

基于多级电压注入式 STATCOM 装置的性能研究

云平平¹, 杨宝峰², 刘永和³, 何勇¹

(1. 内蒙古电力科学研究所, 内蒙古 呼和浩特 010051; 2. 中国科学院, 北京 100000;
3. 内蒙古工业大学, 内蒙古 呼和浩特 010051)

摘要: 对一种新型的多级注入式电压源型变流器进行分析和研究。它可以进一步消除谐波, 解决可串接开关技术的动态电压平衡问题, 大大提高了高功率变流器的运行效率和可靠性。同时它结合了二极管嵌位多级变流器、多级注入式 VSC 以及软开关的优点。它可以作为一个理想的 STATCOM 装置使用, 在仿真中, 使用了 EMTDC-PSCAD 进行了稳态、动态的详细分析。证实了它能大大减小谐波含量, 降低开关损耗。

关键词: 静止同步补偿器; 谐波畸变; 二极管嵌位; 多级注入

STATCOM performance based on a multi-level voltage reinjection

YUN Ping-ping¹, YANG Bao-feng², LIU Yong-he³, HE Yong¹

(1. Inner Mongolia University of Technology, Huhehaote 010051, China; 2. China Electric Power Research Institute, Beijing 100000, China; 3. Inner Mongolia Industrial University, Huhehaote 010051, China)

Abstract: This paper discusses a new concept of multi-level reinjection VSC, its main purpose being a further reduction of the harmonic content, a solution of dynamic voltage balancing for direct series connected switching devices and an improvement of high power converter efficiency and reliability. In simulation, EMTDC-PSCAD is used to illustrate the steady state and dynamic performance in details. The VSC is showed to be a ideal solution for the statcom application. It is showed that this configuration provide very low distortion levels and reduced switching losses.

This project is supported by National Natural Science Foundation of Inner Mongolia State(No.200408020802).

Key words: STATCOM; harmonics distortion; diode clamped; multi-level reinjection

中图分类号: TM711 文献标识码: A 文章编号: 1003-4897(2007)01-0054-05

0 引言

新型硅功率开关器件(GTO、IGBT、IGCT)构成的自然换相的电压源变流器具有高可靠性, 低功耗的特点, 同时可以灵活地控制有功、无功功率, 所以很容易应用到柔性交流输电装置(FACTS)中。同时随着新型器件其成本的降低以及功率等级的不断提高, 相比 SVC 而言, 静止无功补偿器(STATCOM)将更有竞争力。

本文提出了一种新型结构——多级电压注入的电压源变流器(Multi-Level Voltage Reinjection Voltage Source Converter), 这种新型变流器具有输出波形理想、低功耗、运行可靠

等优点, 所以它非常适合用于大功率的静止同步补偿器(STATCOM)。同时这种 STATCOM 装置结合了二极管嵌位的多电平电路、直流电压注入、以及软开关的优点设计而成, 在这种新方案中, 我们对 7 级电压注入电路作了具体分析, 交流输出为 84 级阶梯电压波形。就谐波含量而言, 通常情况为了达到电能质量的要求, 我们没有必要应用如此高级数的电路。但是多级电压可以提高电压等级, 同时它又能解决动态电压的平衡问题。所以它非常适合应用于大功率、高电压场合。

同时, 这种多级注入式自然换相变流器还可以通过背靠背连接去实现两个交流系统的异步连接^[1]。在直流输电应用中, 与传统电网换相的直流输电装置相比, 由于自然换相变流器不存在换相失败的问题, 同时它又能起到静止同步补偿器的作用, 可以应用到直流输电系统^[6]。

基金项目: 内蒙古自治区自然科学基金资助项目(200408020802)

1 电路结构以及工作原理

1.1 电路拓扑结构

图 1 所示: 此电路由一个基本十二脉冲桥和一个附加注入电路构成, 其中注入电路是为主控桥提

供所需的多级电压, 我们证明得到, 理想注入是 6 倍基频电压, 而且当直流侧电压和注入电压在幅值上满足一定的关系式^[2], 我们在理论上证明了在交流侧可以得到无谐波的标准正弦波。

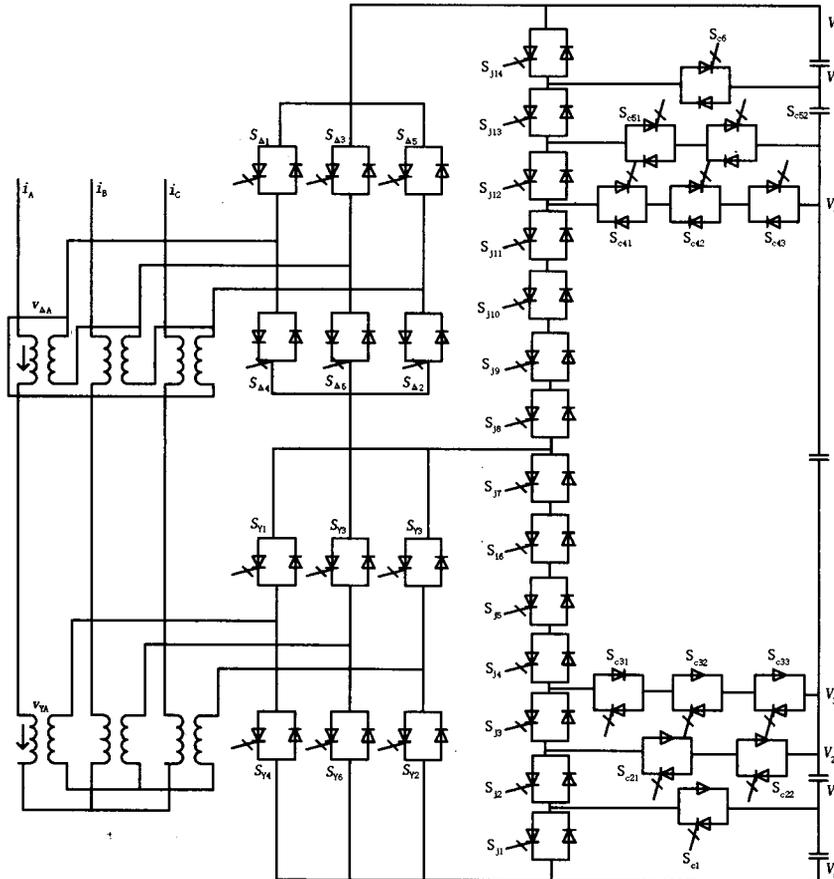


图 1 多级电压注入电压源型变流器

Fig.1 Multi-level voltage reinjection

在此结构中, 变流桥采用移相二重联结, 变压器二次侧分别采用星形和三角形联结, 构成相位相差 30° 、大小相等的两组电压, 接到相互串联的两组变流桥。因绕组联结不同, 变压器一次绕组和两组二次绕组的匝比为 $k_n: 1: \sqrt{3}$, 每个桥臂由全控型器件 IGBT 或 GTO 晶闸管串联而成。它所需的器件最少, 而我们熟悉的多电平拓扑结构中, 如: 二极管嵌位电压源变流器 (DIODE CLAMPED VSC) 等^[10], 所需嵌位开关器件和级数平方成比例增加。而在此方案中, 注入支路由 26 只 GTO 构成, 相对注入点上下对称, 在直流侧接有 7 只等容量的电容可以去承受高电压, 同时可以提供 8 级注入电压。在注入支路中串联去承受高电压, 水平放置的开关是实现嵌位路径, 其中, S_{j4} 到 S_{j7} 和 S_{j8} 到 S_{j11} 串联支路为

产生的多级电压的共用路径, 而且在其串联支路上无须嵌位。

1.2 工作原理

为了便于分析, 令 $V_0=0$, $V_7=U_{dc}$ 通过注入支路产生一个七级注入电压 V_0-V_7 。那么加到主控桥电压 $V_{Y\Delta}=U_j$, $V_{Y\Delta}=U_{dc}-U_j$, 且 $U_{Y\Delta}$ 和 $U_{Y\Delta}$ 之和就是直流侧电压 U_{dc} , 因此 $U_j=V_7$ 时, 加到 Y- Δ 桥的电压为零, 为主控桥开关动作提供了零电压 (ZVS), 当 $U_j=V_0$, 将为 Y-Y 桥提供零电压条件 (ZVS)。可以得到, 零电压条件是通过注入支路开关装置的导通状态去嵌位主控桥的开关元件。在这一多级电压注入方案中, 采用的软开关技术不是建立在 L-C 谐振的基础上, 而是依靠嵌位和阻断的作用来提供零电压。结合图形, 我们可以列出产生多级电压的开关组合:

$U_j = V_0$ 时, 有 S_{j1} 到 S_{j7} 串联支路导通, 其余的开关将关断;

$U_j = V_1$ 时, 有 S_{j2} 到 S_{j7} 串联支路导通, 以及嵌位开关 S_{c1} 导通, 其余的开关关断;

$U_j = V_2$ 时, 有 S_{j3} 到 S_{j7} 串联支路导通, 以及嵌位开关 S_{c21} 、 S_{c22} 导通, 其余的开关关断;

$U_j = V_3$ 时, 有 S_{j4} 到 S_{j7} 串联支路导通, 嵌位开关 S_{c31} 、 S_{c32} 、 S_{c33} 导通, 其余的开关关断;

$U_j = V_4$ 时, 有 S_{j8} 到 S_{j11} 串联支路导通, 嵌位开关 S_{c41} 、 S_{c42} 、 S_{c43} 导通, 其余的开关关断;

$U_j = V_5$ 时, 有 S_{j8} 到 S_{j12} 串联支路导通, 嵌位开关 S_{c51} 、 S_{c52} 通; 其余的开关关断;

$U_j = V_6$ 时, 有 S_{j8} 到 S_{j13} 串联支路导通, 嵌位开关 S_{c61} 导通; 其余的开关关断;

$U_j = V_7$ 时, 有 S_{j8} 到 S_{j14} 串联支路导通, 其余的开关关断。

自然换相开关串联的主要问题是动态电压的平衡问题^[9], 以及 DV/DT 变化率。而在这个新方案中, 加到主控桥的电压是阶梯电压, 而且通过注入支路的阻断, 可以为主控桥提供零电压, 这样就有效地解决了大功率应用难题。

同时阶梯注入电压可以使注入支路的开关在低压下关断, 例如, 当 U_j 从 V_6 到 V_4 变化时, 我们让 S_{c31} 、 S_{c32} 、 S_{c33} 继续导通, 而关断 S_{j4} 到 S_{j7} 的串联开关, 当 S_{j8} 到 S_{j11} 串联支路以及 S_{c41} 、 S_{c42} 、 S_{c43} 导通, 关断 S_{c31} 、 S_{c32} 、 S_{c33} 。所有的开关开通、关断在一级电压下进行。

1.3 本方案触发时序以及电压平衡控制

对于该 STATCOM 装置, 多电平的稳定性是值得重视和改善的, 而稳定性主要是取决于电容电压的平衡, 在实验中, 我们采用了一个简单的控制器去实现其稳定性。控制框图如图 2 所示: 其中串联电容电压 V_i 作为参考值, 其余的串联电容两端电压 $V_i - V_{i-1}$ ($i=1, 2, \dots, 7$) 作为控制量, 去逼近 V_i 值。Q 为装置输出无功功率的实际测量值, 它的极性去控制导通间隔 δ_i 的改变方向, 通过控制器调整多级电压的导通间隔 δ_i 的大小, 从而达到多级电压的平衡控制。

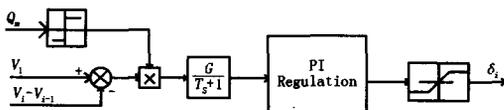


图 2 多级电压平衡控制器

Fig.2 Multi-level voltage balanced control loop

仿真中得到的多级电压如图 3 所示。从仿真结果可以得到, 各级电压的斜率相等, 得到的多级电压近似相等, 达到电容电压的平衡控制, 从而得到稳定的多级输出电压。

在触发控制中, 为了解决串联开关的动态电压的平衡问题, 二极管嵌位电路采用异步触发控制, 因此级数越高它的触发控制愈复杂。该多级电压注入式 VSC 可以为主控桥提供零电压, 且采用同步控制。与传统的 12 脉冲具有相同的触发控制, 不同的是注入支路的触发控制, 我们都作了具体的分析, 且作了 EMTDC 仿真。对于注入桥的触发控制, 我们注入的是 6 倍基频的多级注入电压, 在 30° 内产生 V_0 到 V_7 的上升多级电压, 在下一个 30° 产生 V_7 到 V_0 下降多级电压。 V_0 、 V_7 分别为 Y- Δ 、Y-Y 接桥提供零电压。为了便于理解这个新型结构的整个触发控制原理, 我们用一个简单的矢量图来表示 (见图 4)。

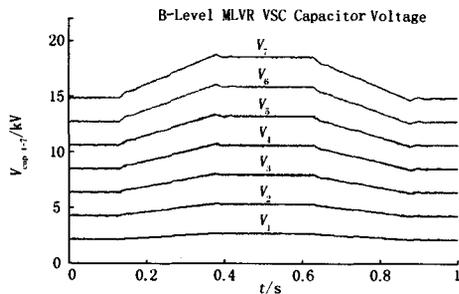


图 3 电容电压平衡

Fig.3 Capacitor voltage balance

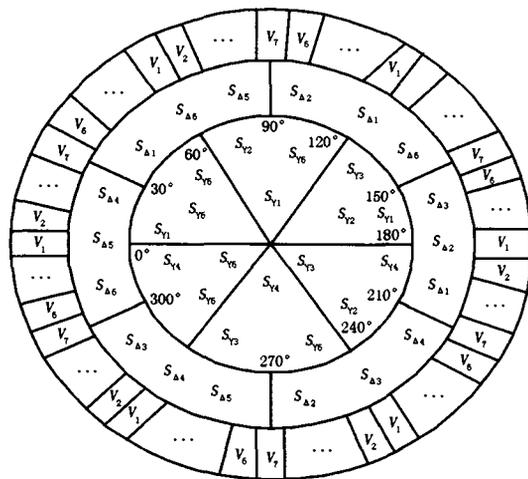


图 4 多级电压注入电压源型变流器的触发时序

Fig.4 Firing sequence of the MLVR-VSC

2 电压波形的理论分析以及稳态仿真分析

2.1 理论分析

我们将在理想状态下分析电压输出波形, 所谓的理想状态是: 开关的导通压降为零, 关断阻抗无

$$V_{YAn} = \frac{2}{\pi} \int_0^{\pi} V_{YA}(\omega t) \sin(n\omega t) d(\omega t) =$$

$$\frac{8[1-(-1)^n] K_n U_{dc}}{\sqrt{3}n\pi(m-1)} \sin \frac{n\pi}{12(m-1)} \times \cos \frac{n\pi}{6} \left[\sum_{i=1}^{m-1} i \sin\left(\frac{n\pi}{6} + \frac{i n \pi}{6(m-1)}\right) + 2 \sum_{i=1}^{m-1} i \sin\left(\frac{n\pi}{6} \cos \frac{i n \pi}{6(m-1)}\right) \right]$$

$$V_{\Delta An} = \frac{2}{\pi} \int_0^{\pi} V_{YA}(\omega t) \sin(n\omega t) d(\omega t) =$$

$$\frac{8[1-(-1)^n] K_n U_{dc}}{3n\pi(m-1)} \sin \frac{n\pi}{12(m-1)} \cos \frac{n\pi}{6} (m-1) \sin \frac{n\pi}{6} + \sum_{i=1}^{m-2} i \sin\left(\frac{n\pi}{3} + \frac{i n \pi}{6(m-1)}\right)$$

变流器输出到一次侧总的相电压为: $V_{An}(\omega t) = V_{YA}(\omega t) + V_{\Delta A}(\omega t)$

其傅立叶表达式为:

$$V_{An} = \frac{8[1-(-1)^n] K_n U_{dc}}{3n\pi(m-1)} S_A S_B \quad \text{其中: } S_A = \sin \frac{n\pi}{12(m-1)} \cos \frac{n\pi}{6}$$

$$S_B = \left(\cos \frac{n\pi}{6} + \frac{\sqrt{3}}{2} \right) \left[(m-1) \sin \frac{n\pi}{6} + \sqrt{3} \sum_{i=1}^{m-2} i \sin\left(\frac{n\pi}{6} + \frac{i n \pi}{6(m-1)}\right) \right] - \sum_{i=1}^{m-2} i \sin \frac{i n \pi}{6(m-1)}$$

输出相电压的基波峰值为:

$$V_{A1} = \frac{16 K_n U_{dc}}{\pi(m-1)} \sin \frac{\pi}{12(m-1)} \left[\frac{(m-1)}{2} + \sum_{i=1}^{m-2} i \cos\left(\frac{\pi}{6} - \frac{i \pi}{6(m-1)}\right) \right]$$

基波电压有效值为: $V_{Ams} = \sqrt{\frac{1}{\pi} V_{A1}^2 d(\alpha)} = \frac{\sqrt{4+\sqrt{3}}}{3\sqrt{3}} K_n U_{dc} \sqrt{1 + \frac{11-6\sqrt{3}}{13(m-1)^2}}$

可以得到谐波畸变率: $THD_v = \sqrt{\frac{2V_{Ams}^2 - 1}{V_{A1}^2}} = 2.45\% \quad (m=8)$

2.2 稳态仿真分析

在正常工作电压条件下, 为了测试该系统输出电压质量, 我们设置完全相同的电压源, 其容性、感性工作环境下, 我们得到了预期的结果。EMTDC 仿真波形如图 5 所示。

以容性工作方式为例, 各图表示: U_j 为注入的多级电压, I_j 为注入电流, V_A 、 I_A 为变压器一次侧输出 A 相电压、电流, V_{An} 、 I_{An} 为交流输出相电压、电流谐波谱分析以及各量的 THD。

通过仿真, 我们可以得到以下几点:

- 1) 该系统总的谐波畸变率 (THD) 非常小。
- 2) 主控桥的开关在零电压时刻动作。
- 3) 注入支路开关在一级电压下开通或关断。
- 4) 输出了理想的正弦电流波形。

3 动态性能仿真分析

穷大, 变压器的漏抗可以忽略。其中设: m 为注入电压的级数, K_n 为变压器的变比。 V_{YY} 为加到 Y-Y 桥的电压量, $V_{Y\Delta}$ 为加到 Δ -Y 接桥的电压量, V_{YA} 为 Y 接变压器一次侧电压, $V_{\Delta A}$ 为 Δ 接变压器一次侧电压。一次侧电压的傅立叶表达式分别为:

图 6 是 7 级电压注入 VSC 在闭环控制下的动态仿真波形, 在 0.6 s 内无功参考值切换三次, 通过对 PI 控制器选择适合的 P、I 参数, 该装置有很好的动态响应特性, 可以产生所需的无功需求。其中, 该装置的无功功率等级 Q_{sr} 为 100 MVA, 电压等级 V_{sr} 为

$100 \frac{\sqrt{2}}{\sqrt{3}}$ kV, 电流等级为 $\sqrt{2} Q_{sr}/3 V_{sr}$, 直流侧电压等级为 $\frac{3\sqrt{2}}{2} V_{sr}$ 。直流侧的电容参数为 1 000.0 μ F。

其中各图表示:

- 1) Q 、 Q_{ref} 分别为无功实际值和参考值;
- 2) $V_1 \sim V_6$ 、 U_{dc} 分别表示电容直流侧各个电压值以及直流侧总电压;
- 3) V_A 、 I_A 表示交流输出电压、电流。
- 4) $V_1 \sim V_6$ 、 U_{dc} 表示动态过程期间电容电压变化。

5) V_A 、 I_A 、 Q_{ref} 表示交流输出电压和电流随无功的变化曲线。

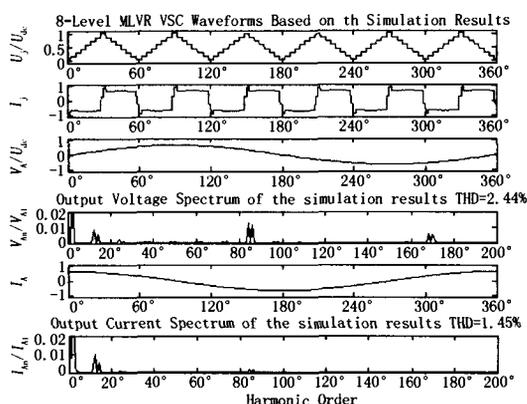


图5 多级注入电压源型变流器仿真波形

Fig5 MLVR-VSC simulated waveform

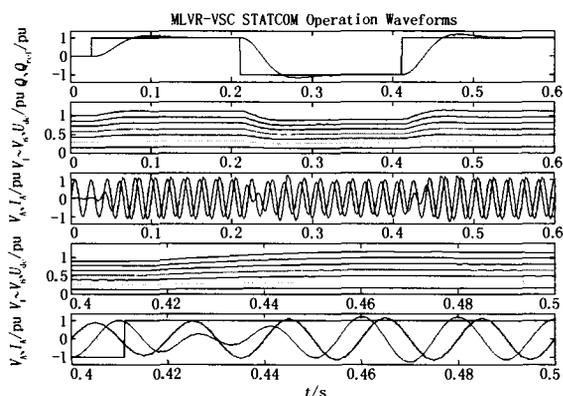


图6 无功切换的动态响应波形

Fig.6 Dynamic response under reactive order

根据实验波形可以得出:

1) 在 0.025 s 内,无功参考值从 0 变化到 1 PU, 在 0.075 s 时实际无功值达到参考值, 在 0.125 s 时刻, 动态响应过程结束, 最大超调量为 15%。

2) 在 0.21 s 时刻, 无功值由 1 变化到 -1 PU, 在 0.26 s 时刻, 实际无功值达到参考值, 在 0.33 s 时刻, 动态响应过程结束, 最大超调量为 18%。

3) 在 0.41 s 时刻, 无功值由 -1 变化到 +1 PU, 在 0.46 s 时刻无功值达到需求值, 在 0.53 s 时刻, 动态响应过程结束, 最大超调量大约为 18%。

通过观察仿真波形, 在静态和动态工作条件下, 电容电压能够基本实现平衡, 同时随着无功变化, 输出电压、电流波形较平滑, 可以得到, 这个 8 级电压的注入方案在闭环控制下, 有快速的动态响应且静态无误差, 产生了近似忽略的谐波畸变

率。

4 结论

本方案提出的新型多级电压注入式变流器, 结合了几方面的优点, 首先, 它也是通过开关的嵌位获得多级电压, 但是与同类的多电平电路相比, 它具有的器件数最少; 其次, 它可以通过注入桥为主控桥提供零电压, 同时, 注入桥在低电流、电压下工作, 这些都有效地解决了动态电压的平衡问题; 同时, 它还具有自然换相变流器的所有优点。

在仿真中, 我们使用 EMTDC 作了 8 级电压注入的研究, 证明了该系统无需加设滤波器以及采用 PWM 技术, 就能得到理想的输出波形。正是由于该装置具有非常低的谐波畸变率以及低的开关损耗^[7], 因此该装置很适合应用于大功率的应用场合。

参考文献

- [1] LIU Yong-he, Arrillaga J, Watson N R. A New High Pulse Voltage Sourced Converter for HVDC Transmission[J]. IEEE Trans on Power Delivery, 2003,18(4).
- [2] LIU Yong-he, Arrillaga J, Waton N R. Multi-Lever Voltage Sourced Conversion by Voltage Reinjection at Six Times the Fundamental Frequency[J]. IEEE Proc-Eletr Power Appl, 2002,149(3).
- [3] Mathur R M, Varma R K. 基于晶闸管的柔性交流输电控制装置[M].北京:机械工业出版社, 2005. Mathur R M, Varma R K. The Thyristor-based Controller for FACTS[M]. Beijing: China Machine Press, 2005.
- [4] Rodrigue Z, LAI Jih-sheng. Multilevel Inverters: A survey Topologied, Controls, and Applications[J]. IEEE Trans on Indusyrial Electronics, 2003,49(4).
- [5] LIU Yong-he, Arrillaga J, Watson N R. TDC Assessment of a New Type of VSC for Back to Back HVDC Interconnection[A]. In: International Conference on Power System Trasients-IPST[C]. Hong Kong:2003.
- [6] LIU Yong-he, Waton N R. A New High-Pluse Voltage-Sourced Converter For HVDC Transmission[J]. IEEE Trans on Power Delivery, 2002,18(4).
- [7] LIU Yong-he, Arrillaga J, Watson N R. A STATCOM Configuration for very Low Voltage Distortion[A]. In: AUPEC Power Engineering Conference (AUPEC)[C]. 2003.
- [8] Schauder C, Gernhardt M, Stacey E, et al. Development of 100MVAR Static Condensor for Voltage Control of Transmission System[J]. IEEE Trans on Power Delivery, 1995,12(23):1486-1493.
- [9] CHEN Yi-qiang, Mwinyiwiwa B. Regulating and Equalizing DC Capacitance in Multi-level STATCOM[J]. IEEE Trans on Power Delivery, 1997, 12(2): 901- 906.

(下转第62页 continued on page 62)

和可行性。建立在通信服务商基础上的信息传输稳定性有待提高,在此基础上不断改进,这种技术将会得到更广泛的应用。

参考文献

- [1] 韩绍甫,杜树新.电能质量监测系统设计及实现[J].电力自动化设备,2006,26(4):80-84.
HAN Shao-fu, DU Shu-xin. Design and Realization of Power Quality Monitoring System [J]. Electric Power Automation Equipment, 2006,26(4):80-84.
- [2] 肖湘宁.电能质量分析与控制[M].北京:中国电力出版社,2004.54-121.
XIAO Xiang-ning. Analysis and Control of Power Quality Monitoring[M]. Beijing: China Electric Power Press, 2004.54-121.
- [3] 段成刚,欧阳森,宋政湘,等.新型在线实时电能质量监测设备的设计[J].电网技术,2004,28(1):60-63.
DUAN Cheng-gang,OUYANG Sen,SONG Zheng-xiang,et

al.Design of a New Online and Real-time Power Quality Monitor[J].Power System Technology,2004,28(1):60-63.

- [4] Technical Documents for MSC1210Y5[Z]. Texas Instruments,2004.
- [5] The Measurement and Automation Catalog 2000[Z]. Texas (USA): National Instrument Corporation, 2000.
- [6] 邓焱,王磊.LabVIEW7.1 测试技术与仪器应用[M].北京:机械工业出版社,2004.296-317.
DENG Yan, WANG Lei.LabVIEW7.1 Test Technology and Instrument Application[M].Beijing:China Machine Press,2004.296-317.

收稿日期:2006-08-04; 修回日期:2006-11-16

作者简介:

孙鹤林(1981-),男,硕士研究生,研究方向为电力系统在线监测技术; E-mail:helin_sun@126.com

(上接第53页 continued from page 53)

参考文献

- [1] 林功平.配电网馈线自动化技术及应用[J].电力系统自动化,1998,22(4):64-68.
LIN Gong-ping.Distribution Network Feeder Automation Technology and Its Application[J].Automation of Electric Power Systems, 1998,22(4):64-68.
- [2] 陆俊,李军,吴涛.华北东北联网后华北主网安全稳定性的研究[J].华北电力技术,2000,29(1):3-4,7.
LU Jun,LI JUN,WU Tao.Study on Stability of North China Main Power Network When North and Northeast

Power Network Interconnected[J].Technology of North China, 2000,29(1):3-4,7.

收稿日期:2006-07-17; 修回日期:2006-09-22

作者简介:

曾院辉(1968-),男,硕士,从事电力系统综合自动化领域的研究与技术开发; E-mail:zengyh@sznari.com
徐成斌(1972-),男,硕士,从事电力系统综合自动化领域的研究与技术开发。

(上接第58页 continued from page 58)

- [10] Ooi B T, Joos G, HUANG Xiao-gang. Operating Principle of Shunt STATCOM Based on 3-level Diode-clamped Converter[J]. IEEE Trans on Power Delivery, 1999,14(4):1504-1510.

云平平(1980-),男,硕士研究生,研究方向为电力电子技术及其应用; E-mail:yppinverter@sina.com

刘永和(1953-),博士,男,教授,研究生导师,研究方向为大功率静止变换装置及其控制技术;

杨宝峰(1976-),男,博士研究生,研究方向为电力电子技术及其应用。

收稿日期:2005-12-31; 修回日期:2006-01-24

作者简介: