Banks. *Cahier Technique Merlin Gerin*, No 142, 1-19.
- Catalogue Schneider Electric – Merlin Gerin, 1998, Rollarc R400-R400D contactor.
- Kojovc, L., N. Falcao, 2001. Application of Three-Phase Vacuum Reclosers for Capacitor Bank Switching. *IPST'01 Rio de Janeiro, Brazil*, Paper 121, 1-7.

Liu, K.-C., N. Chen. 1998. Voltage-peak synchronous closing for shunt capacitors. *IEEE Proc. Gener. Transm. Distrib.* vol. 145, No 3, 233-238.

Witte, J. , P. DeCesaro , R. Mendis. 1994. Damaging Long-Term Overvoltages on Industrial Capacitor Banks due to Transformer Energization Inrush Currents. *IEEE*

Transactions on Industry Applications, vol. 30, No 4, 1107-1115.

Wu, Jinn-Chang, Hurng-Liahng Jou, Kuen-Der Wu, Nan-Tsun Chen. 2005. Hybrid Switch to Suppress the Inrush Current of AC Power Capacitor. *IEEE Transactions on Power Delivery*. Vol 20, No 1, 506-511.

Препоръчана за публикуване от
Катедра "Електрификация на минното производство", МЕМФ