

一种无变压器无储能电容的 串联型电压跌落补偿装置实验研究

詹 佩, 陈增禄, 姚伟鹏, 陈 佩, 宋 健
(西安工程大学 电子信息学院, 陕西省 西安市 710048)

An Experiment Research on Transformerless Series Voltage Sag Compensators without Energy-Storage Capacitor

ZHAN Pei, CHEN Zeng-lu, YAO Wei-peng, CHEN Pei, SONG Jian

(College of Electronics and Information, Xi'an Polytechnic University, Xi'an 710048, Shaanxi Province, China)

ABSTRACT: The authors propose a transformerless serial voltage sag compensation scheme in which the energy-storage component is not equipped. Comparing with traditional voltage sag compensation methods, in the proposed scheme the DC capacitor is charged by line voltage, thus the voltage compensation range is extended and the compensation can be realized while the voltage of each phase sags down by 37% of rated value or the voltage of one phase keeps its rated value and the voltages of other two phases sags down to zero. Based on the proposed scheme an experimental research on the control of inverter in three-phase four-wire system is performed in which the control strategy of triangle wave tracking and is used, and the result validates the correctness and effectiveness of the proposed scheme.

KEY WORDS: voltage sag; power quality; series; tracking control; energy-storage element

摘要: 针对电网电压跌落问题, 提出了一种无变压器、无储能元件的串联型电压跌落补偿方案。与传统方案相比, 该方案利用线电压对直流电容充电, 扩大了补偿电压的范围, 能在三相电压同时跌落至正常值的 37% 或一相电压保持额定而其余两相电压跌至 0 时实现补偿。在上述新型补偿电路拓扑的基础上对三相四线制系统进行了实验研究, 采用三角波跟踪控制策略得到了三相实验结果, 验证了该方案的正确性和有效性。

关键词: 电压跌落; 电能质量; 串联型; 跟踪控制; 储能元件

0 引言

电网电压瞬时跌落是电能质量最常见的问题之一^[1-3], 它是由输电系统短路故障、过负荷、开关操作、大型电机启动等原因造成的。电网电压瞬时

跌落具有不可预见性, 影响范围较大^[4-7], 会造成相当大的经济损失^[8-9]。因此, 利用补偿装置消除电网瞬时跌落电压、提高电能质量非常必要。

常见的串联型电压跌落补偿装置是动态电压恢复器(dynamic voltage restorer, DVR), 它通常有一个储能单元, 通过注入变压器向电网注入补偿电压^[10-11]。因此, 储能单元容量的大小和变压器的效率决定了 DVR 补偿性能的优劣。近年来, 人们对电压跌落补偿装置的研究主要集中在装置的补偿能力和效率上。文献[12]提出了一种无变压器的串联型电压跌落补偿装置。该装置采用级联式多电平逆变器, 提高了补偿深度。文献[13]提出了一种动态电压校正器。该装置省略了储能电容, 利用相电压对直流侧电容充电。

本文将主要分析研究一种新型的无变压器、无储能元件的串联型电压跌落补偿装置^[14]。利用线电压对直流侧电容充电, 以扩大该装置补偿电压的范围, 并在这种电压跌落补偿装置的拓扑上进行实验, 结果表明, 选用本文的滤波电容时, 在三相对称跌落深度为 45% 或两相电压跌落到 12% 而另一相电压额定时, 该装置仍能使负载电压维持在额定值附近。

1 补偿电路的结构

本文实验补偿方案所采用的主电路拓扑如图 1 所示。图中: B、C 相的拓扑与 A 相相同; 每相由 2 个双半波整流电路与 1 个半桥逆变电路构成, 半桥逆变电路串联在电网中; C_1 和 C_2 为 A 相直流侧电容; N、 N_0 和 N_1 为接地点。由图 1 可知, 该主

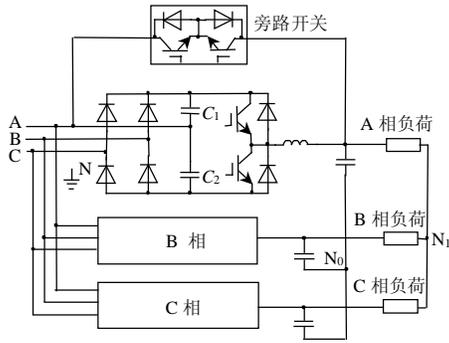


图1 主电路拓扑

Fig. 1 Topology of the main circuit

电路利用本相与其它两相构成的幅值较大的线电压给直流侧电容充电，使相电压跌落到较低的幅值时仍然有相对较高的直流母线电压，提高了电压跌落的补偿范围。与动态电压校正器电路相比，由于采用了线电压充电方式，该主电路拓扑可同时适用于三相三线和三相四线制系统。由一种全控型交流电子开关构成的旁路开关与逆变电路并联。

在电网电压正常时，旁路开关导通，电网直接与负载连接，逆变电路不工作，这样减少了逆变器的开关损耗和滤波器上的损耗。同时，线电压给直流侧电容充电。当电网电压发生跌落时，旁路开关断开，逆变器的驱动信号解封锁，逆变器输出电压与电网电压迭加后共同给负载供电，以维持负载电压恒定。在逆变器进行电压补偿期间，直流侧电容释放能量的同时由线电压对其充电。因此，该拓扑中的电容不作储能用，而主要起滤波作用。与传统装置中作为储能装置的电容相比，该拓扑结构需要的电容更小，同时线电压充电方式使电路的补偿深度增大。

2 电压跌落深度的理论分析

为分析可补偿的三相电压最大跌落深度，三相电压跌落补偿的相量图见图2。

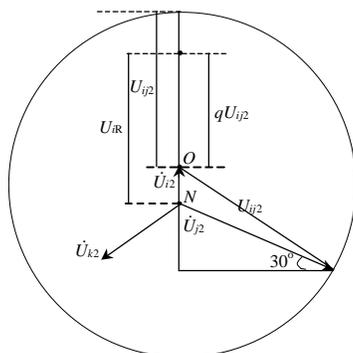


图2 三相电压跌落补偿相量图

Fig. 2 Vector diagram of three phase voltage sag compensation

图中： $i、j$ 和 k 分别代表A相、B相和C相且 $i \neq j \neq k$ ； U_{i2} 、 U_{j2} 、 U_{k2} 是跌落的三相输入电压； U_{ij2} 是 $i、j$ 相之间跌落的线电压幅值，该线电压为变压器中的电容充电； U_{iR} 是 i 相的额定电压幅值； N 是理论中性点； O 为圆心。假设三相电压中， i 相为幅值跌落最大的一相， j 相为幅值跌落最小的一相，设 p_i 、 p_j 和 p_k 分别是 $i、j$ 和 k 相的跌落因数，则

$$\begin{cases} U_{i2} = p_i U_{iR} \\ U_{j2} = p_j U_{jR} \\ U_{k2} = p_k U_{kR} \end{cases} \quad (1)$$

从图2可以得出

$$U_{ij2} = \sqrt{[U_{j2} \cos(\pi/6)]^2 + [U_{j2} \sin(\pi/6) + U_{i2}]^2} \quad (2)$$

电容并不是无穷大，因此在跌落补偿期间，电容上的电压保持动态平衡。设电压衰减系数 $q \in (0,1)$ ，它是在动态补偿过程中，滤波电容上电压达到动态平衡时，其最小电压和最大电压的比值，则 p_i 、 p_j 和 q 的关系为

$$U_{iR} = U_{i2} + qU_{ij2} \quad (3)$$

假设 $U_{iR} = U_{jR} = U_{kR}$ ，则

$$q^2 = \frac{p_i^2 - 2p_i + 1}{p_i^2 + p_i p_j + p_j^2} \quad (4)$$

由式(4)可以看出滤波系数和补偿深度的关系。设电容量足够大，即 $q=1$ ，则式(4)可等效为

$$p_j^2 + p_i p_j + 2p_i - 1 = 0 \quad (5)$$

由式(4)(5)绘出的 p_i 、 p_j 和 q 的关系曲线见图3。

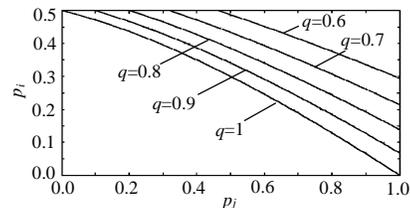
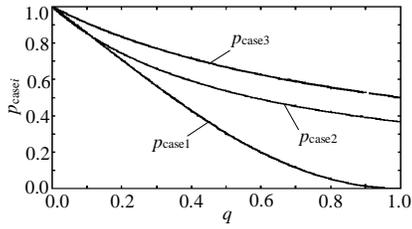


图3 p_i 、 p_j 和 q 的关系

Fig. 3 The relationship of p_i , p_j and q

对于特殊情况，可假设只有一相电压跌落而其余两相电压额定或两相电压跌落的幅度相同而另一相电压保持额定，跌落因子定义为 p_{case1} ，而对于三相对称跌落，跌落因子定义为 p_{case2} 。根据式(4)可以求出 p_{case1} 和 p_{case2} 与 q 的关系，如图4所示。另外，文献[8]将动态电压校正器电路的跌落因数定义为 p_{case3} ，该跌落因数也绘于图4中。从图4可明显看出，上述电路拓扑能在三相电压对称跌落至正常电压的37%或一至两相电压跌落至0而其余相保持额定时，将三相负载电压补偿至额定值。

图4 q 与 p_{case1} 、 p_{case2} 和 p_{case3} 的关系Fig. 4 The relationship between q and p_{case1} 、 p_{case2} 、 p_{case3}

3 控制策略

PWM 逆变电路的控制方法有计算法、调制法、跟踪控制方法、矢量控制法、滑模变结构控制法以及一些新型的控制方法，其中跟踪控制方法包括滞环比较方式、定时比较方式、三角波比较跟踪控制方式，双重 Δ 跟踪控制方式^[15-16]等。三角波比较跟踪控制方式的优点在于功率开关器件的开关频率保持恒定，这为设计滤波器带来了方便，同时采用这种控制技术得到的输出电压谐波较少。

本文设计的装置采用三角波跟踪控制策略，给定的三角载波频率为 10kHz。下面介绍实现控制策略过程中的几个关键环节。

(1) 控制系统框图。

本文采用电压环反馈跟踪控制。三角波比较方式的控制结构见图 5。图中具体给出了 A 相控制结构，B、C 相结构与 A 相相同； u_a^* 、 u_b^* 和 u_c^* 分别为 A、B 和 C 相的指令电压信号； u_a 、 u_b 和 u_c 分别为三相反馈电压信号； e_a 、 e_b 和 e_c 分别为三相误差信号； e_a' 为 A 相误差经调节器输出的信号； $u_{\text{gate_a1}}$ 与 $u_{\text{gate_a2}}$ 、 $u_{\text{gate_b1}}$ 与 $u_{\text{gate_b2}}$ 、 $u_{\text{gate_c1}}$ 与 $u_{\text{gate_c2}}$ 为 3 组半桥逆变电路驱动信号，每组驱动信号驱动一相半桥逆变电路上、下管； u_{oa} 、 u_{ob} 、 u_{oc} 分别为 A、B、C 相逆变器输出电压的基波分量。

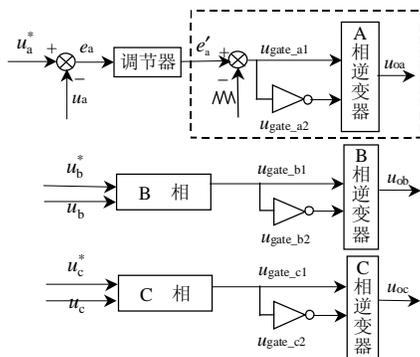


图5 三角波比较方式的控制结构

Fig. 5 Control structure in the way of triangle wave comparison

以图 5 中的 a 相电路为例，指令信号 u_a^* 与反馈信号 u_a 比较后得到的误差信号 e_a 经调节器输出。调节器输出信号 e_a' 与三角载波进行比较，得到两路互补的驱动信号，分别驱动半桥逆变电路的上、下管。B、C 相的控制原理与 A 相相同。

(2) 输出侧滤波器设计。

滤波器是电压补偿装置的重要环节。该滤波器必须保证能够有效滤除开关谐波、不失真地传递基波幅值和相位、滤波器电压损失足够小等。

输出侧的滤波器原理见图 6。图中：虚线框内电感 L 和电容 C 组成一个逆变器输出滤波器； U_o 为逆变器输出电压的基波分量； U_r 为负载电压 R 为纯电阻负载。

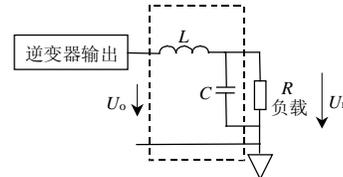


图6 输出侧的滤波器原理

Fig. 6 Principle of output filter

由图 6 可知，有滤波器输入输出的传递函数为

$$\frac{u_r}{u_o} = \frac{1}{s^2 / \omega_n^2 + 2\xi s / \omega_n + 1}$$

式中：自然振荡角频率 $\omega_n = 1/\sqrt{LC}$ ；阻尼比 $\xi = \frac{1}{2R}\sqrt{\frac{L}{C}}$ ，为使滤波器不放大谐波，也不对基波信号衰减，通常取 $\xi = 0.5$ 。给定三角载波频率 $f = 10\text{kHz}$ ，基波频率 $f_0 = 50\text{Hz}$ ，截止频率 f_n 选在 f 与 f_0 的几何中点处，则

$$f_n = \sqrt{f_0 f} \quad (6)$$

考虑到滤波器损耗要尽可能的小，有

$$j\omega L \ll R \quad (7)$$

根据 $R = 370\Omega$ ，由式(6)~(8)计算得到的滤波器参数为 $L = 67\text{mH}$ ， $C = 752\text{nF}$ 。

(3) 逆变器模型。

在整个闭环系统中，逆变单元是一个非线性环节。为建立闭环系统模型，首先需要将逆变单元线性化。对图 5 虚线框内的部分建立图 7 所示的动态平均模型。图 7 中： E_1 为三角载波峰值； E_2 为逆变器输出脉宽调制(pulse width modulation, PWM)电压的幅值； T 为三角波周期。

由于三角载波频率远大于基波频率，在一个载波周期内，可近似认为正弦调制信号幅值不变。令 \bar{b}_1

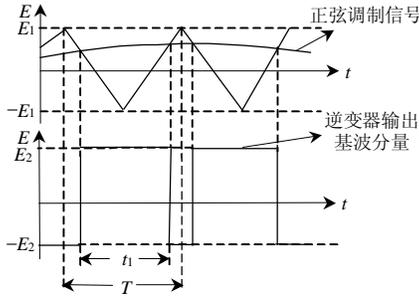


图 7 三角波比较方式的动态平均模型
Fig. 7 Dynamic average model in the way of triangle wave comparison

表示 1 个载波周期内正弦调制信号的平均幅值， \bar{b}_2 表示 1 个载波周期内逆变器输出脉宽调制电压基波分量的平均值，则

$$\bar{b}_2 = (2h - 1)E_2 \quad (8)$$

$$\bar{b}_1 = (2h - 1)E_1 \quad (9)$$

式中系数 $h = t_1 / T$ ，比较环节的输入与输出的传递函数近似为一个常数，即

$$G_b(s) = \frac{\bar{b}_2(s)}{\bar{b}_1(s)} = \frac{E_2}{E_1} = k_{SPMW}$$

(4) 反馈电路设计。

如果反馈信号取自图 6 中的负载电压 U_r ，用 $G(s)$ 表示调节器环节，则系统闭环结构框图见图 8，其中变量的下标 i 表示 A、B、C 三相。

为获得一定的相角裕度，将 $G(s)$ 设计成一个积分环节，使截止频率落在 -20dB/dec 的斜率上。系统对应的对数幅频特性如图 9 所示。

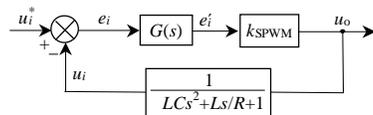


图 8 系统闭环结构框图
Fig. 8 Structure diagram of the closed loop system

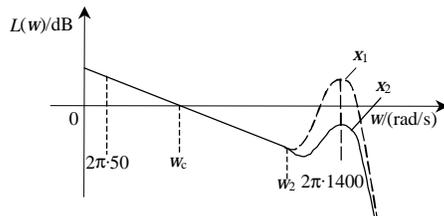


图 9 系统对数幅频特性
Fig. 9 Characteristic of logarithm magnitude-frequency

设基波频率为 50 Hz， w_c 为截止频率， w_2 为转折频率，滤波器的谐振峰点在 1.4 kHz 处，为使闭环系统有较快的响应速度，截止频率 w_c 应尽可能高。随着 R 的增大，阻尼系数 x 会减小。当 x 较小

而谐振峰点离 w_c 较近时，有可能导致系统的对数幅频特性曲线多次穿越 0 dB 线，如图 9 中虚线部分所示。因此设计中要求

$$\begin{cases} w_c \gg 2\pi \cdot 50 \\ w_2 \gg w_c \\ w_2 \ll 2\pi \cdot 1400 \end{cases} \quad (10)$$

由本文的实验参数知，式(10)一般无法满足。改进的反馈信号采样电路见图 10。在图 10 的虚线框内，为保证控制系统频率特性满足稳定性的要求，本文在逆变器输出侧增加了由 R_0 和 C_0 构成的检测电路，反馈信号取自电容 C_0 上的电压。此电路实际是将闭环系统的振荡环节改成了一阶惯性环节，避免了由于负载参数变化引起谐振峰点升高而导致的系统不稳定问题。

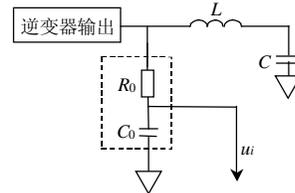


图 10 反馈信号采样电路
Fig. 10 Sample circuit of feedback signal

为保证反馈电压信号能较好地复现负载电压信号，必须要求电阻 R_0 上的电压远小于电容 C_0 上的电压，且反馈电压 u_i 的相位与逆变器输出电压基波分量 U_0 的相位尽可能接近。

(5) 调节器设计。

根据上述分析，建立的系统闭环控制结构如图 11 所示，此时将逆变电路等效成一个线性环节，用系数 k_{SPWM} 表示，将调节器设计成一个纯积分环节，使控制系统成为一个典型的 I 型系统，只需根据需要设计相应的 k_{SPWM} 。

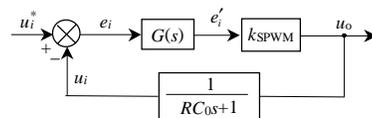


图 11 系统闭环控制结构
Fig. 11 Structure diagram of the closed loop system

4 实验研究

4.1 实验参数

本文的实验参数如下：半桥逆变器中开关器件选取 MOSFET-IRF460；开关管最大耐压为 500 V；考虑到器件特性和主电路结构，实验中的模拟正常相电压有效值为 67 V，模拟电压跌落时间为 800 ms；

$L=37\text{ mH}$; $C=330\text{ nF}$; $R=370\ \Omega$; $R_0=300\ \Omega$; $C_0=350\text{ nF}$; 逆变桥滤波电容参数为 $450\text{ V}/100\ \mu\text{F}$ 。

4.2 实验结果与分析

(1) 三相电压对称跌落。

三相电压对称跌落的实验结果见图 12。实验中正常电压有效值为 67 V ，跌落电压有效值为 30 V ，电压跌落深度约为 45% 。由图 12 可知，采用本文的实验装置可将负载电压迅速补偿至额定值附近。

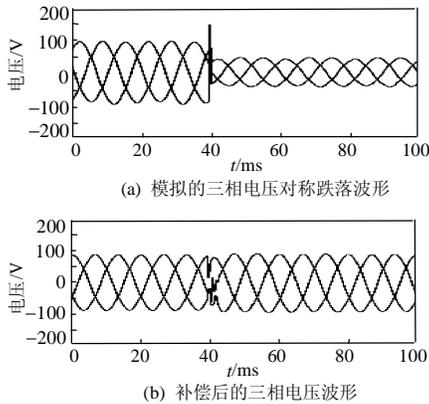


图 12 三相电压对称跌落的实验结果
Fig. 12 Experiment results when three phase voltage sag symmetrically

根据上述理论分析可知，在理想情况下，本文的实验装置可将三相电压对称跌落补偿到额定值的 37% 。但由于电容为非理想情况，实验中三相电压对称跌落的最大深度为 45% 。此时直流侧电容电压的衰减系数为 75% 。

(2) 两相电压跌落很深而另一相电压保持额定。

模拟的三相电压跌落波形见图 13。实验中正常电压有效值为 67 V ，两相跌落电压有效值为 8 V 。由图 13 可知，负载电压补偿响应快，补偿后的负载电

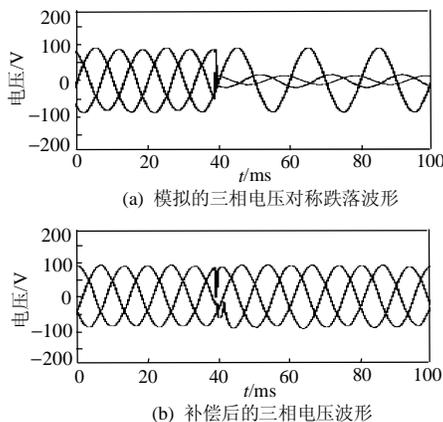


图 13 两相电压跌落很深而另一相电压保持额定的实验结果
Fig. 13 Experiment results when two phase voltage sag deeply and other one is rated

压波形良好。由于电容衰减系数的存在，当一相电压保持额定值时，另外两相电压的最大跌落深度为 12% 。

5 结论

(1) 与传统方案相比，本文的串联型电压跌落补偿方案利用线电压给直流侧电容充电，提高了电压补偿的深度，同时，该方案无需变压器串联在电网中，降低了补偿装置的体积和成本。

(2) 本文在三相四线制系统下对该方案进行了实验研究，结果表明该方案具有较深的电压跌落补偿深度。同时，本文采用三角波比较跟踪控制方式使负载输出波形能较好地跟踪指令正弦波，且系统动态响应较快，能满足补偿动态电压跌落的要求。

(3) 由于开关器件限制，实验中模拟的正常相电压幅值偏低，实验装置输出的功率较小，这是该装置的一个不足之处。另外，当上述装置接非线性负载或在三相四线制系统下运行时，可将其控制策略和实验效果作为今后研究的重点。

参考文献

- 袁川, 杨洪耕. 动态电压恢复器的改进最小能量控制[J]. 电力系统自动化, 2004, 28(21): 49-53.
Yuan Chuan, Yang Honggeng. Advanced minimum energy control of dynamic voltage restorer[J]. Automation of Electric Power Systems, 2004, 28(21): 49-53(in Chinese).
- 张迪, 姜齐荣, 张秀娟. 动态电压恢复器的能量稳定控制[J]. 电网技术, 2006, 30(1): 14-18.
Zhang Di, Jiang Qirong, Zhang Xiujuan. Energy steady control for dynamic voltage restorer[J]. Power System Technology, 2006, 30(1): 14-18(in Chinese).
- 朱桂萍, 王树民. 电能质量控制技术综述[J]. 电力系统自动化, 2002, 26(19): 28-31.
Zhu Guiping, Wang Shumin. A survey on power quality control technology[J]. Automation of Electric Power Systems, 2002, 26(19): 28-31(in Chinese).
- Hyosung K. Minimal energy control for a dynamic voltage restorer [C]. Proceedings of the Power Conversion Conference, Osaka, 2002.
- 王宾, 潘贞存, 董新洲. 电压跌落的配电线路全线速切治理方案[J]. 电网技术, 2006, 30(21): 84-88.
Wang Bin, Pan Zhencun, Dong Xinzhou. A scheme of the fast tripping current protection for distribution lines based on the voltage sag mitigation[J]. Power System Technology, 2006, 30(21): 84-88(in Chinese).
- 袁佳歆, 陈柏超, 万黎, 等. 利用配电网静止无功补偿器改善配电网电能质量的方法[J]. 电网技术, 2004, 28(19): 81-84.
Yuan Jiixin, Chen Baichao, Wan Li, et al. The method to improve power quality of distribution system by distribution static compensator [J]. Power System Technology, 2004, 28(19): 81-84(in Chinese).
- 黄瀚, 杨潮, 韩英铎, 等. 配电网动态电压调节器控制策略的研究[J]. 电网技术, 2002, 26(1): 1-4.
Huang Han, Yang Chao, Han Yingduo, et al. Study on control strategy of dynamic voltage restorer for distribution network[J]. Power System

- Technology, 2002, 26(1): 1-4(in Chinese).
- [8] Chen P T, Huang C C, Pan C C. Design and implementation of a series voltage sag compensator under practical utility conditions [J]. IEEE Trans on Industry Applications, 2003, 39(3): 844-853.
- [9] Conroy E. Power monitor ingand harmonic problem in the modern building[J]. IEEE Power Engineering, 2001, 15(2): 101-107.
- [10] Vilathgamuwa M, Perera A A D R, Choi S S, et al. Control of energy optimized dynamic voltage restorer[C]. The 25th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society, USA, 1999.
- [11] Hosseini S H, Banael M R. A new minimal energy control of the DC link energy in four-wire dynamic voltage restorer[C]. The 30th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society, Korea, 2004.
- [12] Visser A J, Enslin J H R, de T Mouton H. Transformerless series sag compensation with a cascaded multilevel inverter[J]. IEEE Trans on Industry Electronics, 2002, 49(4): 824-831.
- [13] Brumsickle W E, Schneider R S, Luckjiff G A, et al. Dynamic sagcorrectors: cost-effective industrial power line conditioning [J]. IEEE Trans on Industry Applications, 2001, 37(1): 212-217.
- [14] Chen Zenglu, ISE Toshifimi. Transformerless series: voltage sag compensator without energy storage capacitor for three-phase three line systems[J]. 電気学会論文誌 D, 2007, 127(7): 693-700.
- [15] 陈增禄, 任记达, 毛惠丰, 等. 新型双重 Δ 调制电流跟踪控制方法的研究[J]. 电网技术, 2005, 29(12): 62-65.
Chen Zenglu, Ren Jida, Mao Huifeng, et al. A novel method of double delta modulation for current tracing control[J]. Power System Technology, 2005, 29(12): 62-65(in Chinese).
- [16] 陈增禄, 伊濂敏史, 任记达, 等. PWM 变换器跟踪控制的双重 Δ 调制新方法[J]. 中国电机工程学报, 2006, 26(14): 52-58.
Chen Zenglu, ISE Toshifimi, Ren Jida, et al. A novel method of double delta modulation on tracking control of PWM converters [J]. Proceedings of the CSEE, 2006, 26(14): 52-58(in Chinese).

收稿日期: 2007-10-24。

作者简介:

詹 佩(1983—), 女, 硕士研究生, 研究方向为电压瞬变控制策略, E-mail: maggie0220@126.com;

陈增禄(1957—), 男, 博士研究生, 教授, 研究方向为电力电子技术, 包括多重化 SPWM 逆变器、PWM 变换器的跟踪控制以及动态电压跌落补偿等。

(编辑 杜宁)

(上接第 39 页 continued from page 39)

参考文献

- [1] 石晶, 邹积岩, 何俊佳, 等. 故障电流限制技术及研究进展[J]. 电网技术, 1999, 23(12): 63-66.
Shi Jing, Zou Jiyan, He Junjia, et al. Development of fault current limiting technology and its progress[J]. Power System Technology, 1999, 23(12): 63-66(in Chinese).
- [2] Steurer M, Holaus W, Kaltenecker K. A novel hybrid current-limiting circuit breaker for medium voltage: principle and test results[J]. IEEE Trans on Power Delivery, 2003, 18(2): 460-468.
- [3] 叶林, 林良真. 超导故障限流器在电力系统中的应用研究[J]. 中国电机工程学报, 2000, 20(7): 1-5.
Ye lin, Lin Laingzhen. Superconducting fault current limiter applications in electric power systems[J]. Proceedings of the CSEE, 2000, 20(7): 1-5(in Chinese).
- [4] 张绪红, 周有庆, 吴桂清, 等. 饱和和铁心型超导限流器的仿真设计方法[J]. 电网技术, 2004, 28(6): 49-53.
Zhang Xuhong, Zhou Youqing, Wu Guiqing, et al. A new design method for saturated core superconductor fault current limiter [J]. Power System Technology, 2004, 28(6): 49-53(in Chinese).
- [5] Amon J, Fernandez P C, Rose E H, et al. Brazilian successful experience in the usage of current limiting reactors for short-circuit limitation [C]. International Power Systems Transients, Montreal, Canada, 2005.
- [6] Gor V, Povh D, LERCH E, et al. SCCL—a new type of FACTS based short-circuit current limiter for application in high-voltage systems [C]. CIRGE, Paris, 2004.
- [7] 王华昕, 习贺勋, 汤光福. 谐振型故障限流器阻抗特性仿真和参数优化[J]. 电力系统自动化, 2007, 31(5): 61-65.
Wang Huaxin, Xi Hexun, Tang Guangfu. Simulation and parameters optimization of the resonance fault current limiter resistance [J]. Automation of Electric Power Systems, 2007, 31(5): 61-65(in Chinese).
- [8] 林集民, 郑健超, 陈葛松, 等. 伊冯可控串补主要器件的基本工作条件及总体工作能力探讨[J]. 电网技术, 1997, 21(9): 1-6.
Lin Jimin, Zheng Jianchao, Chen Gesong, et al. Capabilities and stresses on main components of Yi-Feng TCSC[J]. Power System Technology, 1997, 21(9): 1-6(in Chinese).
- [9] 林集民, 郑健超, 陈葛松, 等. 伊冯可控串补过电压保护控制及主动绝缘配合研究[J]. 电网技术, 1998, 22(6): 1-6.
Lin Jimin, Zheng Jianchao, Chen Gesong, et al. Over voltage protection control and active insulation coordination of Yi-Feng TCSC[J]. Power System Technology, 1998, 22(6): 1-6(in Chinese).
- [10] 钟胜. 与超高压输电线路加装串补装置有关的系统问题及其解决方案[J]. 电网技术, 2004, 28(6): 26-31.
Zhong Sheng. Problems caused by adding series compensations EHV transmission system and their solution[J]. Power System Technology, 2004, 28(6): 26-31(in Chinese).
- [11] 陈葛松, 林集明, 郭剑波, 等. 500 kV 串补站过电压保护研究[J]. 电网技术, 2001, 25(2): 21-26.
Chen Gesong, Lin Jiming, Guo Jianbo, et al. Overvoltage protection for 500 kV series compensation station[J]. Power System Technology, 2001, 25(2): 21-26(in Chinese).
- [12] 曾昭华, 蒋卫平, 班连庚, 等. 伊冯 500 kV 可控串补系统中断路器的工作条件及操作过电压[J]. 电网技术, 2000, 24(5): 1-5.
Zeng Zhaohua, Jiang Weiping, Ban Liangeng, et al. Working conditions of circuit breakers and switching surges in Yimin— Fengtun 500 kV TCSC compensated system[J]. Power System Technology, 2000, 24(5): 1-5(in Chinese).

收稿日期: 2007-10-22。

作者简介:

王华昕(1975—), 男, 博士研究生, 研究方向为 FACTS 技术的应用, E-mail: wanghuaxin@epri.ac.cn;

习贺勋(1978—), 男, 博士研究生, 研究方向为 FACTS 技术的应用;

汤光福(1966—), 男, 教授级高级工程师, 长期从事 FACTS 和 HVDC 的开发及其相关试验方法的研究;

郑健超(1939—), 男, 中国工程院院士, 长期从事高电压、FACTS 技术的研究工作。

(责任编辑 沈杰)