

三相四桥臂动态无功补偿器仿真研究

刘永超¹, 杨振宇¹, 姚 军², 赵剑锋¹

(1. 东南大学 电气工程系, 江苏 南京 210096; 2. 泰州供电公司, 江苏 泰州 225300)

摘要: 提出采用三相四桥臂结构的逆变器实现三相四线制系统中的无功补偿。实现方法是: 应用瞬时无功功率理论, 在三相三线制系统中应用的电流检测法基础上, 提取零线电流后用于三相四线制系统, 并给出了理论推导和实现方法; 再给出利用空间矢量法产生触发脉冲的方法; 最后用 PSCAD 仿真软件搭建了系统仿真图, 设计了控制策略, 在三相四线制下对容性、感性及整流桥等负载情况进行了无功补偿仿真, 仿真结果验证了控制算法的可行性。

关键词: 三相四桥臂; 无功补偿; i_p 、 i_q 检测法; 空间矢量法

中图分类号: TM 714.3

文献标识码: A

文章编号: 1006-6047(2006)11-0024-04

三相三线制的静止无功发生装置已经得到较为广泛的应用, 但对于无功源集聚的配电网侧而言, 通常采用的都是三相四线制线路结构^[1-3]。除三相线路中的无功需要补偿外, 零线中不为零的电流也需要补偿, 使零线电流为零以保证零线的正常工作^[4], 三相四线制动态无功发生装置不但解决了由零线电流引起的一系列问题, 还能同时解决电网无功补偿和谐波的抑制问题, 但目前对它的研究还不成熟, 对于控制策略等诸多方面还有待于进一步研究。因此, 对它的研究具有重大的现实意义。在三相四线制系统中, 根据对零线电流补偿方法的不同, 动态无功补偿器的主电路有四桥臂变流器和三桥臂变流器 2 种不同的方式。本文之所以提出以四桥臂变流器作为研究对象, 是因为四桥臂变流器和三桥臂变流器相比具有如下优点:

- 四桥臂变流器的控制特别是直流侧电压控制部分相对简单;
- 四桥臂变流器对零线电流的控制范围大于三桥臂变流器, 补偿效果更好。

1 三相四桥臂逆变器结构及电流检测方法

本文研究的三相四桥臂动态无功补偿器的逆变部分电路结构见图 1。 $V_1 \sim V_8$ 为 8 只绝缘栅双极型

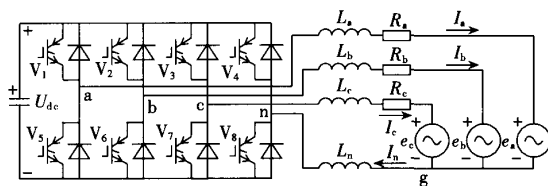


图 1 三相四桥臂动态无功补偿器逆变部分结构电路图

Fig.1 Inverter structure of three-phase four-leg dynamic var compensator

晶体管 (IGBT); U_{dc} 为逆变侧直流电压; L_a 、 L_b 、 L_c 、 L_n 、 R_a 、 R_b 、 R_c 为逆变部分等效电抗和电阻; I_a 、 I_b 、 I_c 、 I_n 为各相电流; e_a 、 e_b 、 e_c 为电动势或电网相电压。工作原理是: 根据需要触发 IGBT, 使桥式电路交流侧输出一定的电压幅值和相位, 该电压与电网电压相减得到的电压矢量加在连接电抗器两端即产生符合要求的补偿电流。

在三相三线制系统中, 电流检测一般采用基于瞬时无功功率理论的 i_p 、 i_q 检测法^[1], 该方法要求三相电流之和为零。电流检测方法原理见图 2^[1]。由于三相四线制系统中零线的存在, 三相电流之和不为零, 因而不能直接采用基于瞬时无功功率理论的 i_p 、 i_q 检测法。解决方法是首先求出其零序电流分量, 将零序分量从各相电流中剔除, 除去零序分量后的三相电流之和为零, 此时即可利用三相三线制情况下的检

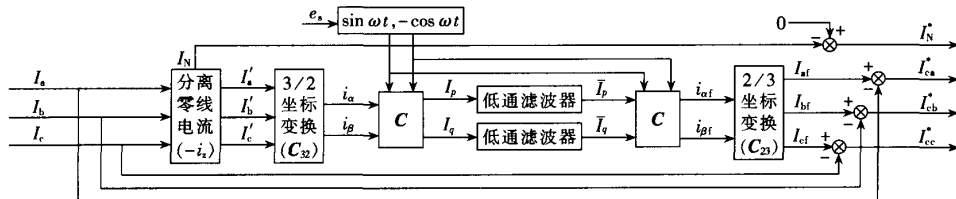


图 2 三相四桥臂动态无功补偿器 i_p 和 i_q 检测法原理图

Fig.2 Principle of i_p and i_q detection method for three-phase four-leg dynamic var compensator

测方法进行检测,最终得到三相四线制系统中的谐波、基波负序及包括零序在内的补偿电流信号。

在三相四线制系统中,三相负载电流 i_a, i_b, i_c 中所包含的零序电流分量 i_z 均为

$$i_z = (i_a + i_b + i_c) / 3 \quad (1)$$

系统中的零序电流 i_N 即为

$$i_N = i_a + i_b + i_c = 3i_z \quad (2)$$

将 i_z 从三相电流 i_a, i_b, i_c 中剔除,即有

$$i'_a = i_a - i_z, \quad i'_b = i_b - i_z, \quad i'_c = i_c - i_z \quad (3)$$

由于

$$i'_a + i'_b + i'_c = 0 \quad (4)$$

此时,可利用三相三线制情况下的检测方法进行检测,即首先将 i'_a, i'_b, i'_c 进行 $3/2$ 的坐标变换,求出对应的有功和无功电流分量 i_p, i_q ;再经低通滤波器滤波,得到其对应的直流分量 $\bar{i}_p, \bar{i}_q$;然后进行 $2/3$ 坐标变换,得到 i'_a, i'_b, i'_c 的基波正序分量 i_{af}, i_{bf}, i_{cf} ;最后,将此基波分量与负序电流 i_a, i_b, i_c 相减,就可得到 a、b、c 三相的指令电流 $i_{ca}^*, i_{cb}^*, i_{cc}^*$ 。

图中 $3/2$ 坐标变换的矩阵为

$$C_{32} = \sqrt{2/3} \begin{bmatrix} 1 & -1/2 & -1/2 \\ 0 & \sqrt{3}/2 & -\sqrt{3}/2 \end{bmatrix}$$

$$C_{23} = C_{32}^T, \quad C = \begin{bmatrix} \sin \omega t & -\cos \omega t \\ -\cos \omega t & -\sin \omega t \end{bmatrix}$$

上面的检测过程是对系统中的谐波电流的检测(若负载电流中含有负序电流时,还包括对负序电流的检测);当需要同时检测无功电流时,只需断开图中计算 i_q 的通道即可;当只需检测无功电流时,则只需对 i_q 进行变换即可。

2 空间矢量法产生触发脉冲

三相四桥臂逆变器并入电网作为无功补偿器的基本等效电路拓扑见图 2,为简化分析,设 $L_a = L_b = L_c = L, R_a = R_b = R_c = R$,这并不影响分析的正确性^[5-7]。

逆变器 4 个桥臂 a、b、c 和 n 的开关状态可以分别用开关函数 S_a, S_b, S_c, S_n 表示。为了简化分析,忽略死区影响,假设各臂上管和下管互补开通和关断;上管开通时开关函数值为 1,反之为 0。这样相间电压 U_{an}, U_{bn}, U_{cn} 可用开关函数表示为

$$U_{in} = (S_i - S_n)U_{dc} \quad i = a, b, c \quad (5)$$

以滤波电感电流 I_a, I_b, I_c 为状态变量对滤波电感回路列出方程可得:

$$\begin{bmatrix} U_{an} \\ U_{bn} \\ U_{cn} \end{bmatrix} = L \begin{bmatrix} \frac{dI_a}{dt} \\ \frac{dI_b}{dt} \\ \frac{dI_c}{dt} \end{bmatrix} + R \begin{bmatrix} I_a \\ I_b \\ I_c \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} e_a \\ e_b \\ e_c \end{bmatrix} + L_n \begin{bmatrix} \frac{dI_n}{dt} \\ \frac{dI_n}{dt} \\ \frac{dI_n}{dt} \end{bmatrix} \quad (6)$$

三相变量从 abc 坐标系到 $\alpha\beta\gamma$ 坐标系变换式为

$$\begin{bmatrix} f_a \\ f_b \\ f_c \end{bmatrix} = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} 1 & -1/2 & -1/2 \\ 0 & \sqrt{3}/2 & -\sqrt{3}/2 \\ 1/2 & 1/2 & 1/2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} f_a \\ f_b \\ f_c \end{bmatrix} = T_1 \begin{bmatrix} f_a \\ f_b \\ f_c \end{bmatrix} \quad (7)$$

f 代表电压或电流,将变换矩阵 T_1 作用于式(6)可得:

$$\begin{bmatrix} U_\alpha \\ U_\beta \\ U_\gamma \end{bmatrix} = L \begin{bmatrix} \frac{dI_\alpha}{dt} \\ \frac{dI_\beta}{dt} \\ \frac{dI_\gamma}{dt} \end{bmatrix} + R \begin{bmatrix} I_{\alpha-\alpha} \\ I_{\alpha-\beta} \\ I_{\alpha-\gamma} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} e_\alpha \\ e_\beta \\ e_\gamma \end{bmatrix} + L_n \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \frac{dI_n}{dt} \end{bmatrix} \quad (8)$$

$U_\alpha, U_\beta, U_\gamma$ 代表相臂间电压 U_{an}, U_{bn}, U_{cn} 在 $\alpha\beta\gamma$ 坐标下的各分量; $e_\alpha, e_\beta, e_\gamma$ 代表反电动势或电网相电压 e_a, e_b, e_c 在 $\alpha\beta\gamma$ 坐标下的各分量; $I_\alpha, I_\beta, I_\gamma$ 代表电感电流 I_a, I_b, I_c 在 $\alpha\beta\gamma$ 坐标下的各分量,注意到

$$I_n = I_a + I_b + I_c = 3I_\gamma \quad (9)$$

所以式(8)进一步写成

$$\begin{bmatrix} U_\alpha \\ U_\beta \\ U_\gamma \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L & 0 & 0 \\ 0 & L & 0 \\ 0 & 0 & L+3L_n \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \frac{dI_\alpha}{dt} \\ \frac{dI_\beta}{dt} \\ \frac{dI_\gamma}{dt} \end{bmatrix} + R \begin{bmatrix} I_\alpha \\ I_\beta \\ I_\gamma \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} e_\alpha \\ e_\beta \\ e_\gamma \end{bmatrix} \quad (10)$$

由式(10)得出,只要根据电流指令选择适当的电压矢量,从而在相臂间施加适当的 $U_\alpha, U_\beta, U_\gamma$ 分量就可以合成所需的电感电流分量 $I_\alpha, I_\beta, I_\gamma$,也可合成任意所需的三相电感电流 I_a, I_b, I_c ,据此,可构建一基于 $\alpha\beta\gamma$ 坐标系的空间矢量基础的电流调节器^[8-10]。

每个桥臂的开关函数 $S_i (i = a, b, c, n)$ 都可以独立取 0 和 1 两个值,因此三相四桥臂逆变器共有 16 个开关状态。应用式(7)将每个开关状态相臂间电压 U_{an}, U_{bn}, U_{cn} 变换至 $\alpha\beta\gamma$ 坐标下,可得到各个开关状态下相应的 $U_\alpha, U_\beta, U_\gamma$ 值,其中各个状态序号是根据开关函数的二进制码值分配的,见表 1。

表 1 开关状态及相应的各电压值

Tab.1 Switch states and their voltages

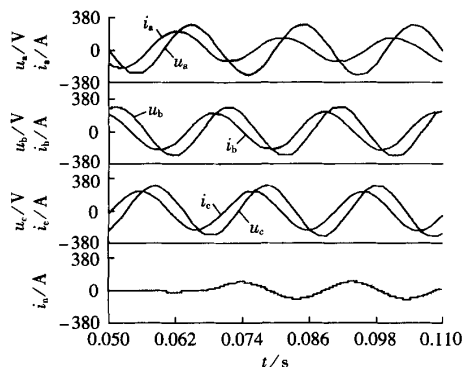
序号	S_a	S_b	S_c	S_n	U_{an}	U_{bn}	U_{cn}	U_α	U_β	U_γ
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
1	0	0	0	1	$-U_{dc}$	$-U_{dc}$	$-U_{dc}$	0	0	$-U_{dc}$
2	0	0	1	0	0	0	U_{dc}	$-1/\sqrt{3} U_{dc}$	$-1/\sqrt{3} U_{dc}$	$1/\sqrt{3} U_{dc}$
3	0	0	1	1	$-U_{dc}$	$-U_{dc}$	0	$-1/3 U_{dc}$	$-1/\sqrt{3} U_{dc}$	$-2/3 U_{dc}$
4	0	1	0	0	0	U_{dc}	0	$-1/3 U_{dc}$	$1/\sqrt{3} U_{dc}$	$1/3 U_{dc}$
5	0	1	0	1	$-U_{dc}$	0	$-U_{dc}$	$-1/3 U_{dc}$	$1/\sqrt{3} U_{dc}$	$-2/3 U_{dc}$
6	0	1	1	0	0	U_{dc}	U_{dc}	$-2/3 U_{dc}$	0	$2/3 U_{dc}$
7	0	1	1	1	$-U_{dc}$	0	0	$-2/3 U_{dc}$	0	$-1/3 U_{dc}$
8	1	0	0	0	U_{dc}	0	0	$2/3 U_{dc}$	0	$1/3 U_{dc}$
9	1	0	0	1	0	$-U_{dc}$	$-U_{dc}$	$2/3 U_{dc}$	0	$-2/3 U_{dc}$
10	1	0	1	0	0	U_{dc}	U_{dc}	$1/3 U_{dc}$	$-1/3 U_{dc}$	$2/3 U_{dc}$
11	1	0	1	1	$-U_{dc}$	0	0	$1/3 U_{dc}$	$-1/\sqrt{3} U_{dc}$	$-1/3 U_{dc}$
12	1	0	0	0	U_{dc}	U_{dc}	0	$1/3 U_{dc}$	$1/\sqrt{3} U_{dc}$	$2/3 U_{dc}$
13	1	1	0	1	0	0	$-U_{dc}$	$1/3 U_{dc}$	$1/\sqrt{3} U_{dc}$	$-1/3 U_{dc}$
14	1	1	1	0	U_{dc}	U_{dc}	U_{dc}	0	0	U_{dc}
15	1	1	1	1	0	0	0	0	0	0

3 仿真结果

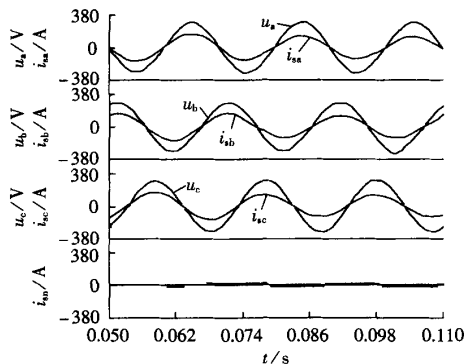
为验证 i_p, i_q 检测法和空间矢量法用于三相四桥臂动态无功补偿器的正确性和有效性,下面特地给出

了 3 种典型的仿真波形。在仿真电路中,电源相电压取 220 V,频率为 50 Hz,电源及电路等效电阻为 $0.2\ \Omega$,等效电抗为 $10^{-4}\ \text{H}$,逆变侧直流电压为 800 V,开关频率为 16 kHz。图 3、图 4 和图 5 分别是容性负载、感性负载和整流负载时的电流、电压无功补偿前、后的波形。

图 3 波形代表的是容性负载时的情况。从 0 时刻起到 0.06 s 以内三相负载均为:电阻 $0.9\ \Omega$,电容 $3400\ \mu\text{F}$ 。在 0.06 s 时 A 相串联接入 $3400\ \mu\text{F}$ 的电



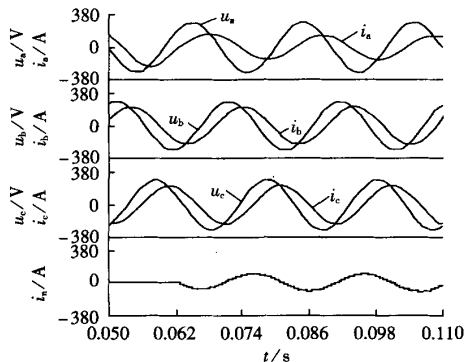
(a) 补偿前



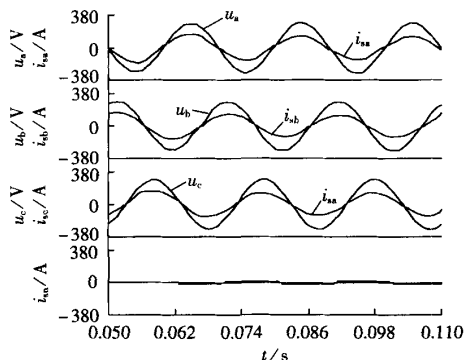
(b) 补偿后

图 3 带容性负载时无功补偿前、后的各相电压、电流和零线电流波形

Fig.3 The voltage and current waveforms for each phase and the terra currents before and after var compensation for capacitive load



(a) 补偿前

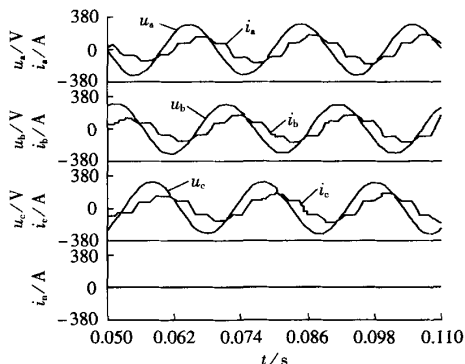


(b) 补偿后

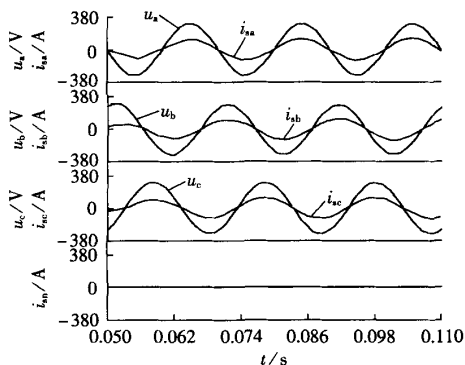
图 4 带感性负载时无功补偿前、后的各相电压、电流和零线电流波形

Fig.4 The voltage and current waveforms for each phase and the terra currents before and after var compensation for inductive load

容, B、C 相负载情况不变。由图 3(a)中可以看出,容性负载引起电流相位超前电压相位一个较大角度,此时电网功率因数较低,不对称负载造成零线电流较大;由图 3(b)可以看出,经无功补偿后,各相电



(a) 补偿前



(b) 补偿后

图 5 整流负载时无功和谐波补偿前、后的各相电压、电流和零线电流波形

Fig.5 The voltage and current waveforms for each phase and the terra currents before and after var and harmonics compensations for rectifier load

流、电压相位基本一致,功率因数接近于 1,零线电流经补偿后趋于 0,无功补偿效果良好。

图 4 波形代表的是感性负载时的情况。从 0 时刻起到 0.06 s 以内三相负载均为:电阻 0.9Ω ,电抗 $3 \times 10^{-3} \text{ H}$ 。在 0.06 s 时 A 相串联接入 $3 \times 10^{-3} \text{ H}$ 的电抗,B、C 相负载情况不变。由图 4(a)中可以看出,感性负载引起电流相位滞后电压相位一个较大角度,此时电网功率因数较低,不对称负载造成零线电流较大;由图 4(b)可以看出,经无功补偿后,各相电流、电压相位基本一致,功率因数接近于 1,零线电流经补偿后趋于 0,无功补偿效果良好。

图 5 波形代表整流负载时的情况。由图 5(a)中可以看出,电源感性内阻和整流负载造成电流相位滞后电压相位一个较大角度,此时电网功率因数较低;而且整流桥负载造成电网电流谐波严重;由图 5(b)可以看出,经无功和谐波补偿后,各相电流、电压相位基本一致,功率因数接近于 1,而且电流波形接近于正弦波,说明谐波抑制效果良好。由于三相电流对称,由图 5(a)(b)最后一个波形可以看到,补偿前后零线电流均为 0。无功和谐波补偿效果良好。

4 结语

基于本文提出的采用三相四桥臂结构的变流器实现三相四线制系统的动态无功补偿,把用于三相三线制下的 i_p, i_q 检测法经变化用于三相四线制系统中,基于空间矢量法产生触发脉冲,通过仿真成功实现了在三相四线制下对容性负载、感性负载等的无功补偿和对整流负载等的无功及谐波的补偿。从仿真波形图中可以看出,无功和谐波补偿效果良好。

参考文献:

- [1] 王兆安,杨君,刘进军. 谐波抑制和无功功率补偿[M]. 北京:机械工业出版社,2004.
- [2] 周腊吾,徐勇,朱英浩. 基于 PWM 电抗器的静态无功功率补偿器的仿真研究[J]. 湖南大学学报:自然科学版,2003,30(4):59-61. ZHOU La-wu, XU Yong, ZHU Ying-hao. Emulational research on static reactive power compensator based on PWM reactor[J]. Journal of Hunan University: Natural Sciences, 2003, 30(4): 59-61.

- [3] 李向荣. STATCOM 应用于 2000 年华中电网的仿真研究[J]. 电力系统自动化, 2000, 24(10): 6-9. LI Xiang-rong. Emulational research on year 2000 of center China power system[J]. Automation of Electric Power Systems, 2000, 24(10): 6-9.
- [4] 王轩,姜新建,朱东起. 治理三相四线制配电网谐波电流的新技术[J]. 电力系统自动化, 2004, 28(15): 44-46. WANG Xuan, JIANG Xin-jian, ZHU Dong-qi. New technique of restraining harmonious current for three-phase four-line[J]. Automation of Electric Power Systems, 2004, 28(15): 44-46.
- [5] 马大铭,朱东起,高景德. 三相电压不对称时谐波和无功电流的准确检测[J]. 清华大学学报, 1997, 37(4): 710-712. MA Da-ming, ZHU Dong-qi, GAO Jing-de. Harmonious and reactive current's exact detecting for three-phase asymmetry voltage[J]. Journal of Tsinghua University, 1997, 37(4): 710-712.
- [6] RYAN M J, de DONCKER R W, LORENZ R D. Decoupled control of a four-leg inverter via a new 4×4 transformation matrix[J]. IEEE Trans on PE, 2001, 16(5): 694-700.
- [7] ALI S M, KAZMIERKOWSKI M P. PWM voltage and current control of four-leg VSI [C]//IEEE ISIE'98. Pretoria, South Africa: IEEE, 1998: 196-201.
- [8] 戴宁怡,黄明聪,唐净. 新型三维空间矢量脉宽调制在三相四线系统中应用[J]. 电力系统自动化, 2003, 27(17): 45-49. DAI Ning-yi, HUANG Ming-cong, TANG Jing. New pattern of three-dimensional space vector pulse width modulate applying in three-phase four-line system[J]. Automation of Electric Power Systems, 2003, 27(17): 45-49.
- [9] CAVALIERE A C C, WATANABE E H, AREDES M. Multi-pulse STATCOM operation under unbalanced voltages[J]. IEEE Transactions of Power Delivery, 2002, 17(1): 567-572.
- [10] SHEN D, LEHN P W. Modeling analysis and control of a current source inverter 2 based STATCOM[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2002, 17(1): 248-252.

(责任编辑:李玲)

作者简介:



刘永超

刘永超(1981-),男,重庆人,硕士研究生,研究方向为电力电子在电力系统中的应用(E-mail:liuyongchao3157@sina.com);

杨振宇(1979-),男,江苏常州人,博士研究生,研究方向为电力电子在电力系统中的应用。

Simulative research on three-phase four-leg dynamic var compensator

LIU Yong-chao¹, YANG Zhen-yu¹, YAO Jun², ZHAO Jian-feng¹

(1. Department of Electrical Engineering, Southeast University, Nanjing 210096, China;

2. Taizhou Power Supply Company, Taizhou 225300, China)

Abstract: A method to compensate the reactive power in three-phase four-line system by using three-phase four-leg inverters is put forward. Based on the instantaneous reactive power theory, after eliminating terra current, the current detection method used in three-phase three-line system is applied to the three-phase four-line power system. The deduction and realization are provided. The space vector technique is then applied to spring impulses. The PSCAD software is used to build the system simulation diagram and the control strategy is designed. The var compensation simulation for different loads of capacitance, inductance and rectifier in three-phase four-line system is carried out. Simulation results validate its feasibility.

This project is supported by the Excellent Youth Teacher Scientific Research Foundation of Southeast University.

Key words: three-phase four-leg; var compensation; i_p, i_q detection method; space vector technique