

地铁电梯动态电能质量治理方案应用研究

针对以电压跌落、骤升及瞬时中断为代表的电梯暂态电能质量问题对城市轨道交通运营安全造成的影响,提出一种基于超级电容储能单元,并结合超宽范围Boost升压技术的快速检测方法和精准补偿策略的治理方案。仿真和试验结果表明研究的电梯暂态电能质量治理方案准确性和有效性,能快速响应电网的各类暂态电能质量问题,实现全方位三相电压补偿。北京地铁车站挂网试运行结果表明治理方案提高了城市轨道交通电梯系统整体的运营安全可靠性能,研究成果填补了国内相关领域的空白。

崔霆锐 刘 辉 宗立明 刘 博/北京市地铁运营有限公司地铁运营技术研发中心

0 引言

城市轨道交通车站应用了大量公共交通重载型自动扶梯和直梯,电梯的安全稳定运行成为轨道交通运营重点关注的对象。现代供电网络中,以电压跌落、骤升及瞬时中断为代表的暂态电能质量问题造成的危害最为普遍。在城市轨道交通行业,由于暂态电能质量问题引起的电梯瞬时停运事件数量呈逐年上升趋势,据不完全统计该类事故已造成数十名乘客摔伤。

针对暂态电能质量问题,世界各国相继开展了对动态电压补偿方案——电压恢复器(DVR)的研究。主要研究趋势为更高功率密度的储能单元和更为简便准确的控制算法^[1-6]。对于储能方式,文献[7]提出了飞轮储能策略,该方式成

本低廉、寿命长,但机械摩擦和开关损耗严重;文献[8]提出了蓄电池储能方法,蓄电池容量大但寿命短、效率低。文献[9]提出了一种利用可逆整流器直接从系统获取能量的方法,此方法成本低廉但不适用于电压严重跌落的工况。关于检测方法,文献[10]提出的FFT变换法简便但实时性不够,约有一个周期的延时;小波变换法^[11]算法复杂且计算量大,在工程上不易实现;基于瞬时无功功率的 dq 变换法^[12]目前应用较多,该算法准确度高、实时性好。我国相关领域研究起步很晚,与国外有较大差距,多停留在仿真试验阶段,缺少工业运行的经验,有待实际应用的检验。

对于城市轨道交通用地铁,目前传统的DVR只能部分解决暂态电能质量问题,不能完全适应其电梯的特殊工况要求^[13]。本文设计了一种新型暂态电能质量治理方案,将超级电容器作为储能单元,采用 $dq0$ 电压检测法,利用超宽范围Boost技术结合到具有良好工作特性的动态电压恢复器中,就可以全方位彻底消除各类暂态电能质量问题对电梯运行可靠性造成的影响,从而在本质上提高了城市轨道交通整体的运营安全性。

1 电梯电压补偿方案的原理

电梯暂态电能质量治理装置串联在系统供电线路和负荷之间。主回路模块如图1所示,正常工作时,由晶闸管负责电网与负载连接,同时旁路接触器 K_2 、 K_3 处于闭合状态;在维护操作时,由旁路开关直接旁路DVR装置,为负载供



崔霆锐/工程师

关键词/Keywords

动态电能质量·
城市轨道交通·
电压检测·
补偿策略·
运营安全·

“十二五”国家科技支撑计划课题《下一代地铁车辆技术研究及示范应用》(2015BAG13B01),北京市地铁运营有限公司科研项目《电梯暂态电能质量治理装置的研制与应用》(2014000501000003)。

电。同时在DVR输出侧配备一组压敏电阻，抑制来自电网的浪涌冲击。

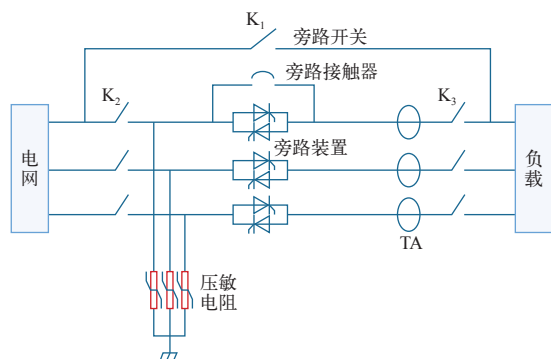


图1 主回路模块

2 结构设计与控制算法

电压检测采用改进的基于瞬时无功功率的快速dq0变换法，极大提升了系统响应速度。

2.1 电压跌落检测

dq0电压检测法是基于Park变换的动态电压检测法，这种方法避免了其他方法的计算延时间题，能实现电压跌落（或骤升）的快速准确判断。该方法首先将检测到的三相电网电压由abc静止坐标系下转换到dq轴同步旋转坐标系下^[14]，即

$$\begin{pmatrix} u_d \\ u_q \\ u_0 \end{pmatrix} = C \begin{pmatrix} u_a \\ u_b \\ u_c \end{pmatrix} \quad (1)$$

其中，C为Park变换矩阵，即

$$C = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{pmatrix} \cos \omega t & \cos \left(\omega t - \frac{2\pi}{3} \right) & \cos \left(\omega t + \frac{2\pi}{3} \right) \\ -\sin \omega t & -\sin \left(\omega t - \frac{2\pi}{3} \right) & -\sin \left(\omega t + \frac{2\pi}{3} \right) \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{pmatrix} \quad (2)$$

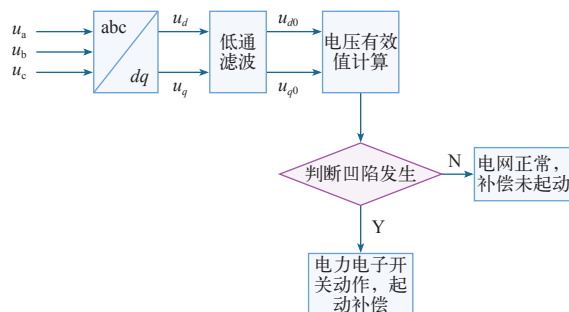
此时，对于变换后的电网电压有

$$\begin{pmatrix} u_d \\ u_q \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} u_{d0} + u_{dh} \\ u_{q0} + u_{qh} \end{pmatrix} \quad (3)$$

式中， u_{d0} 与 u_{q0} 为直流电压量； u_{dh} 与 u_{qh} 为电网中谐波量，电网电压的基波有效值可以表示为

$$u = \sqrt{u_{d0}^2 + u_{q0}^2} \quad (4)$$

将计算得到的电压有效值与正常情况下电网电压有效值进行比较，就可以判断出电压是否发生跌落问题，其检测流程如图2所示。



2.2 锁相环及滤波器

dq0电压检测法基于Park坐标系变换，设计了数字锁相环代替传统的三角函数发生器，并采用截止频率 f_c 为100 Hz的二阶巴特沃斯低通滤波器，以消除电网中各次谐波对被测直流量的影响。

三相数字锁相环利用同步旋转dq坐标系实现与电网三相电压合成矢量的同步，达到锁相效果，同时还可以对幅值和频率进行估计。锁相环基本结构如图3所示，PI为环路滤波器，积分环节为压控振荡器^[15]，为压控振荡器的固有频率，这里就是电网电压的固定频率 100π rad。

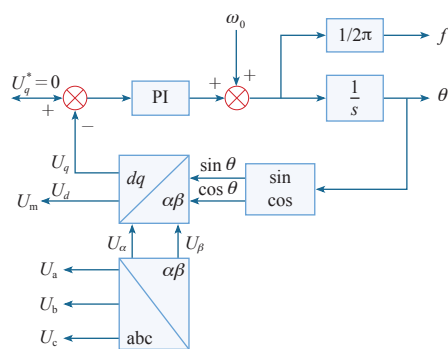


图3 三相数字锁相环的原理图

U_q 的参考电压 $U_q^* = 0$ 为直流电压，两者误差经过PI调节器，通过积分环节消除直流电压控制的静态误差，因此稳态时有 $U_q = U_q^* = 0$ ，得到 $\theta = \theta^*$ ，即输出相位和输入电压相位 θ^* 一致，进入“锁定”状态。同时，通过设计的锁相环还可以得到三相电

压的幅值信息 U_m 和频率信息 f 。

2.3 逆变器控制系统

电梯暂态电能质量治理装置主电路的核心为三相逆变器，其输出的电压将直接供给负载。逆变器控制系统的设计要在保证装置快速响应的同时，具有良好的稳态性能。本控制系统利用Boost升压技术结合SVPWM算法^[16]实现了直-交变换，电压跌落时能及时满足负载侧电压的稳定。控制系统主要通过380 V电网为其供电，当电网电压异常时，通过超级电容为控制系统提供备用电源。

3 仿真结果

基于 $dq0$ 电压检测法的单相电压仿真如图4所示。用三个单相电压检测模块来判断各相是否发生电压跌落（或骤升），只要有一相发生，装置就获得起动信号，同时交流电力电子开关切断电网对负载的电力供应。从仿真波形可以看出基于 $dq0$ 的电压检测能迅速准确地检测出电压跌落的发生，触发逆变器工作。

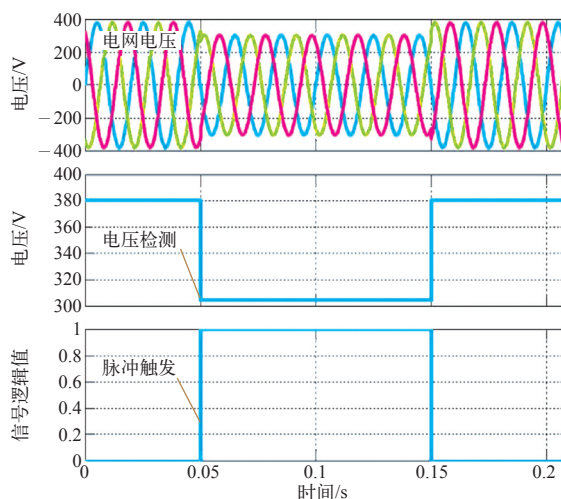


图4 三相电压跌落至0.8(pu)持续0.1 s检测波形

设置仿真工况在0.05 s和0.07 s时三相电压相角跳变 5° ，仿真波形如图5所示，可知设计的锁相环能帮助实时调节逆变器输出电压的频率和相位，使其与电网电压保持同步锁定状态。

4 挂网试验结果

试验方案原理如图6所示，400 V三相三线配电

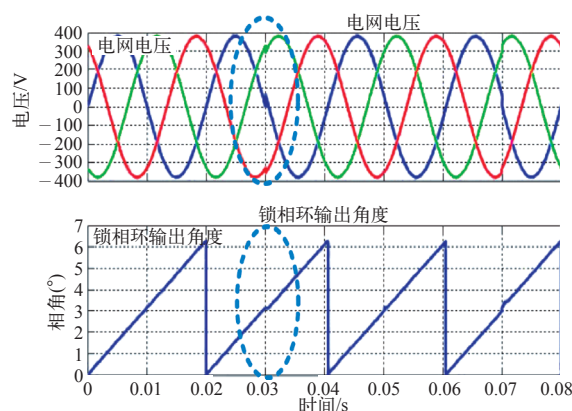


图5 相角跳变 5° 时锁相环暂态性能

柜和电梯负荷为北京地铁车站已有设备，电压发生器可以模拟系统电压跌落、骤升和瞬时中断等各种故障。共有两个测试点M和N。M点测试电压发生器输出相电压，可给出电压跌落、骤升和瞬时中断等各种故障描述。N点测试电梯暂态电能治理装置输出给电梯负荷的相电压和相电流，N点波形可反映装置的补偿性能。

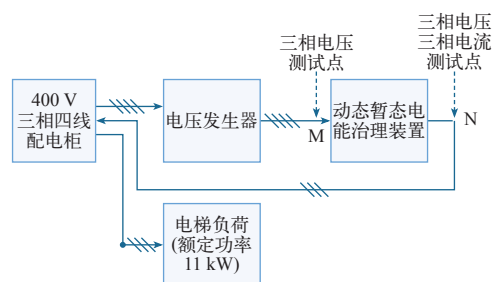
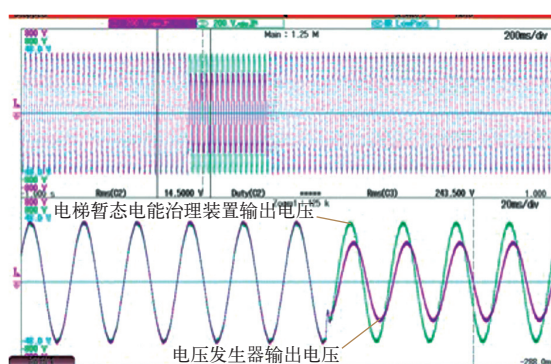


图6 试验方案原理图

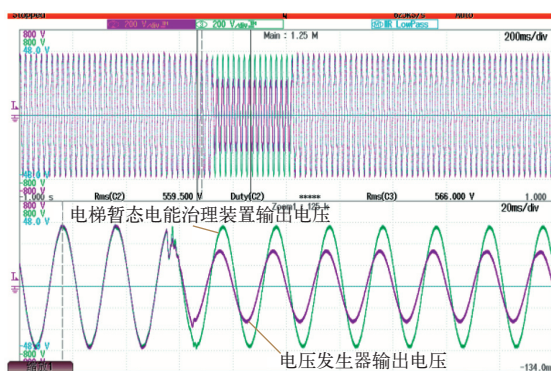
图7a为单相电压跌落至25%(pu)持续0.3 s的试验波形；图7b为两相电压跌落至50%(pu)持续0.3 s的试验波形；图7c为三相电压中断9 s的试验波形；图7d为三相电压骤升至130%(pu)持续0.3 s的试验波形。试验结果表明当系统电压发生跌落、骤升和瞬时中断等各种故障时，电梯暂态电能治理装置可以将系统电压补偿至额定电压，且可补偿持续时间达8 s以上，整机响应速度小于2 ms，大幅度提高了电梯运行的稳定性。

5 挂网试运行结果

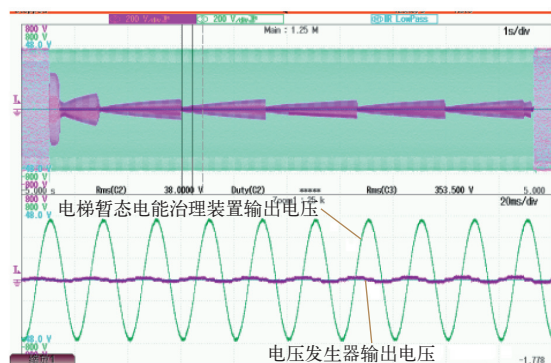
为了在实际运营工况下进一步验证电梯暂态电能质量治理装置是否满足现场使用要求，在完



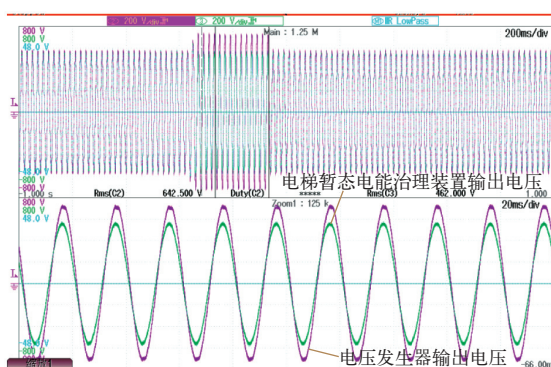
(a) 单相 (A相) 电压跌落至25%(pu)试验



(b) 两相 (BC相) 电压跌落至50%(pu)试验



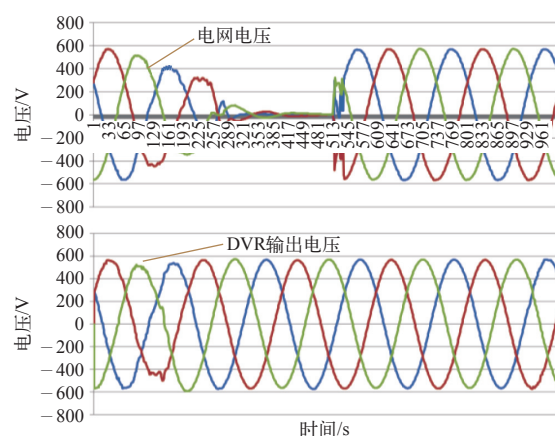
(c) 三相电压中断9 s试验



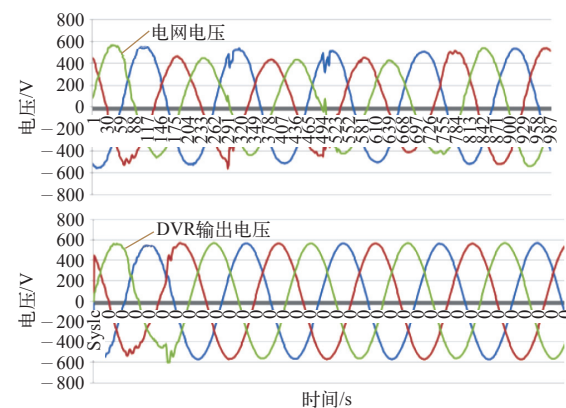
(d) 三相电压骤升至130%(pu)试验

图7 北京地铁某车站挂网试验波形

成挂网试验的基础上进行了为期3个月的挂网试运行,考核DVR对电网电压异常波动的检测情况和补偿情况。调整测试线路,将发生器从串联线路中去除,即电网直接连接DVR然后接电梯负载。试运行期间DVR检测到电网出现多次电压异常波动,并进行补偿。图8a为一次重合闸作业造成电网电压瞬时中断的补偿记录波形;图8b为一次两相电网电压跌落造成全站停梯事故的补偿记录波形。DVR输出电压维持稳定,有效保障了电梯负荷的正常运行。



(a) 三相跌落到几乎为0(pu),持续时间0.08 s



(b) BC两相、CA两相跌落到75%(pu),持续时间0.11 s

图8 北京地铁某车站挂网试运行波形

6 结束语

本文提出了一种新型电梯暂态电能质量治理方案,与传统DVR相比主要技术创新点如下。

1) 采用快速检测方法和相应的补偿策略,使整机响应速度小于2 ms,远超前传统的检测速度5~10 ms;持续补偿时间大于10 s,可以维持供电

公司倒闸操作不停梯。

2) 传统DVR只能解决跌落不超过40%(pu)的暂态电能质量问题, 由于采用基于超级电容器的储能单元, 并结合超宽范围Boost升压电路, 实现包括0~0.9(pu)的低电压和1.15~1.8(pu)高电压情况下的全范围补偿。

3) 模块化定制, 储能时间和放电深度可根据车站和电梯实际情况灵活定制。

4) 环保免维护, 寿命长, 超级电容采用环保材料所制, 充放电次数不受限制, 可以最大限度节约运营维护成本和工作量。

试运行提供了宝贵的工业运行经验, 研究成果填补了我国轨道交通行业对电梯暂态电能质量治理的空白。

参考文献

- [1] Barros J D, Silva J F. Multilevel optimal predictive dynamic voltage restorer [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2010, 57 (8) : 2747-2760.
- [2] 李哲, 吴正国, 夏立, 等. 任意负载条件下动态电压恢复器的复合谐振控制策略 [J]. 中国电机工程学报, 2013, 33 (25) : 130-138.
- [3] 瞿硕, 黄纯, 江亚群, 等. DVR电压暂降检测新方法 [J]. 电工技术学报, 2013, 28 (4) : 234-239.
- [4] Kangarlu M F, Babaei E. Operation of AC chopper as downstream fault current limiter and overvoltage compensator [C]. 2nd Power Electronics, Drive Systems and Technologies Conference, Tehran, 2011: 403-407.
- [5] Jothibas S, Mishra M K. A control scheme for storageless DVR based on characterization of voltage sags [J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2014, 29 (5) : 2261-2269.
- [6] Zhang S, Tseng King Jet, Vilathgamuwa D M, et al. Design of a robust grid interface system for PMSG-based wind turbine generators [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2011, 58 (1) : 316-328.
- [7] Rubens Andrade, Antonio C Ferreira, Guilherme G Sotelo, et al. Voltage sags compensation using a superconducting flywheel energy storage system [J]. IEEE Transactions on Applied Superconductivity, 2005, 15 (2) : 2265-2268.
- [8] Ramachandramurthy V K, Fitzer C, Arulampalam A, et al. Control of a battery supported dynamic voltage restorer [J]. IEE Proceedings - Generation, Transmission and Distribution, 2002, 149 (5) : 533-542.
- [9] Vilathgamuwa D M, Wijekoon H M. Control and analysis of a new dynamic voltage restorer circuit topology for mitigating long duration voltage sags [C]. Conference Record of the 37th IAS Annual Meeting, 2002, 2: 1105-1112.
- [10] 秦英林, 田立军. 短时电压扰动检测与定位新方法 [J]. 电力系统保护与控制, 2010, 38 (4) : 21-30.
- [11] 王克星, 宋政湘, 陈德桂, 等. 基于小波变换的配电网电压暂降的干扰源辨识 [J]. 中国电机工程学报, 2003, 23 (6) : 29-34.
- [12] 冯小明, 杨仁刚. 动态电压恢复器的形态学—dq变换综合检测算法 [J]. 中国电机工程学报, 2004, 24 (11) : 193-198.
- [13] 王晶, 徐爱亲, 翁国庆, 等. 动态电压恢复器控制策略研究综述 [J]. 电力系统保护与控制, 2010, 38 (1) : 145-151.
- [14] 瞿硕, 黄纯, 江亚群, 等. DVR电压暂降检测新方法 [J]. 电工技术学报, 2013, 28 (4) : 234-239.
- [15] 蓝建宇, 唐厚君, 耿欣. 感应耦合电能传输系统自持振荡 [J]. 电机与控制学报, 2015, 19 (5) : 7-13.
- [16] 吴德会, 夏晓昊, 张忠远. 基于三相桥臂坐标的SVPWM过调制方法 [J]. 电工技术学报, 2015, 30 (1) : 150-158.

(收稿日期: 2016-07-04) **EA**