

基于不对称级联型多电平逆变器的动态电压恢复器研究

王德发, 丁洪发

(华中科技大学电气与电子工程学院, 湖北 武汉 430074)

摘要: 提出了一种基于不对称级联型多电平逆变器(ACMI)的动态电压恢复器(DVR)及其控制策略。该DVR在结构上采用不对称级联型多电平逆变器,易于实现装置的大容量化;控制策略上先采用跌落前电压补偿法,然后平缓过渡到同相位电压补偿法,在这种控制策略下,系统电压发生幅值和相位跳变时,能够保证负载电压平滑无突变,减小了对相位突变敏感负荷的影响,补偿效果接近跌落前电压补偿法,而所需补偿的能量与同相位电压补偿法接近。Matlab仿真试验验证了该系统结构和控制策略的实用性、有效性。

关键词: 电能质量; 电压跌落; 动态电压恢复器; 不对称级联型多电平逆变器; 补偿策略

Simulation of dynamic voltage restorer based on asymmetry cascade multilevel inverter

WANG De-fa, DING Hong-fa

(Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China)

Abstract: This paper presents a dynamic voltage restorer (DVR) based on asymmetry cascade multilevel inverter (ACMI) and its control strategy. The asymmetry cascade multilevel inverter is used in this DVR, so the capacity of the DVR can be made very large. The control strategy is based on a combination of pre-sag phase compensation and post-sag phase compensation. Once a sag event occurs, the phase will therefore slowly shift from the pre-sag phase to the post-sag phase, so the voltage as seen by the load will be smooth without any sudden jump. This gives the benefit of the load which is sensitive to the voltage phase. The effect of the DVR is close to the pre-sag phase compensation, but the consumption of energy is close to the post-sag phase compensation. The practicability and validity of the structure and control strategy are confirmed by MATLAB simulation.

Key words: power quality; voltage sag; dynamic voltage restorer; asymmetry cascade multilevel inverter; compensation strategy

中图分类号: TM714

文献标识码: A

文章编号: 1003-4897(2007)13-0049-04

0 引言

电力电子技术的发展及其在工业领域中应用范围的扩大,如工业电弧炉、电力机车、轧钢机、大型半导体变流装置等冲击性、非线性负荷的增加,使得电力系统电能质量问题日益严重;而另一方面,随着信息技术的快速发展以及计算机管理和先进自动控制手段的日益广泛应用,电力系统中对电能质量敏感的负荷所占比重越来越大。对电能质量的改善和控制成为现代电力系统的重要课题,而电压跌落被认为是影响许多设备正常、安全运行最严重的动态电能质量问题。

动态电压恢复器(DVR)是一种新型的解决电压跌落问题的装置,其主要目的是在电网电压出现跌落问题时输出一个补偿电压,以保证用户侧电压的稳定。传统的DVR多采用两电平、三电平逆变器

或对称级联型逆变器^[1],其单位容量造价较高,运行损耗大,且不容易实现大容量化。DVR的补偿控制策略通常有三种^[2,3]:跌落前电压补偿、同相位电压补偿和最小能量补偿。跌落前电压补偿法效果最好,但当电压跌落幅值过大或相位跳变过大时较难实现,经济性较差,不适合于长时间电压跌落补偿;同相位电压补偿法补偿电压幅值最小,但该方法只能进行幅值补偿,不能补偿相位变化,对电压相位突变敏感的负载无法适用;最小能量补偿法补偿的有功功率最小,可以满足较长时间的补偿,但需要注入较大的补偿电压,此补偿方法带来的电压相位变化也可能会引起电压波形的不连续。有文献提出将跌落前电压补偿法和最小能量补偿法相结合的补偿方法,该方法能够解决波形不连续的问题,却要求补偿装置能够输出较高的电压,补偿过程中还可能造成系统电流的严重不对称。

本文中采用不对称级联型多电平逆变器 ACMI (Asymmetry Cascade Multilevel Inverter), 该逆变器具有容易实现大容量化、损耗低、谐波含量小的特点; 在控制策略上, 先采用跌落前电压补偿, 然后平缓过渡到同相位电压补偿, 既保证了负载电压的连续无跳变, 又减小了补偿电压。

1 DVR 的逆变器结构

根据运行方式的需要, DVR 的电压源逆变器可以分为三相三线制和三相四线制两种。前者三相脉冲不能相互独立, 适合于补偿不含零序电压分量的系统; 后者三相之间完全独立, 三个单相可分别控制幅值和相位, 直流电压利用率高, 并可以实现对零序电压分量的补偿。考虑到需要补偿零序电压的情况, 本文选用三相四线制电压源逆变器, 在分析过程中可以看成是三个独立的单相逆变器。

本文中的电压源逆变器采用不对称级联型多电平逆变器(ACMI), 该逆变器输出谐波含量小, 大大简化了输出滤波器的设计。图 1 所示为基于 ACMI 的动态电压恢复器 a 相电路拓扑结构。由图可见, DVR 由储能系统、输出滤波器、电压源逆变器及检测控制系统构成。储能系统由一个小容量 PWM 变流器和储能电容组成, 输出滤波器则由电容 C_f 和电感 $0.5L_f$ 组成。

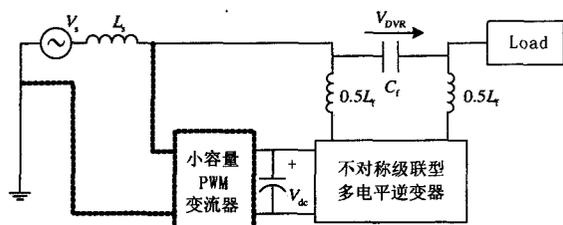


图 1 DVR 的主电路拓扑

Fig.1 Main circuit of DVR

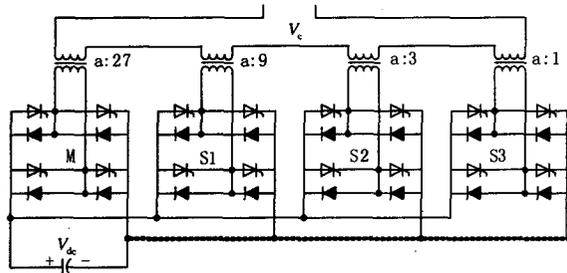


图 2 输出通过变压器隔离的 4 级 81 电平逆变器

Fig.2 Four-stage and 81-level inverter with the output isolated transformer

图 2 为本文所采用的不对称级联型多电平逆变

器(ACMI)的结构^[4~7], 各逆变单元共用一个直流电源, 它们的输出经各自的变压器隔离后串联在一起。

ACMI 的各逆变单元输出变压器的变比呈 3 的幂次方增长, N 个逆变单元级联可产生 3^N 个阶梯电平。因此级联逆变单元越多, 输出电平数也越多, 电压跟踪能力越强, 输出谐波含量越小。考虑到 DVR 的实际需要及系统的复杂程度, 本文选用 4 逆变单元级联而成的 ACMI, 可以输出 40 个正电平, 40 个负电平, 1 个零电平, 共 81 个电平。根据各逆变单元输出功率的不同可以分为主逆变单元(M)和从逆变单元(S)。逆变器的输出调制方面, 本文选用幅值调制。

ACMI 的另一个特点就是不同的逆变单元具有不同的容量和开关频率, 逆变单元的容量越大, 其开关频率就越低。这一特点大大降低了 ACMI 的运行损耗, 在大功率场合, 主逆变单元(M)可以选择容量大而工作频率低的 GTO, 从逆变单元(S)选择 IGBT, 既可以实现 DVR 装置的大容量化, 又降低了系统的成本。

2 控制系统

DVR 的控制系统主要由相位检测、跳变检测、相位合成和参考电压形成等环节组成, 控制系统框图如图 3 所示。图中 u_s , u_L 分别表示系统电压和负载电压, U_{ref} 为参考负载电压幅值, 其值等于负载额定电压的 $\sqrt{2}$ 倍, u_{ref} 为 DVR 的补偿电压参考值, 即逆变器的调制信号。

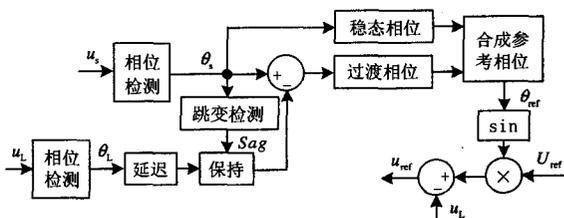


图 3 DVR 控制系统

Fig.3 Control system of the DVR

2.1 相位检测

快速准确地检测出系统电压相位突变时刻及突变值是实现 DVR 控制的关键步骤, 传统的检测方法由于仅适用于三相对称系统或不能快速准确地给出电压跌落的起始时刻及可能出现的相位跳变, 不能做到各单相独立补偿的实时控制。本文通过先构造 $\alpha\beta$ 坐标系下的瞬时电压, 再将该瞬时电压从 $\alpha\beta$ 静止坐标系变换到 dq 旋转坐标系的方法来进行相

位检测^[8]。

设电源瞬时电压为 $u_s = U \sin(\omega t + \varphi)$, 构造 $\alpha\beta$ 静止坐标系下电压 $u_\beta = u_s = U \sin(\omega t + \varphi)$, 将超前 $u_\beta 90^\circ$ 的瞬时电压量作为 u_α , 即 $u_\alpha = U \cos(\omega t + \varphi)$ 。

对 $\alpha\beta$ 静止坐标系中的 u_α 、 u_β 进行坐标变换:

$$\begin{bmatrix} u_d \\ u_q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \omega t & \sin \omega t \\ -\sin \omega t & \cos \omega t \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_\alpha \\ u_\beta \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} U \cos \varphi \\ U \sin \varphi \end{bmatrix} \quad (1)$$

可以得到 dq 旋转坐标系下的两个分量 u_d 、 u_q 。dq 旋转坐标系相对于 $\alpha\beta$ 静止坐标系以工频角速度 ω 旋转, 电压向量则随坐标系同步旋转, u_α 、 u_β 在 dq 旋转坐标系上的投影分别为 $u_d = U \cos \varphi$ 和 $u_q = U \sin \varphi$ 。因此可以根据实测的电源电压的瞬时值构造出 $\alpha\beta$ 静止坐标系中 u_α 、 u_β 分量, 按式(1)进行变换, 即可得到 dq 旋转坐标系下的两个分量 u_d 、 u_q , 则电源基波电压的瞬时相位为:

$$\varphi = \arctan \frac{u_q}{u_d} = \arccos \frac{u_d}{\sqrt{u_d^2 + u_q^2}} \quad (2)$$

由式(2), 只要监视 φ 角的变化就可以得到电源电压相位跳变时刻及跳变量。

2.2 控制策略

对负载而言, 跌落前电压补偿是最优的, 但其经济性差, 不适合提供长时间补偿; 最小能量补偿很好地解决了补偿时间问题, 却要求补偿装置能够注入较大的超前相位的电压, 同时带来的电压相位跳变也是不容忽视的; 同相位电压补偿不能补偿相位变化, 显然对相位波动敏感的负荷无法适用。如果能将多种控制方法结合起来, 则可以扬长避短, 达到令人满意的补偿效果。本文在控制策略上先采用跌落前电压补偿, 然后平缓过渡到同相位电压补偿。补偿控制原理: 相位检测实时检测电源电压和负载电压相位, 跳变检测记录电源电压相位发生跳变的时刻, 当跳变检测单元检测到电源电压相位发生跳变时, 产生脉冲信号, 保持器将电源电压跳变前一刻的负载相位锁定, 系统根据电源电压相位角和被锁定的负载电压相位角计算出相位角突变量, 进而计算出过渡相位角的变化规律, 稳态相位角与电源电压相位角相同。

设发生相位突变后电源电压相位为 θ_s , 而突变前一刻的负载相位(等于突变前的电源电压相位)

为 θ_L , 则过渡相位角 θ_d 变化规律为:

$$\theta_d = \theta_L + (\omega + \omega_0)t \quad 0 \leq t \leq \frac{\theta_s - \theta_L}{\omega_0} \quad (3)$$

$$\text{或} \quad \theta_d = \theta_L + \left(\omega + \frac{\theta_s - \theta_L}{T}\right)t \quad 0 \leq t \leq T \quad (4)$$

式(3)为恒相位变化率条件下的过渡相位角变化规律, ω_0 为相位变化率, 当 $\theta_s > \theta_L$ 时, ω_0 取正值, $\theta_s < \theta_L$ 时, ω_0 取负值; 式(4)为恒时间条件下的过渡相位角变化规律(即无论相位角跳变多少, 系统都会在相同的时间内完成过渡过程), 相位角过渡时间为 T , ω 为工频角速度。图 3 中稳态时的相位 θ_{ref} 等于 θ_s (也等于 θ_L), 而过渡过程中的 θ_{ref} 则等于 θ_d , 由式(3)和式(4)容易看出, 过渡过程的起始时刻相位 θ_{ref} 等于 θ_L , 即发生电压跌落前的负载相位, 过渡终止时刻的相位 θ_{ref} 等于 θ_s , 整个过渡过程相位 θ_{ref} 完成了从跌落前电源电压相位到跌落前电源电压相位的缓慢变化。

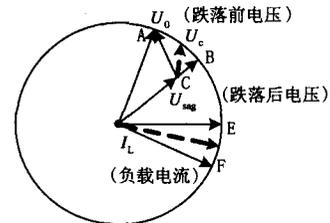


图 4 电压跌落补偿示意图

Fig.4 Compensation sketch map

动态补偿过程如图 4 所示, 设跌落前电压为 U_0 , 跌落前电压为 U_{sag} , 补偿电压为 U_c 。当电源电压由图示中的 A 点突变到 C 点时, DVR 的补偿电压将从 CA 沿弧 AB 平缓过渡到 CB, 之后便稳定在 B 点运行, 负载电流也从运行点 E 平缓过渡到 F 点, 补偿方式则从跌落前电压补偿过渡到同相电压补偿。

3 Matlab 仿真分析

利用 Matlab/Simulink 对单相电压跌落用文中的检测和控制方法进行检验。仿真中设定相电压的有效值为 220 V, 频率为 50 Hz, 在 0.042 s 发生电压跌落, 跌落幅值至额定电压的 80%, 并伴随有 30° 的相位突变, 0.12 恢复正常。仿真步长为 $2 \mu s$, 相位角过渡采用恒相位角变化率方式, 采用文中所述的检测和补偿控制方法得到的仿真波形如图 5 和图 6 所示, 而采用跌落前电压补偿法和同相电压补偿法的仿真波形如图 7、图 8 所示。

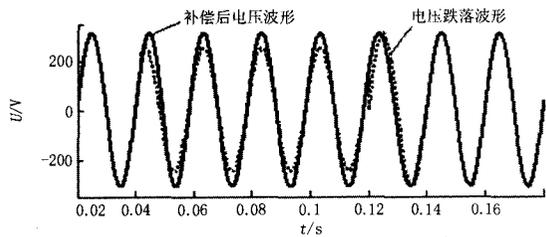


图5 电压跌落波形及补偿后波形

Fig.5 Voltage sag waveform and the voltage waveform after compensation

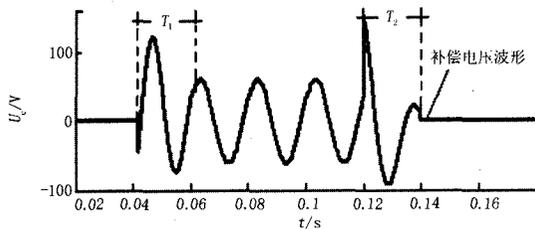


图6 DVR补偿电压波形

Fig.6 Voltages required for compensation

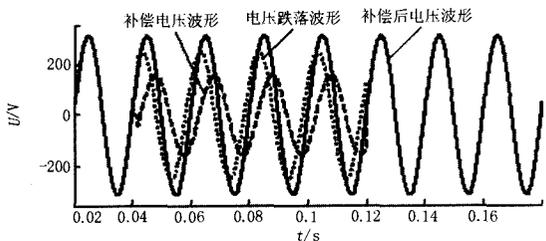


图7 跌落前电压补偿波形图

Fig.7 Waveform of pre-sag phase compensation

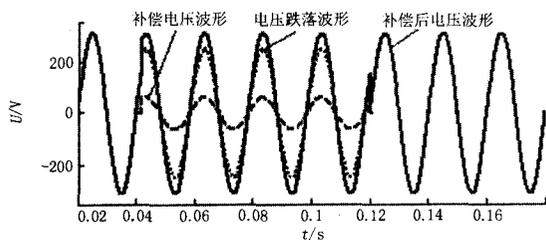


图8 同相电压补偿波形图

Fig.8 Waveform of post-sag phase compensation

由图5可以看出采用本文中所提出的补偿控制策略,在发生电压跌落时,负载电压是平滑无突变的。DVR输出的补偿电压(图6),仅在电压跌落发生和结束的过渡时间内(图中 T_1 , T_2)较大,其最大值分别达到120V和150V,在过渡过程中DVR的输出电压也是不断减小的,稳态补偿电压幅值为61V。采用跌落前电压补偿法和同相电压补偿法(分别如图7、图8所示)时,DVR的输出电压幅值分别为156V和61V。由以上分析可知,采用跌落前电压补偿法时,DVR的输出电压幅值不仅远大于同

相电压补偿法的DVR输出电压幅值,也大于本文中所提出的补偿策略下的DVR输出电压最大值,同相电压补偿法的DVR输出电压与本文提出的补偿策略下的DVR稳态输出电压一致。故本文中所提出的补偿控制策略是完全可行的,且补偿效果较好,DVR的输出电压仅在过渡阶段稍大,在稳态阶段与同相电压补偿法完全相同,总的能量消耗与同相电压补偿法接近。若发生电压跌落时没有相位突变,则文中所提出的补偿方法、同相电压补偿法和跌落前电压补偿法三者完全相同。

4 结语

本文将不对称级联型多电平逆变器应用于动态电压恢复器中,使得DVR可实现大容量化,并有效减小了DVR的输出谐波和其自身的损耗。提出了将跌落前电压补偿和同相电压补偿相结合的控制策略,确保了负载电压不会发生突变,消除了以供电压相位作为运行驱动的系统因电源电压相位跳变可能引起的晶体管误动作,而补偿所需的电压较跌落前电压补偿法小。

参考文献

- [1] 尹忠东,丁辉,张哲然,等.级联多电平动态电压恢复器的仿真与试验研究[J].电力电子技术,2005,39(5):63-65.
YIN Zhong-dong, DING Hui, ZHANG Zhe-ran, et al. A Simulation and Physical Experiment Study on Transformerless Cascaded Multi-level Dynamic Voltage Restorer[J]. Power Electronics, 2005, 39(5): 63-65.
- [2] 周晖,齐智平.动态电压恢复器检测方法与控制策略综述[J].电网技术,2006,30(6):23-29.
ZHOU Hui, QI Zhi-ping. A Survey on Detection Algorithm and Restoring Strategy of Dynamic Voltage Restorer[J]. Power System Technology, 2006,30(6): 23-29.
- [3] 李彦栋,王凯斐,卓放,等.动态电压恢复器锁相技术和控制策略的研究[J].电力电子技术,2004,38(2):24-26.
LI Yan-dong, WANG Kai-fei, ZHOU Fang, et al. Study of Phase Locked Technique and Control Strategies of Dynamic Voltage Restorer[J]. Power Electronics, 2004, 38(2):24-26.
- [4] Dixon J, Moran L. Multilevel Inverter, based on Multistage Connection of Three-level Converters, Scaled in Power of Three[A]. In Proc. IEEE 2002 Industrial Electronics Conf[C]. Spain:2002.
- [5] Ortuzar M, Carmi R, Dixon J, et al. Voltage Source Active Power Filter, Based on Multi-stage Converter and Ultracapacitor DC-Link[A]. In: IEEE[C]. 2003.

(下转第60页 continued on page 60)

断的开销时间最大不能超过 100 μ s 减去采样及存放时间, 否则可能出现漏采样点的现象。

3 结论

1) 故障录波装置的设计采用嵌入式技术能大大提高装置的可靠性;

2) 嵌入式数据采集、嵌入式大容量存储、嵌入式以太网通信、嵌入式实时操作系统是实现完全嵌入式故障录波的关键技术。

参考文献

- [1] ZHAO Zi-gang, ZHAO Chun-lei, XIAO Yan. Some New Ideas About the Development of Fault Recorder, Power System and Communications Infrastructures for the Future[M]. Beijing: China Electric Power Press, 2002.
- [2] 骆健, 丁网林, 唐涛. 国内外故障录波器的比较[J]. 电力自动化设备, 2001.
- LUO Jian, DING Wang-lin, TANG Tao. Comparison of Domestic and Foreign Fault Recorders[J]. Electric Power Automation Equipment, 2001.
- [3] 何立民. 嵌入式系统的定义与发展历史[J]. 单片机与

嵌入式系统应用, 2004.

HE Li-min. Definition of Embedded System and Its Development History[J]. Microcontrolles & Embedded Systems, 2004.

- [4] DL/T553-1994, 220~500 kV 电力系统故障动态记录技术准则[S].
- DL/T553-1994, 220~500kV Power System Fault Dynamic Recording Techanology Principle[S].
- [5] 吴在军, 胡敏强, 杜炎森. 嵌入式以太网在变电站通信系统中的应用的研究[J]. 电网技术, 2003.
- WU Zai-jun, HU Min-qiang, DU Yan-sen. Application of Embedded Ethernet to Communication Networks in Substations[J]. Power System Technology, 2003.

收稿日期: 2007-01-04 修回日期: 2007-03-07

作者简介:

张敏(1972-), 男, 电气工程师, 主要从事电力生产技术管理工作; E-mail: gdmzhangmin@163.com

黄翠莲(1974-), 女, 电气工程师, 主要从事电网运行方式管理工作;

杨毅斌(1975-), 男, 电气工程师, 主要从事电力生产技术管理工作。

(上接第 52 页 continued from page 52)

- [6] Rudnick H, Dixon J, Morán L. Delivering Clean and Pure Power Active Power Filters As a Solution to Power Quality Problems in Distribution Networks[J]. IEEE power & Energy Magazine, 2003.
- [7] 丁洪发, 段献忠, 朱庆春. 基于不对称级联型逆变器的串联混合有源电力滤波器[J]. 电力系统自动化, 2005, 29(20): 1-6.
- DING Hong-fa, DUAN Xian-zhong, ZHU Qing-chun. Series Active Power Filter Based on Asymmetry Cascade Multilevel[J]. Automation of Electric Power Systems, 2005, 29(20): 1-6.
- [8] 杨亚飞, 颜湘武, 姜尧林. 一种新的电压骤降特征量检

测方法[J]. 电力系统自动化, 2004, 28(2): 41-44.

YANG Ya-fei, YAN Xiang-wu, LOU Yao-lin. A New Method to Detect Voltage Sag Characteristics[J]. Automation of Electric Power Systems, 2004, 28(2): 41-44.

收稿日期: 2006-12-27 修回日期: 2007-03-09

作者简介:

王德发(1983-), 男, 硕士研究生, 研究方向为电力电子技术中的应用; E-mail: liary0910@163.com

丁洪发(1973-), 男, 副教授, 研究方向为电能质量和 FACTS 技术。

(上接第 56 页 continued from page 56)

- [4] IEC61850-5, Communication Networks and Systems in Substation -Part 5: Communication Requirements for Functions and Device Models[S].
- [5] IEC61850-6, Communication Networks and Systems in Substation -Part 6: Configuration Description Language for Communication in Electrical Substations Related to IEDs[S].
- [6] IEC61850-10, Communication Networks and Systems in Substation -Part 10: Conformance Testing[S].

收稿日期: 2007-04-16 修回日期: 2007-05-10

作者简介:

黄欣(1972-), 男, 工程师, 从事电力系统调度自动化工作, 主要研究方向为电力系统自动化、调度自动化;

E-mail: huangx@gzpsc.com

贺春(1973-), 男, 硕士, 主要研究方向为电力系统自动化、通信规约及规约测试。