

DOI: 10.7500/AEPS20131213006

电力电子装置在电力系统中的应用

姜建国, 乔树通, 鄒登科

(电力传输与功率变换控制教育部重点实验室(上海交通大学), 上海市 200240)

摘要: 电力电子装置能够促进电力系统向可持续发展和智能化转型。从发电、储能、微型电网、输电和电能质量 5 个方面,介绍了电力电子装置在电力系统中的主要应用。从提高电力电子装置可靠性、安全性、经济性和标准化的视角,综述了可靠性评估、故障运行管理、硬件在回路仿真和电力电子标准模块的研究工作。最后阐述了电力电子装置在电力系统应用中亟待解决的难题。

关键词: 电力电子装置; 电力系统; 可靠性; 故障管理; 硬件在回路仿真; 电力电子标准模块

0 引言

电力系统是能源利用、输送和配给的主要载体, 在社会经济中发挥着重要作用。化石能源和气候环境的危机使得电力系统正在从规模化发展向可持续发展和智能化转型。分布式电源和储能装置的大规模接入, 地方电网、微型电网与主干电网的配合, 高效、灵活的输电方式, 配电和用电的智能化双向互动, 供电质量和可靠性的提高, 是电力系统转型的特征^[1]。

在电力系统中, 可再生能源的并网发电、储能装置的功率转换、交直流电网的柔性互联、配用电能的双向流动、无功和谐波的动态补偿都需要依靠电力电子装置来实现。随着高电压、大功率电力电子器件的发展, 变换器模块化、单元化和智能化水平的提升, 控制策略和调制策略性能的提高, 电力电子装置在电力系统中将会发挥更大的作用^[2]。

本文介绍了电力电子装置在发电、储能、微型电网、输电和电能质量方面的应用, 分析了电力电子装置对于电力系统性能改善的作用, 对电力电子装置的可靠性评估、故障运行管理、硬件在回路仿真和电力电子标准模块技术进行了论述。

1 电力系统中电力电子装置的主要应用

1.1 发电环节

1) 发电机组励磁。大型发电机组应用静止励磁技术, 与励磁机相比, 具有调节速度快、控制简单的特点, 显著提高了发电厂的运行性能和效率。水力

发电机组应用交流励磁技术, 通过对励磁电流频率的动态调整, 实现了发电系统对水头压力和水流量动态变化的快速调节, 改善了发电品质, 提升了发电效率。

2) 风力发电^[3]。变流器是风力发电中不可或缺的核心环节。风电变流器通过整流器和逆变器将不稳定的风能变换为电压、频率和相位符合并网要求的电能。随着变流器拓扑结构由两电平、三电平向 H 桥级联型、有源中点钳位、模块化多电平换流器(MMC)等多电平拓扑方向发展, 使得风力发电系统的容量和电压等级逐步提高, 有效降低了线路损耗和传输导线成本, 促进了风电特别是海上风电的大规模开发。目前国际上新的并网运行规则要求, 在风力发电系统接入电网时, 发电系统需具备有功功率控制、无功功率调节、并网频率变化、故障穿越和低电压穿越能力。

3) 光伏电站^[4]。大型光伏电站由光伏阵列组件、汇流器、逆变器组、滤波器和升压变压器构成, 是大规模集中利用太阳能的有效方式。通过给并联逆变器施加“电网友好”的控制方案, 光伏电站可以实现无功补偿、有源滤波和动态电压补偿等功能。目前, 大型光伏发电系统正处于从示范到大范围推广应用的关键阶段, 还存在光伏阵列组合的多峰值特性和热斑效应、逆变器组合的非理想特性等技术问题, 因此, 光伏电站的科学设计需要综合考虑光伏阵列的组合方式、逆变器的组合方式及其并网拓扑等因素。

1.2 电能存储

储能技术在电力系统中应用可以缓解高峰负荷供电需求, 提高现有电力设备的利用率和电网的运行效率; 可以有效应对电网故障的发生, 提高电能质量和用电效率, 满足经济社会发展对优质、安全、可

收稿日期: 2013-12-13; 修回日期: 2013-12-28。

国家高技术研究发展计划(863计划)资助项目
(2011AA050403); 高等学校博士学科点专项科研基金新教师类资助项目(20110073120034)。

靠、高效用电的要求。在各种储能方式中, 抽水蓄能、压缩空气储能和电池储能是可以达到兆瓦级的储能技术^[5]。

1) 可调速抽水蓄能^[6]。抽水蓄能电站通常由上水库、下水库和输水及发电系统组成。在运行过程中, 上下水库落差不断变化, 因此抽水蓄能电站只有工作在变速状况下才能取得最佳发电效率。目前, 可调速抽水蓄能机组主要采用转子绕组励磁方式, 励磁调节系统通常采用基于晶闸管的周波变换器或基于全控器件的电压型或电流型变换器。抽水蓄能机组通过调节转子励磁电流的频率和幅值, 可实现有功出力与无功出力的大幅度独立调整, 且便于机组启动和运行模式的切换, 使得抽水蓄能电站在电力系统中更好地发挥调峰填谷、调频、调相、紧急事故备用、黑启动和为系统提供备用容量等多重作用。

2) 压缩空气储能。压缩空气储能的工作原理为: 当电力系统的用电处于低谷时, 利用富余电量驱动空气压缩机, 把能量以高压空气的形式存储起来; 当用电负荷处于高峰时, 将储气空间内的高压空气释放出来, 驱动发电机发电。近年来, 关于压缩空气储能系统的研究和开发一直非常活跃。在空气压缩过程中, 通过采用变频驱动技术可以大幅度调整电网负荷并提高空气压缩效率; 在发电过程中, 通过采用控制发电机的励磁可以拓宽储气系统的发电运行范围和发电效率。

3) 电池储能^[7]。电池储能系统主要包括电池系统和功率调节系统。电池一般采用锂离子电池、钠硫电池和全钒液流电池。在电池系统中, 采用小功率 DC/DC 变换器可实现电池模块的电流均衡。大功率和高增益 DC/DC 变换器可集成到电池模块内, 并作为电池模块输出接口实现串并联成组, 从而提高直流母线电压等级、简化均衡控制要求和优化功率调节系统的拓扑。在功率调节系统中, 电压型四象限变换器作为电池系统与电网的电力电子接口, 变换器可采用三相桥式模块并联型和 H 桥模块级联型拓扑, 除了进行电池充放电管理外还能实现储能系统的各项并网功能。

1.3 微型电网

微型电网是由分布式电源、储能装置、功率变换器、相关负荷以及监控保护装置汇集而成的小型配电系统。通过功率变换器的调节, 微型电网可与外部电网并网运行, 实现局部的功率平衡与能量优化; 在外部电网故障时, 通过变换器的解列, 使微型电网运行在独立模式, 可以继续向关键负荷供电, 提高用电的安全性和可靠性。实践表明, 将分布式电源以微型电网的形式接入到电网中并网运行, 与电

网互为支撑, 是发挥分布式电源效能的最有效方式^[8]。

在微型电网中, 分布式电源和储能装置的互联可采用多变换器方案实现, 也可由一个多接口变换器来实现。采用多个变换器时, 各个控制器相互独立, 必须依靠通信方式进行协调工作, 存在成本高、可靠性差、通信延迟长等问题, 降低了系统性能。多接口变换器是一种可自我持续的多输入多输出变换器, 它能与各种分布式电源、储能装置和负荷相连接。变换器可以把一个接口的直流或交流功率处理和调度到任意接口, 它能够提高可再生能源利用率, 优化能源管理, 增强与电网互联的经济性。

多接口变换器的运行分为生产模式、紧急模式和恢复模式。在生产模式时, 变换器获取可再生能源, 进行储能管理, 同时满足负载供电需求; 在紧急模式时, 变换器可作为不间断电源使用; 在恢复模式时, 分布式电源对储能装置进行充电以使其充电状态始终处于安全水平之上。多接口变换器采用集成控制系统, 与多个变换器的分散控制系统相比, 具有以下优点: 参考值和控制量在控制器内部进行传递, 不存在传输延迟和传输错误; 可以更有效地实现模式过渡^[9]。

1.4 输电环节

1) 直流输电^[10-11]。直流输电包括常规直流输电和柔性直流输电。常规直流输电采用基于晶闸管的换流器; 柔性直流输电采用基于全控器件的换流器。与常规直流输电相比, 柔性直流输电具有有功功率和无功功率独立可控、无需滤波及无功补偿装置、可向无源负荷供电、潮流翻转时电压极性不变等优势, 因而更适合于在可再生能源接入、孤岛供电、城市供电和电网互联等领域广泛应用。在柔性直流输电中, 换流器拓扑由两电平、三电平逐步发展到模块化多电平, 使得器件的开关频率和开关应力低、输出电压的谐波和畸变率小。

2) 分频输电^[12]。分频输电系统利用较低的频率(如(50/3)Hz)传输电能, 可减少交流输电线路电气距离, 提高系统传输能力, 抑制线路电压波动。在水电、风电等可再生能源发电系统中, 由于发电机转速较低, 十分适合利用低频进行发电和输电。目前, 分频输电主要通过交交变频器实现输电线路与工频电网的连接。

3) 固态变压器^[13]。固态变压器是一种将电力电子变换技术和基于电磁耦合电能变换技术相结合, 可对电压或电流的幅值、相位、频率、相数和形状等特征进行变换的新型变压器。固态变压器具有潮流控制、电能质量调节等功能, 可以给电力系统带来

更高的稳定性、更加灵活的输电方式、多种形式的交直流电源和高品质的电能,为电力系统智能化提供更有效的控制手段。

1.5 电能质量

1)无功补偿^[14]。采用动态无功补偿器对抑制系统功率振荡、保持母线电压稳定、解决负荷电压闪变和不平衡等问题有重要作用。链式静止同步补偿器(STATCOM)可以实现独立分相补偿和模块化冗余设计,与静止无功补偿器(SVC)相比,具有无功功率连续可调、总谐波畸变率小、响应速度快、效率与可靠性高、易于扩展和占地面积小等优点。

2)谐波治理^[15]。谐波治理分为从谐波源本身出发抑制谐波的主动谐波治理和增加额外谐波治理装置的被动谐波治理。主动谐波治理采用多重化技术和脉宽调制技术,降低变流装置注入电网的谐波。被动谐波治理采用混合型、级联型有源电力滤波器(APF)和统一电能质量调节器(UPQC)等在谐波源外部进行动态谐波治理,可以减少网侧电流谐波含量,提高电力设备效率和利用率。

3)电压暂降抑制^[16]。在中低压电力系统中,电压暂降可引起企业的生产中断、设备损坏和产品报废。动态电压恢复器(DVR)是一种基于电压源逆变技术的串联型电能质量控制器,可以动态补偿正序、负序和零序电压,抑制不平衡的电压暂降。目前,采用从电网提取能量、无串联变压器的多电平逆变器方案是动态电压恢复器的发展方向。

2 电力电子装置的研究视角

电力电子装置的可靠性、安全性、经济性和标准化是促进其在电力系统中大规模应用的重要因素。为了进一步提升电力电子装置的性能,现对可靠性评估、故障运行管理、硬件在回路仿真和电力电子标准模块的研究进行阐述。

2.1 可靠性评估

电力电子装置的可靠性、故障率、平均无故障运行时间、平均维护时间和使用率等指标直接决定了其在电力系统中的应用效能。因此,对可靠性进行评估是采取有效措施提升装置安全性的基础。

可靠性评估有利于电力电子装置的设计和运行管理。定量评估的结果可用于确定设计是否符合技术规范,也可以作为比较不同拓扑结构、控制策略和元件可靠性的准则。此外,精确的可靠性预测也可为系统运行、维护和管理提供重要指导^[17]。

评估可靠性可以从元件或系统层面进行建模。元件级可靠性模型主要对功率器件、电解电容等核心元件的故障率进行建模。系统级可靠性模型可分

为累加模型、组合模型和状态模型。对于复杂系统,可以将其分解为若干子系统,由子系统级可靠性模型评估系统可靠性。

当评估结果不满足可靠性要求时,就需要对其进行改进。对于关键装置,可通过在设计环节增加冗余度的方法,使装置具有容错运行的能力。

2.2 故障运行管理

尽管有各种手段可以提高系统的可靠性,但是故障是不可避免的。在一些重要应用场合,电力电子装置因故障而导致停机会造成严重危害。对于已运行和允许离线维护的装置,可通过热管理和故障管理的方法来降低故障率。功率器件发生故障的主要原因是过温或温度循环波动。主动热管理技术通过控制器件的工作方式,调节器件损耗,避免稳态和瞬态热应力引起器件失效。

故障管理包括故障诊断和预测。准确及时的故障诊断是电力电子装置进行容错运行或采取保护措施的依据。故障诊断通过将功率器件或变换器端口的电压电流特性与设定的正常性能指标进行比较来发现和识别故障。故障预测根据元件和子系统的故障机理来推测它们的剩余使用年限,为提前采取预防或补救措施提供参考。

当元件或子系统发生故障时,具有容错运行能力的电力电子装置可以通过改变调制策略或控制方法来隔离故障部分,避免整套装置失效。容错运行包括降级运行和准正常运行。降级运行是利用变换器固有的冗余能力,使装置在可容忍的故障发生后还能实现主要功能,但会降低输出电压、输出功率和电能质量等。降级运行具有简单、成本低的特点,但其应用范围受限。准正常运行是利用冗余设计中增加的功率器件或子系统,使装置在故障时依然能够实现应有的功能^[17]。

2.3 硬件在回路仿真

电力电子装置开发涉及硬件、软件和测试多个环节。装置样机的直接开发和验证具有周期长、调试困难和设计方案变更成本高的特点。采用实际装置的小功率硬件模型对系统方案进行验证时,装置中的部分参数和特性在模型中无法得到合理模拟,且系统保护方案的真实度有限。

电力电子系统的半实物仿真,即硬件在回路仿真技术,可以加快系统设计与测试有效性的验证,便于控制器的开发,能够模拟所有运行工况,易于实现故障模拟和实时获取任意信号。与电力系统的半实物仿真不同,在电力电子系统的半实物仿真中需要超低延迟计算(亚微秒级响应时间)才可以准确模拟硬件的动态特性和灵活模拟系统的极端工况。现场

可编程门阵列(FPGA)技术拥有超低延迟和大规模并行处理的优势, 可提高模拟计算的处理速度、结构充足度和建模复杂度, 现已成为电力电子系统半实物仿真中的首选方案^[18]。

FPGA 模拟器性能的优劣还取决于电力电子系统的模型。功率器件的模型既要体现器件的开关特性, 又要不依赖于变换器的拓扑结构, 还要满足开关频率的要求。目前在仿真中, 功率器件主要使用理想开关模型和开关函数模型。以功率器件模型为基础, 可以建立变换器系统的离散模型。通常变换器模型采用连续状态空间方程表示, 在时域仿真实现时需要对模型进行离散时间处理, 使用固定步长求解算法得到系统的离散化线性方程。由于变换器系统中存在非线性因素和开关特性, 离散化方程的求解方法要满足变换器的非线性和功率器件数量的要求^[19]。

2.4 电力电子标准模块

电力电子标准模块(PEBB)将逐步把功率器件、门极驱动电路、可编程处理器和其他相关元件集成到一个模块中, 该模块具有预定的功能和标准软硬件接口。PEBB 能够减小电力电子装置的成本、损耗、重量和体积, 减少现场安装和维护的工程投入。通过 PEBB 的组合可构成适用于各种场合的电力电子装置, 此时需要 PEBB 拥有即插即用、自动运行设置和保持自身安全运行极限的能力。运行中的装置, 可以通过对控制和保护方案进行升级, 来改善运行和维护性能。模块的集成化和控制的层次化是基于 PEBB 电力电子装置的设计原则。

模块的集成化需要攻克器件应力、杂散电感、开关损耗、热管理、保护、信号测量、控制接口和集成中的其他难题^[20-21]。目前, 集成方法有硅片级集成、封装级集成和三维集成。硅片级集成将元件建在硅片的中间或表面。封装级集成将元件集成在基于有机或陶瓷的基板里。这两种集成方法不适用于大电流场合的高功率密度变换器。三维集成用垂直方式集成整个变换器, 以无源层作为整个变换器的基板, 将有源层建立在无源层之上, 大多数有源器件可嵌入到有源层中, 因而提高了模块的空间利用率和变换器的功率密度^[22]。

文献[23]提出了大功率电力电子装置的分层控制结构。根据响应时间的不同, 控制器划分为系统控制、应用控制、变换器控制、开关控制和硬件控制 5 层。系统控制层确定系统的任务和职责; 应用控制层执行系统控制层所确定的任务; 变换器控制层执行锁相同步、电压电流滤波、测量和反馈控制计算等任务; 开关控制层执行调制策略和生成脉冲; 硬件

控制层管理电力电子器件的实际运行。微处理器可在各层中应用, 进行信号处理; 标准通信协议可支持信息在不同层之间进行交换。分层控制结构还支持多 PEBB 任意组合。依据标准的控制结构, 不同的生产商设计出的控制器可以互换使用。

3 电力电子装置应用中亟待解决的难题

面对电力系统重大需求和未来发展的需要, 电力电子装置应用中有以下难题亟待解决: ①多能源储能电力系统中变换器的设计、运行与控制方法研究; ②风电场多端直流输电系统中电压源型换流器的研究; ③微电网中多逆变器并联及电能质量控制方法研究; ④可再生能源发电中功率变流器的可靠性研究; ⑤大型光伏电站中并网逆变器集群的运行与控制方法研究; ⑥柔性交流输电系统中潮流控制器和固态限流器的研究; ⑦大容量电力电子装置的非线性分析与控制方法研究; ⑧高电压大容量电力电子装置的设计理论、拓扑优化与模块集成技术研究; ⑨电力电子装置数字控制器的标准化研究。上述问题的解决, 有利于提高可再生能源并网发电的规模、增强电网的优化配置能力和提升电力系统运行的安全性和可靠性。

4 结语

电力电子装置在发电、储能、微型电网、输电和电能质量中应用后, 改善了电力系统的性能, 促进了电力系统的渐变转型。可靠性评估、故障运行管理、硬件在回路仿真和电力电子标准模块分别是装置设计、运行、研发和制造方面的关键技术, 在这些方面开展系统化的深入研究, 有利于电力电子装置长寿命、低成本和高安全性的实现。针对电力系统的需求, 有针对性地攻克电力电子装置应用中的若干技术难题, 可以为电力系统的长远发展奠定技术基础。

参 考 文 献

- [1] 周孝信, 陈树勇, 鲁宗相. 电网和电网技术发展的回顾与展望——试论三代电网[J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(22): 1-11.
ZHOU Xiaoxin, CHEN Shuyong, LU Zongxiang. Review and prospect for power system development and related technologies: a concept of three-generation power systems[J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(22): 1-11.
- [2] 张文亮, 汤广福, 查鲲鹏, 等. 先进电力电子技术在智能电网中的应用[J]. 中国电机工程学报, 2010, 30(4): 1-7.
ZHANG Wenliang, TANG Guangfu, ZHA Kunpeng, et al. Application of advanced power electronics in smart grid[J]. Proceedings of the CSEE, 2010, 30(4): 1-7.
- [3] 李永东, 许烈, 马宏伟. 风力发电系统综述[J]. 电气时代, 2012, 3: 42-47.

- LI Yongdong, XU Lie, MA Hongwei. Overview of wind power generation system[J]. Electric Age, 2012, 3: 42-47.
- [4] 赵争鸣,雷一,贺凡波,等.大容量并网光伏电站技术综述[J].电力系统自动化,2011,35(12):101-107.
- ZHAO Zhengming, LEI Yi, HE Fanbo, et al. Overview of large-scale grid-connected photovoltaic power plants [J]. Automation of Electric Power Systems, 2011, 35 (12): 101-107.
- [5] 国家电网公司“电网新技术前景研究”项目咨询组.大规模储能技术在电力系统中的应用前景分析[J].电力系统自动化,2013,37(1):3-8.
- Consulting Group of State Grid Corporation of China to Prospects of New Technologies in Power Systems. An analysis of prospects for application of large-scale energy storage technology in power systems[J]. Automation of Electric Power Systems, 2013, 37(1): 3-8.
- [6] 韩民晓,ABDALLA O H. 可变速抽水蓄能发电技术应用与进展[J]. 科技导报,2013,31(16):69-75.
- HAN Minxiao, ABDALLA O H. Progress in the power generation technology with variable speed pump storage and its applications[J]. Science & Technology Review, 2013, 31(16): 69-75.
- [7] 丁明,陈忠,苏建徽,等.可再生能源发电中的电池储能系统综述[J].电力系统自动化,2013,37(1):19-25.
- DING Ming, CHEN Zhong, SU Jianhui, et al. An overview of battery energy storage system for renewable energy generation [J]. Automation of Electric Power Systems, 2013, 37 (1): 19-25.
- [8] 王成山,李鹏.分布式发电、微网与智能配电网的发展与挑战[J].电力系统自动化,2010,34(2):10-14.
- WANG Chengshan, LI Peng. Development and challenges of distributed generation, the micro-grid and smart distribution system[J]. Automation of Electric Power Systems, 2010, 34(2): 10-14.
- [9] JIANG W, FAHIMI B. Multiport power electronic interface—concept, modeling, and design [J]. IEEE Trans on Power Electronics, 2011, 26(7): 1890-1900.
- [10] 汤广福,罗湘,魏晓光.多端直流输电与直流电网技术[J].中国电机工程学报,2013,33(10):8-17.
- TANG Guangfu, LUO Xiang, WEI Xiaoguang. Multi-terminal HVDC and DC-grid Technology[J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(10): 8-17.
- [11] 汤广福,贺之渊,庞辉.柔性直流输电工程技术研究、应用及发展[J].电力系统自动化,2013,37(15):3-14.
- TANG Guangfu, HE Zhiyuan, PANG Hui. Research, application and development of VSC-HVDC engineering technology[J]. Automation of Electric Power Systems, 2013, 37(15): 3-14.
- [12] 王锡凡,王秀丽,滕予非.分频输电系统及其应用[J].中国电机工程学报,2012,32(13):1-6.
- WANG Xifan, WANG Xiuli, TENG Yufei. Fractional frequency transmission system and its applications [J]. Proceedings of the CSEE, 2012, 32(13): 1-6.
- [13] SHE X, HUANG A Q, BURGOS R. Review of solid-state transformer technologies and their application in power distribution systems [J]. IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics, 2013, 1(3): 186-198.
- [14] 刘文华,宋强,滕乐天,等.暂态电压稳定与新型动态无功补偿装置[J].电工技术学报,2007,22(7):18-23.
- LIU Wenhua, SONG Qiang, TENG Letian, et al. Transient voltage stability and static synchronous compensator [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2007, 22(7): 18-23.
- [15] 罗安,吴传平,彭双剑.谐波治理技术现状及其发展[J].大功率变流技术,2011,6:1-5.
- LUO An, WU Chuanping, PENG Shuangjian. State of harmonic compensation technology and its development [J]. High Power Converter Technology, 2011, 6: 1-5.
- [16] 王同勋,薛禹胜,CHOI S S. 动态电压恢复器研究综述[J]. 电力系统自动化,2007,31(9):101-107.
- WANG Tongxun, XUE Yusheng, CHOI S S. Review of dynamic voltage restorer[J]. Automation of Electric Power Systems, 2007, 31(9): 101-107.
- [17] SONG Y T, WANG B S. Survey on reliability of power electronic systems[J]. IEEE Trans on Power Electronics, 2013, 28(1): 591-604.
- [18] VEKIC M S, GRABIC S U, MAJSTOROVIC D P, et al. Ultralow latency HIL platform for rapid development of complex power electronics systems[J]. IEEE Trans on Power Electronics, 2012, 27(11): 4436-4444.
- [19] BLANCHETTE H F, OULD-BACHIR T, DAVID J P. A state-space modeling approach for the FPGA-based real-time simulation of high switching frequency power converters[J]. IEEE Trans on Industrial Electronics, 2012, 59 (12): 4555-4567.
- [20] ERICSEN T, HINGORANI N, KHERSONSKY Y. PEBB—power electronics building blocks from concept to reality[C]// IEEE Industry Applications Society 53rd Annual Petroleum and Chemical Industry Conference, September 11-15, 2006, Philadelphia, USA: 1-7.
- [21] HINGORANI N. PEBB concept for high power electronics [C]// 2010 IEEE International Symposium on Industrial Electronics, July 4-7, 2010, Bari, Italy: 3684-3688.
- [22] LEE F C, LI Q. High-frequency integrated point-of-load converters: overview[J]. IEEE Trans on Power Electronics, 2013, 28(9): 4127-4136.
- [23] IEEE Std 1676—2010 IEEE guide for control architecture for high power electronics (1 MW and greater) used in electric power transmission and distribution systems[S]. New York, NY, USA: The Institute of Electrical and Electronics Engineers, 2011.

姜建国(1956—),男,教授,博士生导师,主要研究方向:大功率电力电子与电力传动技术。

乔树通(1978—),男,通信作者,博士,讲师,主要研究方向:大容量电力电子变换与控制技术。E-mail: qiao_shu_tong@sjtu.edu.cn

郜登科(1984—),男,博士研究生,主要研究方向:级联多电平变换技术。

(编辑 丁琰)

(下转第 18 页 continued on page 18)

- [12] 叶卫华, 李富鹏, 王勇锋. 基于动态相量法的 PWM DC/DC 变换器的建模与分析方法[J]. 电子与封装, 2011, 11(11): 22-28.
YE Weihua, LI Fupeng, WANG Yongfeng. Dynamic phasor modeling and analysis of PWM DC/DC converter [J]. Electronics & Packaging, 2011, 11(11): 22-28.
- [13] GU Herong, AN Shaocong, ZHAO Wei, et al. Modeling and simulation of single phase inverter with dynamic phasors[C]// International Conference on Energy, Environment and Sustainable Development, October 22, 2011, Shanghai, China.
- [14] DEORE S R, DARJI P B, KULKARNI A M. Dynamic phasor modeling of modular multi-level converters[C]// 7th IEEE International Conference on Industrial and Information Systems, August 6-9, 2012, Chennai, India: 6p.
- [15] 潘武略, 徐政, 张静. 不对称运行条件下 VSC-HVDC 动态相量建模[J]. 高电压技术, 2009, 35(7): 1705-1710.
PAN Wulue, XU Zheng, ZHANG Jing. Dynamic phasors modeling of the VSC-HVDC under unbalanced conditions[J].
- [16] SUN Huiping, YANG Xue, WANG Xitian, et al. Improved dynamic phasor model of HVDC system for subsynchronous oscillation study[C]// 2011 4th International Conference on Electric Utility Deregulation and Restructuring and Power Technologies, July 6-9, 2011, Weihai, China: 485-489.

胡伟(1981—),女,博士研究生,主要研究方向:微电网建模、动态等值与仿真。E-mail: huweitest@163.com

孙建军(1975—),男,通信作者,博士,副教授,主要研究方向:微电网建模与仿真、微电网电能质量分析。E-mail: 278856036@qq.com

查晓明(1968—),男,教授,博士生导师,主要研究方向:微电网建模与仿真、微电网稳定性及动态特性分析、微电网动态等值。E-mail: xmzha@whu.edu.cn

(编辑 万志超)

Modeling and Simulation of Microgrid Including Inverter-interfaced Distributed Resources Based on Dynamic Phasors

HU Wei, SUN Jianjun, ZHA Xiaoming, GAO Minghai, LIU Fei

(School of Electrical Engineering, Wuhan University, Wuhan 430072, China)

Abstract: In order to quickly and accurately overcome the difficulty in microgrid dynamic characteristics analysis aggravated by the electromagnetic transient process of the converter, a dynamic phasor model of the microgrid with inverter-interfaced distributed sources is presented. The dynamic phasors model and electromagnetic transient (EMT) model for the microgrid including two inverter-interfaced distributed sources are simulated by the MATLAB/Simulink. Compared with the electromagnetic transient model, the simulation results show that in the range of high accuracy, the simulation results of two models are approximate to each other. The simulation results have further verified the correctness and validity of the model. Meanwhile the proposed model not only yields higher accuracy, but also reduces the calculation complexity and saves simulation time, providing a new method for complex microgrid modeling.

This work is supported by National Natural Science Foundation of China (No. 51177113, No. 51277137).

Key words: microgrid; inverter; dynamic phasor model; electromagnetic transient model

(上接第 6 页 continued from page 6)

Application of Power Electronic Equipments in Power System

JIANG Jianguo, QIAO Shutong, GAO Dengke

(Key Laboratory of Control of Power Transmission and Conversion (Shanghai Jiao Tong University),
Ministry of Education, Shanghai 200240, China)

Abstract: Power electronic equipments can promote the power system to change towards sustainable development and intellectualization. The main application of these equipments in the power system is described with respect to power generation, energy storage, microgrid, electricity transmission, and power quality. Research on reliability assessment, fault operation and management, hardware-in-the-loop simulation and the power electronics building block is reviewed from the perspective of increasing reliability, security, economy and standardization of these equipments. Finally, related urgent problems to be solved are elaborated.

This work is supported by National High Technology Research and Development Program of China (863 Program) (No. 2011AA050403) and Specialized Research Fund for the Doctoral Program of Higher Education (No. 20110073120034).

Key words: power electronic equipment; power system; reliability; fault management; hardware-in-the-loop simulation; power electronics building block