

大容量静止无功发生器与电池储能的集成

费万民¹, 张艳莉¹, 吕征宇²

(1. 南京师范大学电气与自动化学院, 江苏省南京市 210042; 2. 浙江大学电气工程学院, 浙江省杭州市 310027)

摘要: 将传统的大容量静止无功发生器(STATCOM)装置与储能装置集成, 能够显著增加和提高 STATCOM 的功能和性能。文中讨论了电池储能和 STATCOM 集成系统的特点, 介绍了所采用的功率变换器拓扑结构和开关切换策略, 对所提出的集成电池储能的 STATCOM 系统进行了仿真研究。仿真结果证明了所提出的 STATCOM 与电池储能集成系统的有效性和实用性。

关键词: 多电平功率变换器; 静止无功发生器; 电池储能; 集成

中图分类号: TM761

0 引言

目前, 我国对动态电压崩溃的研究还处于起步阶段, 电力系统中提高动态电压稳定性的手段非常缺乏。在负荷中心, 一旦系统电压降低, 现有的投切电容只能使系统的动态电压稳定性更加恶化。这种情况只能通过安装大容量无功补偿装置来改善^[1]。仿真结果表明, 一旦三峡水电站投入运行, 为提高华中电网的动态电压稳定性, 至少需安装 1 000 Mvar 以上的动态无功补偿装置^[2]。由此可见, 我国电网的现状和电力工业的迅猛发展, 使得大容量静止无功发生器(STATCOM) 越来越成为电力工业界关注的焦点和发展趋势^[3~5]。

为了得到更好的控制性能, 如补偿电路阻性压降, 阻尼振荡和提高暂态稳定性, 延长事故情况下的支持时间, 经常需要 STATCOM 在一段时间内能够向电力系统输送有功功率。但 STATCOM 本身没有能力控制有功功率流。然而, 如果能将 STATCOM 和储能装置集成在一起, 则可以同时控制有功功率流和无功功率流, 从而提供更加灵活和多样的电能调节功能^[6,7]。

最早的储能技术主要用来实现电力系统负荷的峰谷特性的调节, 提高电力系统的利用率和节约能源, 主要的储能方式为抽水蓄能发电方式和蓄电池储能方式。近年来, 人们对利用储能装置来有效提高电力系统的可靠性、稳定性和电能质量更为关注^[8,9]。这样的储能装置主要分为电池储能、飞轮储能、超导储能等。飞轮储能具有循环寿命长、占地面积小、能量转换效率高、建设周期短、无公害等优点, 得到了较为广泛的关注、研究和应用。超导储能具有储能容量大、能量转换效率高、循环寿命长等显

著优势, 受到了普遍的关注与研究, 是一种前景非常好的储能方式。由于电力、通信、电动汽车等工业领域对蓄电池的极大需求, 推动了蓄电池技术的迅猛发展, 从而使蓄电池储能技术在电力系统中的应用具有不可替代的位置。电池储能(BESS)具有以下优点: ①技术成熟, 可以规模化生产, 而且随着技术的更新换代, 性能不断提高, 成本不断降低; ②可靠性高; ③寿命长, 适用范围广, 反应时间常数小; ④模块化结构, 增减方便, 组成灵活等, 是目前最为成熟的储能技术。其不足之处在于充电时间较长, 循环寿命有限。本文试图对 STATCOM 和电池储能的集成进行初步的研究与探讨, 以期对未来的研究和应用工作打下一些基础。

1 STATCOM/BESS 集成系统的组成原理

静止无功发生器/电池储能(STATCOM/BESS)集成系统由 STATCOM 和蓄电池组成。如图 1 所示, 电池可以采用铅酸蓄电池组, 分多组与 STATCOM 的各个直流侧储能电容并联连接, 逆变器采用主从级联多电平拓扑结构^[10], 每一相都由主变换器和从变换器级联而成。主变换器是电平级差为 3E 的级联多电平变换器, 其电压等级和输出功率完全可以满足 STATCOM 装置的功率输出要求, 由 GTO, IGCT 等高耐压、大功率而开关速度较低的开关器件组成, 在一个基波周期中只切换一次, 主要用来实现基波功率输出; 从变换器是直流侧电压为 E 的传统两电平逆变全桥, 由低耐压、快速开关器件如 IGBT 等组成, 以较高的频率进行脉宽调制(PWM), 主要用来消除输出谐波, 改善输出波形质量。该拓扑结构中, 主开关管数量多, 工作电压高, 工作频率低, 开关损耗小; 从变换器中的开关管数量少, 工作电压低, 虽然开关频率高一些, 但总的

功率损耗较小,系统效率高。设主变换电路可以输出 N 个级差为 $3E$ 的电平,从变换器输出 $-E, 0, E$ 等 3 个电平,则主从式级联多电平功率变换器能够输出 $3N$ 个级差为 E 的电平,本文中的主从多电平变换器可以输出 12 个电平的相电压。所以,通过从

变换器的高频工作,可以大大提高 STATCOM 的输出波形质量。因为该种主电路结构适合于高电压环境应用,与电网采用直接连接方式,可以省去曲折联结变压器或耦合变压器,从而降低整个装置的成本,缩小装置体积,提高 STATCOM 的响应速度。

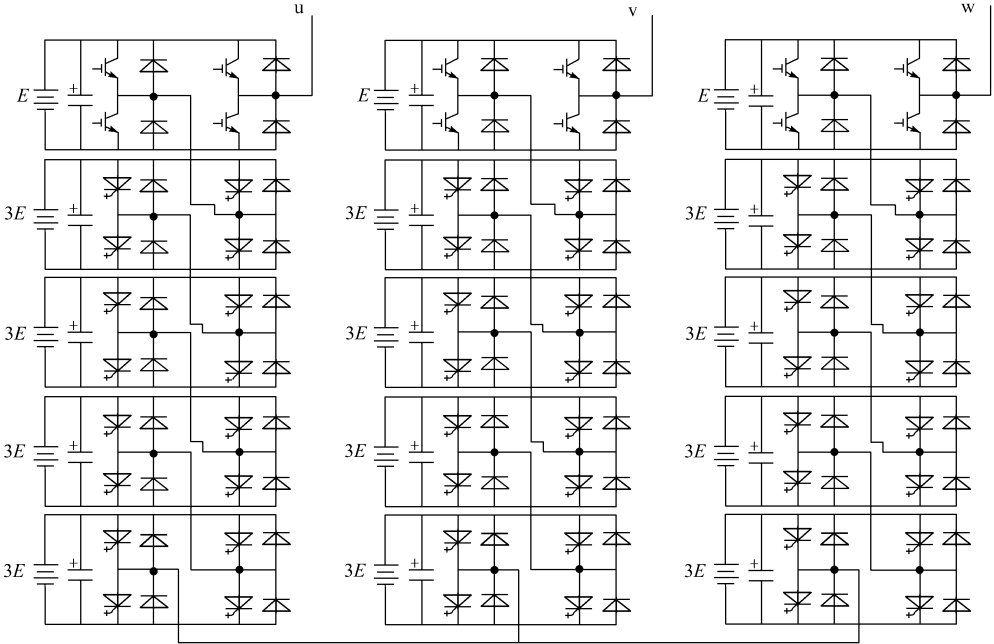


图 1 STATCOM/BESS 集成系统组成原理
Fig. 1 Diagram of the proposed STATCOM/BESS system

2 STATCOM/BESS 集成系统的控制策略

传统的 STATCOM 装置只有感性(相角滞后)和容性(相角超前)2 种稳定工作状态。大量研究表明,STATCOM 通过补偿系统的无功功率,对提高电力系统电压稳定性有显著的作用。由于不具备有功调节能力,虽然其幅值和相位均可控制,但在稳定状态下其幅值和相位不能独立调节。将储能电池集成到 STATCOM 装置而形成的 STATCOM/BESS 系统,由于具备了有功功率调节能力,可以在 4 个象限内稳定工作:感性负载下电池充电、感性负载下电池放电、容性负载下电池充电和容性负载下电池放电。由于储能电池容量有限,STATCOM/BESS 装置不可能在上述任何一个工作模式下长期工作(比如,电池不可能一直处于放电状态)。虽然如此,储能电池的存在可以补偿 STATCOM 系统本身的功率损耗、电力系统的阻性压降等,从而阻尼振荡和提高暂态稳定性,也可以延长事故情况下的支持时间。如果蓄电池组的容量足够大,也可以用来实现电力系统负荷的峰谷特性的调节。

STATCOM/BESS 集成系统的控制策略就是实现上述无功功率和有功功率调节功能的控制方

法,包括闭环控制策略和开关切换策略。闭环控制策略包括系统电流和电压量的检测、反馈、计算与调节器设计等内容,闭环控制器的输出量就是代表系统所需要补偿的无功功率、有功功率的参考电压的幅值和相位。其中心内容包括系统的数学模型分析、控制量的计算与分解、闭环调节器的设计等。文献[6,7]研究了 STATCOM/BESS 的数学模型和控制方法,本文直接采用其中的 PQ 解耦 PI 控制策略,控制方法如图 2 所示。在 dq 坐标系中,有功功率和无功功率可以表示为: $P=V_s i_d$, $Q=-V_s i_q$,只要给定有功功率 P 和无功功率 Q ,根据电压电流检测信号的有功分量和无功分量,进行如图 2 所示的 PI 控制,分别得到参考信号的幅值和相位。

为简单起见,本文采用基于多载波与参考信号比较的正弦脉宽调制 (SPWM) 方法。主变换器以参考信号的基波频率(此处为工频 50 Hz)切换,采用阶梯波来逼近正弦;用参考信号和主变换器的输出之差和两个三角载波比较,可以得到从变换器的开关切换策略。参考信号的幅值、相位来自上述闭环控制器的输出;对输出波形质量的要求,决定了三角载波的频率,也就是从变换器的开关频率^[10]。

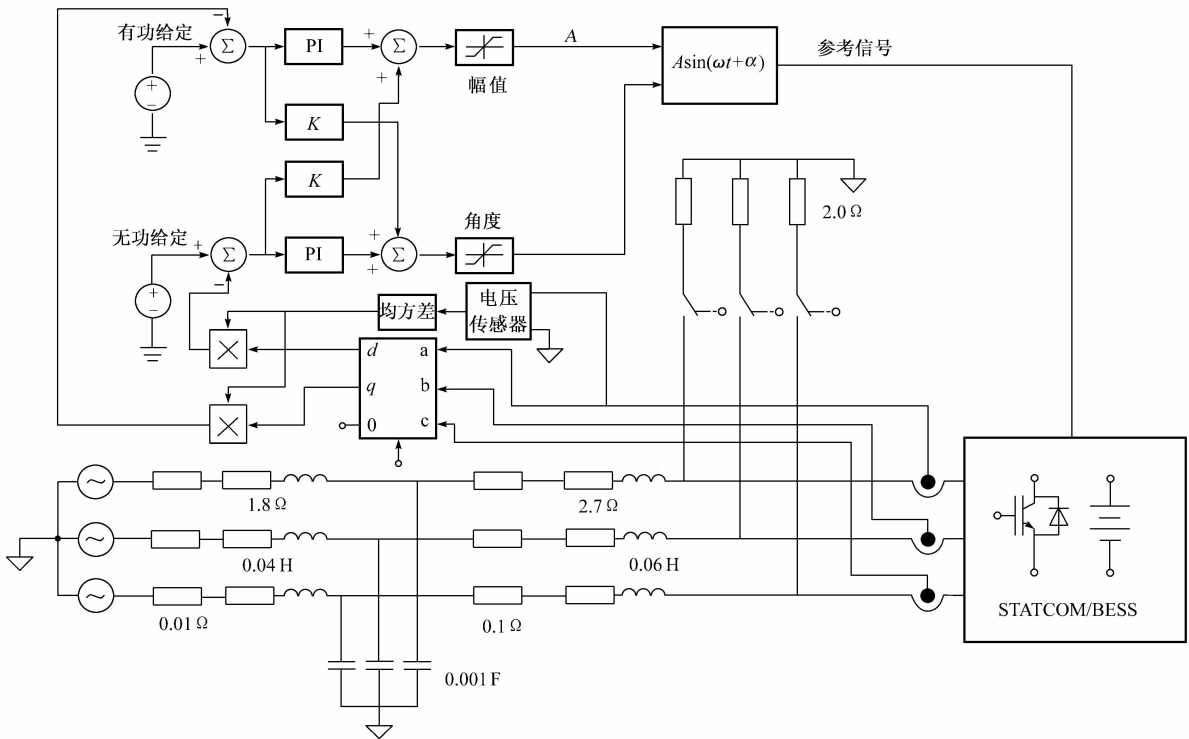


图 2 STATCOM/BESS 的仿真电路模型

Fig. 3 Simulation diagram of the proposed STATCOM/BESS system

由于主变换器采用高电压大容量的 GTO,其开关特性较差,使其工作于基频 50 Hz,可以大大减小开关损耗,提高功率变换器的转换效率和可靠性。从变换器的 3×4 个开关管,工作电压 1 000 V,相对于主变换器的 3 000 V 较低,选用频率特性较好的 IGBT,工作在 1.2 kHz。文献[11]指出,3 300 V,1 200 A 的 IGBT 管的 $di_c/dt = 2\,800\text{ A}/\mu\text{s}$, $dv_{ce}/dt = 3\,500\text{ V}/\mu\text{s}$,开通时间约 $2\text{ }\mu\text{s}$,关断为 $5\text{ }\mu\text{s}$,所以工作在 1.2 kHz 是可行而且保守的。

3 STATCOM/BESS 集成系统的仿真研究

根据上述控制策略,采用专用电力电子仿真软件,对本文提出的 STATCOM 装置进行了仿真研究,仿真方案框图如图 2 所示。图中没有标出的主要参数有:系统电压 10 kV;主逆变器中的储能电池电压 1 800 V,电池内阻 0.001 Ω ;从变换器中储能电池电压 600 V,内阻 0.000 3 Ω ;各逆变器的直流侧电容 3 300 μF ,从变换器开关频率 1 200 Hz。仿真注重研究 STATCOM 输出连接处在激发振荡情况下的母线电压有效值,为了便于观察,电压值采用标么值,仿真波形如图 3 所示。从图 3 可以看出,具有 STATCOM/BESS 系统在电压控制和阻尼振荡方面的显著作用。

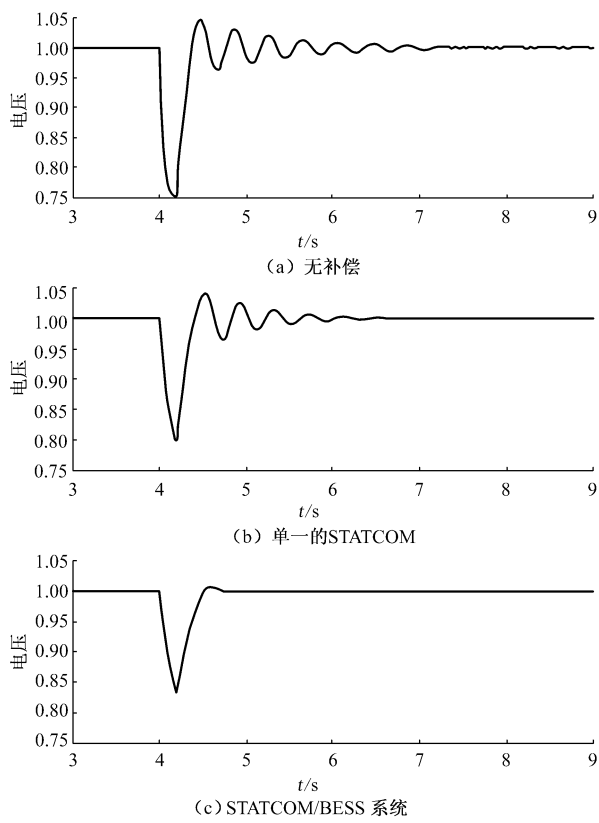


图 3 母线电压

Fig. 3 Bus voltage

4 结语

本文研究了 STATCOM 与电池储能系统的集成, STATCOM 采用主从级联多电平变流器拓扑结构和电网直联, 省去了耦合变压器, 具有开关损耗小和输出波形质量高等特点。本文论述了电池储能和 STATCOM 集成系统的特点, 介绍了所采用的功率变流器拓扑结构和开关切换策略, 对所提出集成电池储能的 STATCOM 系统进行了仿真研究。仿真结果证明了所提出的 STATCOM 与电池储能集成系统的有效性和实用性。

参考文献

- [1] 沈斐, 王娅岚, 刘文华, 等. 大容量 STATCOM 主电路结构的分析和比较. 电力系统自动化, 2003, 27(8): 59—65.
SHEN Fei, WANG Ya-lan, LIU Wen-hua et al. Analysis and Comparison of Large Capacity STATCOM Circuit Configuration. Automation of Power Electric Systems, 2003, 27(8): 59—65.
- [2] 林孔兴, 李菊根, 李向荣, 等. STATCOM 应用于 2010 年华中电网的初步研究. 电力系统自动化, 2000, 24(23): 10—13.
LIN Kong-xing, LI Ju-gen, LI Xiang-rong et al. Preliminary Study of the Application of STATCOM to Central China Power System in 2010. Automation of Electric Power Systems, 2000, 24(23): 10—13.
- [3] SCHAUDER C, GERNHARDT M, STACEY E et al. Development of a ± 100 Mvar Static Condenser for Voltage Control of Transmission Systems. IEEE Trans on Power Delivery, 1995, 10(3): 1486—1493.
- [4] 王仲鸿, 王强, 朱永强. 柔性交流输电技术. 见: 电工高新技术丛书第 5 分册. 北京: 机械工业出版社, 2000. 79—109.
WANG Zhong-hong, WANG Qiang, ZHU Yong-qiang. Flexible Alternative Current Transmission Systems. In: Series of New and High Technology in Electric Engineering, Vol 5. Beijing: China Machine Press, 2000. 79—109.
- [5] PENG F Z, MCKEEVER J W, ADAMS D J. A Power Line Conditioner Using Cascade Multilevel Inverters for Distribution Systems. IEEE Trans on Industry Applications, 1998, 34(6): 1293—1298.
- [6] CHANG Qian, CROW M L. A Cascaded Converter-based STATCOM with Energy Storage. In: Proceedings of Power Engineering Society Winter Meeting. New York(USA): 2002. 544—549.
- [7] YANG Z, SHEN C, CHENG L et al. Integration of a STATCOM and Battery Energy Storage. IEEE Trans on Power Systems, 2001, 16(2): 254—260.
- [8] 林姿峰, 闵勇. 基于超导储能的扰动动态安全在线评估. 电力系统自动化, 2004, 28(18): 20—24.
LIN Zi-feng, MIN Yong. Dynamic Small Signal Security Assessment of Power System Based on Superconducting Magnetic Energy Storage. Automation of Electric Power Systems, 2004, 28(18): 20—24.
- [9] 侯勇, 蒋晓华, 姜建国. 基于超导储能的综合电能质量调节装置及其控制策略. 电力系统自动化, 2003, 27(21): 49—54.
Hou Yong, JIANG Xiao-hua, JINAG Jian-guo. SMES Based Unified Power Quality Conditioner and Control Strategy. Automation of Electric Power Systems, 2003, 27(21): 49—54.
- [10] 费万民, 吕征宇, 姚文熙, 等. 主从式级联多电平变流器及其控制方法的研究. 电工技术学报, 2004, 19(8): 61—66.
FEI Wan-min, LÜ Zheng-yu, YAO Wen-xi et al. Research on Composite Cascade Multilevel Converters and Its Control Strategies. Transactions of China Electro-Technical Society, 2004, 19(8): 61—66.
- [11] BERNETS, TEICHMANN R, ZUCKERBERGER A et al. Comparison of High-power IGBT's and Hard-driven GTO's for High-power Inverters. IEEE Trans on Industry Application, 1999, 35(2): 487—495.

费万民(1965—), 男, 博士, 副教授, 研究方向为电力电子技术及其应用. E-mail: feiwanmin@126.com

张艳莉(1970—), 女, 硕士, 副教授, 研究方向为测试技术及仪器仪表。

吕征宇(1957—), 男, 博士, 教授, 博士生导师, 研究方向为电力电子技术及其应用。

Investigation on the Integration of BESS with STATCOM

FEI Wan-min¹, ZHANG Yan-li¹, LÜ Zheng-yu²

(1. Nanjing Normal University, Nanjing 210042, China)

(2. Zhejiang University, Hangzhou 310027, China)

Abstract: The integration of a traditional STATCOM device with the energy storage system will greatly increase its functionality. The characteristics of a STATCOM device with the topology of composite multilevel converter integrated with BESS are discussed. The system proposed can be directly linked to a power system without coupling transformers and has the advantages of low loss, high quality waveform and low cost. The topology, control strategies and characteristics of the proposed STATCOM /BESS systems are described. The practicability and validity of the system proposed have been proved by the simulation results.

Key words: composite multilevel converter; STATCOM; battery energy storage system (BESS); integration