

综 述

智能微电网的控制策略研究综述

李钢¹, 赵静², 姚振纪¹

(1 大连供电公司 保护自动化所, 辽宁 大连 116033;

2 大连热电集团公司 香海热电厂, 辽宁 大连 116083)

摘要: 介绍了国内外权威机构对智能微电网概念的理解, 指出微电网是实现智能电网中有源配电网的有效形式, 是智能电网的重要组成部分。给出智能微电网的经典拓扑结构示意图, 对其系统构成及运行特性进行了分析。归纳和讨论了智能微电网的控制理论, 将控制策略划分为电网跟随控制和电网形成控制两大类, 每一类同时又包含了交互式及非交互式控制思想, 给出了清晰的定义和判断标准, 并提出智能微电网控制策略未来的发展方向。

关键词: 智能微电网; 控制策略; 电网跟随; 电网形成; 交互式; 非交互式

中图分类号: TM727 **文献标识码:** A **文章编号:** 1007-3175(2012)01-0001-04

Control Strategy Study Roundup of Intelligent Microgrid

LI Gang¹, ZHAO Jing², YAO Zhen-ji¹

(1 Dalian Power Supply Company Protection Automation Institute, Dalian 116033, China;

2 Dalian Thermal Power Group Company Xianghai Thermal Power Plant, Dalian 116083, China)

Abstract: Introduction was made to the understanding of authorized organizations both at home and abroad to intelligent microgrid. This paper pointed out that microgrid, an important part in consisting of intelligent grid, was an effective form to realize active power distribution in intelligent grid, giving the structural schematic diagram of the typical topology. Analysis was made to its system configuration and operation characteristics, the control theory of intelligent microgrid summarized and discussed to divide the control strategy into grid-following and grid-forming control two categories, each of which included interactive and non interactive control thinking with clear definition and determinant standard. This paper raised the microgrid control strategy in the future.

Key words: intelligent microgrid; control strategy; grid-following; grid-forming; interactive; non interactive

0 引言

进入21世纪以来, 在集中发电、远距离输电的大型互联网络系统蓬勃发展的同时, 将分布式发电供能系统以智能微电网的形式接入大电网并网运行, 与大电网互为支撑, 已逐渐成为电网新的发展方向^[1]。

近年来, 智能微电网作为我国建设坚强智能电网的重要组成部分和发展可再生能源的有效实现形式已引起政府、企业和高校的广泛关注^[2]。智能微电网是由微电源和负荷共同构成的系统, 可以同时为用户提供电能和热量, 其内部系统通过电力电子

装置实现能量的转换, 并提供必要的控制。智能微电网的输、配电系统中装备有大量精密电子仪器 and 数字化电器设备, 以满足用户对电能质量、可靠性和供电安全的要求^[3]。智能微电网的运行方式灵活多变, 提供优质的供电服务离不开高效而稳定的控制系统, 因此研究智能微电网的控制策略对分布式微电源接入电网及智能配电网系统特性研究的深入开展具有举足轻重的意义, 而控制问题也正是智能微电网研究中的一个难点问题。

目前国内外学者在智能配电网规划和大规模新能源发电技术方面开展了大量研究, 针对智能微电网的研究尚不深入, 而对智能微电网控制策略的研究则处于起步阶段^[4]。本文在对智能微电网基本

作者简介: 李钢(1985-), 男, 助理工程师, 硕士, 主要从事电力系统继电保护工作;

赵静(1986-), 女, 助理工程师, 硕士, 主要从事电厂集控运行工作;

姚振纪(1974-), 男, 助理工程师, 学士, 主要从事电力系统继电保护工作。

结构和特点研究的基础上,着重对智能微电网的控制理论进行了系统的归纳和分析,将微电网控制策略分为交互式电网跟随控制、非交互式电网跟随控制、交互式电网形成控制和非交互式电网形成控制四类,并分别尝试给出了清晰的定义和判断标准,最后提出智能微电网控制策略未来的研究方向。

1 智能微电网的基本结构

1.1 智能微电网的概念

为减少高渗透率下分布式电源对主网的不利影响,使其发挥固有优势的同时成为主网的有益补充,学者们从系统的角度出发提出了合理有效的解决方案,将分布式发电装置、储能装置和负载按照一定的拓扑结构组成子系统即“智能微电网”。

多国政府和相关机构陆续对微电网的概念给出了定义:美国电气可靠性技术解决方案联合会认为智能微电网是一种由负载和微电源共同组成的系统,它能够同时提供电能、热能和冷能,其内部的微电源由电力电子装置控制,精确实现能量转换,智能微电网相对上级电网表现为单一的

可控单元,并同时满足用户对电能质量、供电可靠性及安全性的要求^[5];由雅典国立技术大学(NTUA)领衔的欧盟FP6微电网研究项目团队认为它是一种充分利用一次能源,应用电力电子技术控制模块化的微电源互联,实现微电源全控或部分可控,并配有储能装置,对用户实行冷、热、电三联供的小型发电系统^[6]。

微电网的接入标准仅针对微电网与外部电网的公共耦合点(PCC, Point of Common Coupling),灵活性、可靠性更高。在智能电网大力发展的新形势下,毫无疑问,微电网是智能电网中有源配电网实现的有效形式,成为坚强智能电网的重要组成部分^[7]。

1.2 智能微电网的基本结构

图1为智能微电网的经典结构示意图。图中包括各种类型的负载,几种主要的分布式电源,储能设备,能量管理系统,隔离开关,公共耦合点(PCC)接口,微电源保护装置,A、B、C三条馈线和一条负荷母线,网络整体呈辐射状结构。IEEE p1547草案规定了智能微电网的并网标准,在PCC处,微电网的各项技术指标必须满足预定的规范要求^[8]。

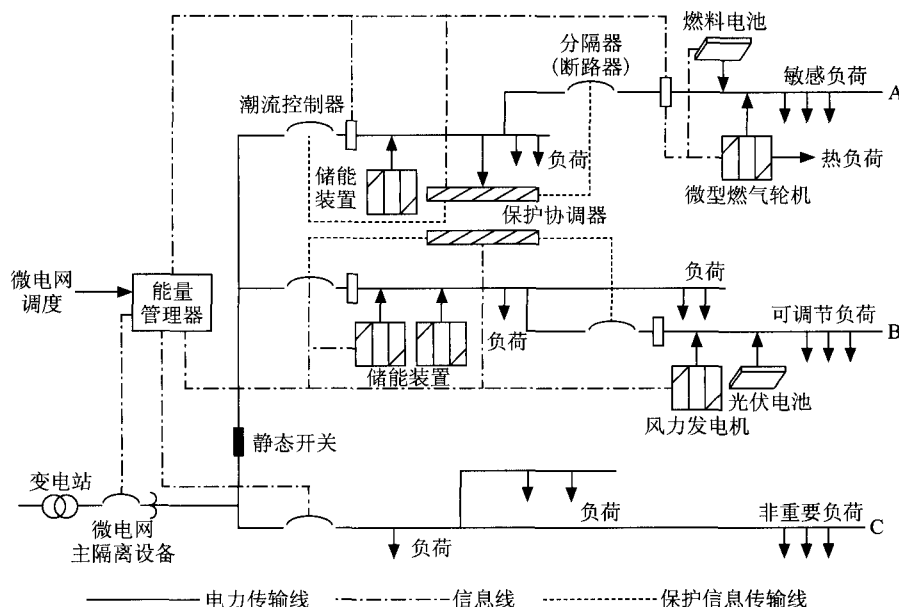


图1 经典微电网拓扑结构

微电网中包含多个分布式电源和储能装置,联合向负载供电,图中展示了微型燃气轮机、风力发电机、太阳能光伏电池、燃料电池和蓄电池等多种微电源形式,基本安装在负荷附近,通过电力电子装置与馈线相连,既减少了线路损耗,又为馈线末

端提供了电压支撑。

图中馈线A上接有敏感负荷,安装了燃料电池和具有热电联供能力的微型燃气轮机;对于连接在馈线B上的可调节负荷,采用两种间歇式分布式能源即风力发电机和光伏电池,并配备大容量储能

装置混合供电；馈线C上为非重要负荷，不设置专门的微电源，由上级配电网和其他馈线的微电源供电。微电网还配备了潮流控制器和保护协调器，在能量管理系统的统一控制下，通过数据采集，可实现系统调压、控制潮流、馈线保护等多项控制措施。

当外部电网出现故障导致电能质量和供电可靠性不能满足微电网内负荷要求时，微电网可以通过主隔离开关在PCC处切断与主网之间的联系，进入孤岛运行模式，此时由馈线A和馈线B上的分布式电源及储能设备承担微电网内的全部负载。若微电网内部微电源电力供给不足，可切除馈线C上的非重要负荷，保证对重要负荷和敏感负荷的持续供电。当外部电网故障解除后，满足并网条件时，主隔离开关重新合上，微电网恢复并网运行状态，通过有效地控制可以实现微电网系统在两种运行方式间平滑的切换。此外，微电网还配置了能量管理器 and 潮流控制器，以实现单体微电源及整体微电网的控制分析。

2 智能微电网的关键控制技术

由智能微电网概念及其经典拓扑结构分析可知，智能微电网的运行离不开稳定而完善的控制系统，而分布式电源高渗透下的智能微电网无疑对其控制系统提出了更为苛刻的要求。当系统遭遇故障时，智能微电网需基于本地信息自主、迅速地做出反应，从而取代传统由电网调度中心统一调度的处理方式。国内外对于智能微电网控制系统的研究主要集中于两个方向：一是针对微电网系统与上级电网并列运行模式下，各级微电源系统的控制，此时智能微电网无需对系统的PCC进行直接的电压和频率调节；另一种则是针对微电网系统脱离上级电网进行孤岛运行模式下各级微电源系统的控制，此时控制系统需对PCC的电压和频率进行直接调节。

2.1 电网跟随控制

2.1.1 交互式电网跟随控制

交互式电网跟随控制策略是当系统公共耦合点不需要直接进行频率/电压控制时，基于指定有功/无功设定值作为功率参考值运行的功率控制策略，其中功率设定值可由指定功率调度或负载及馈线的功率补偿量来确定。典型的控制策略如有功/无功(PQ)控制策略，如图2所示。

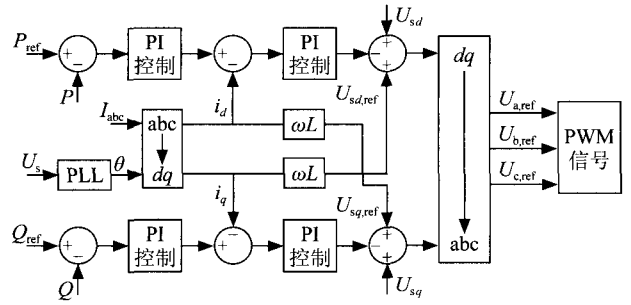


图2 PQ控制模块

有功/无功控制策略(PQ)通常用于可调度的微电源功率输出控制^[9]，使用预先设定功率参考值作为有功调度和无功补偿值。从图2中可知，PQ控制策略是将有功、无功功率解耦，经PI调节器为电流控制分量提供参考值，电流误差信号在PI调节器作用下为逆变器提供脉宽调制信号，PWM采用理想开关模型，应用三相锁相环PLL跟踪主网电压的相角，为控制系统提供频率支撑。该控制策略适用于并网运行的并能稳定输出功率的分布式发电单元。

2.1.2 非交互式电网跟随控制

非交互式电网跟随控制策略是指当公共耦合点不需要直接进行频率/电压控制时，分布式发电单元的功率输出控制独立于其它的发电单元或者负载(如不可调度微电源)的控制策略。

典型的控制策略如定直流电压(Constant DC Voltage)控制策略，如图3所示。

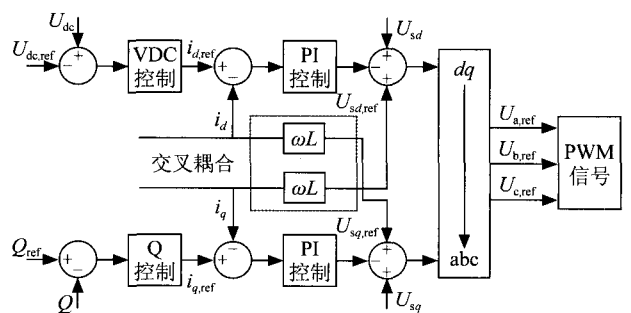


图3 定直流电压控制模块

不可调度的分布式电源如风力发电机、太阳能光伏电池等并网运行时可以根据非交互式电网跟随控制理论建立定直流侧电压的逆变器控制模块^[10]，其中直流侧电压控制器和无功控制器分别代替了图3中的比例积分控制器。由于间歇式微电源功率的馈入，直流侧母线电压升高。VDC控制器通过给定一个合适的“d轴”得到控制电流以平衡直流母线上的功率，起到稳定直流侧电压的作用。Q控制器则

指定逆变器 q 轴电流分量参考值,若为单位功率因数,无功参考值设定为0。

2.2 电网形成控制

2.2.1 交互式电网形成控制

交互式电网形成控制策略是指控制系统需要直接调节公共耦合点电压并稳定频率,对自治微电网的一个“摆动源”(Swing Source)性能进行仿真研究,控制时采用基于指定有功或无功设定值作为控制系统功率参考值,该值可由指定功率调度或负载及馈线的功率补偿量来确定。

典型的控制策略如下垂控制(Droop Control)策略,如图4所示,其中 K_P 、 K_Q 为斜率。下垂控制是选择与传统发电机相类似的频率一次下垂特性曲线作为微电源的控制方式,即分别通过频率-有功($f-P$)下垂控制和电压-无功($V-Q$)下垂控制来获取稳定的频率和电压。相当于传统同步发电机的一次调频功能^[11]。

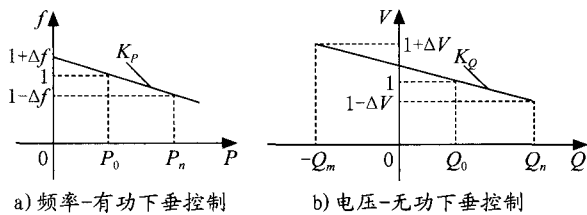


图4 下垂控制特性曲线

2.2.2 非交互式电网形成控制

非交互式电网形成控制策略是指控制系统需直接调节公共耦合点电压并稳定频率,对自治微电网的一个“摆动源”(Swing Source)性能进行仿真研究,且分布式发电单元的功率输出控制独立于其它发电单元或负荷的控制策略。

典型的控制策略如电压/频率控制(V/f Control)策略,如图5所示,其中字母A至F为特性曲线与频率、电压基准值交汇点。

采用 V/f 控制的微电源需要在微电网孤岛运行时提供强有力的电压、频率支撑,并具有一定的负荷跟踪能力。从图5可以看出,在 V/f 控制下,通过左右平行移动频率下垂曲线保证微电网频率维持恒定值,类似地,控制左右移动电压调节特性曲线维持微电网母线电压恒定,则微电网的频率和电压将逐渐恢复至孤岛运行前水平,因此当微电网再并网时对主网的冲击较小。整体 V/f 控制过程相当于传统发电机的二次调频^[12]。

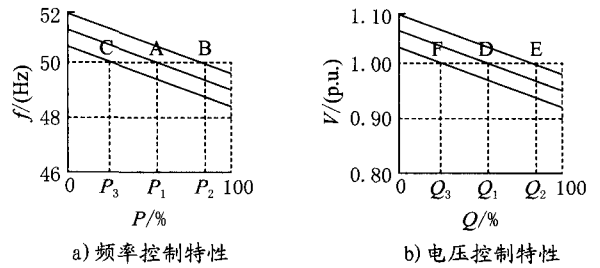


图5 电压/频率控制特性曲线

3 结语

参考文献[13]通过分析智能电网研究现状,指出智能微电网控制系统未来的发展方向为:(1)实现配电网优化运行:实时监测配电网的负荷分布,对配电网进行分析和优化计算,通过均衡负荷扩大供电能力,通过对分散无功和调压资源的协调控制提高供电电压质量。(2)实现相关系统集成:采取规范的接口方式,实现与调度自动化系统、生产管理系统、营销管理系统等的互联,提高配电自动化系统运行管理的智能化水平。(3)实现分布式电源无缝接入:安全、无缝地容许包括光伏发电、风电、小型燃气轮机及先进的电池系统等各种不同类型的发电和储能系统接入系统,并做到“即插即用”。(4)实现用户互动技术:通过与用电营销系统的结合,与用户建立起双向实时的通信,通知用户其实时电价和电网目前的状况以及其他一些服务的信息,同时也支持用户根据这些信息制定自己的电力使用方案,让用户参与电力系统的运行和管理。

参考文献

- [1] 王成山,王守相.分布式发电供电系统若干问题研究[J].电力系统自动化,2008,32(20):1-4.
- [2] Venkataramanan G, Marnay C. A Larger Role for Microgrids[J]. IEEE Power Energy Magazine, 2008, 6(3): 78-82.
- [3] Farhangi H. Intelligent Micro Grid Research at BCIT[C]// IEEE Electrical Power and Energy Conference. Vancouver, BC, Canada, 2008: 1-7.
- [4] 鲁宗相,王彩霞,闵勇,等.微电网研究综述[J].电力系统自动化,2007,31(19):100-107.
- [5] Marnay C, Bailey O C. The CERTS Microgrid and the Future of the Macrogrid[EB/OL].

(下转第18页)

大, 转速有很小下降又迅速跟踪给定转速, 转矩在0.05 s时出现负载扰动的情况下动态响应仅有1ms, 如图7所示。

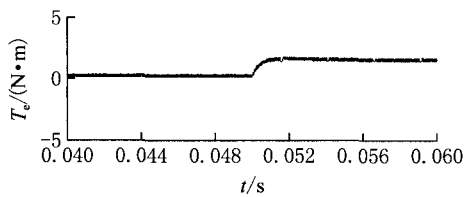


图7 转矩动态响应

6 结语

永磁无刷直流电机简化的DTC利用电机本身的特性, 省掉定子磁链闭环控制, 控制系统简单; 通过实时测量相电压、电流来求取电磁转矩, 比通过反电势来求得的电磁转矩准确度更高; 利用高动态性能的转矩bang-bang控制, 使转矩在一定的容差范围内波动。此直接转矩控制, 直接控制转矩, 使得即使负载突变时电磁转矩也能快速响应, 避免了常规的永磁无刷直流电机控制中负载突变时较大的转矩脉动。仿真结果表明简化的DTC能有效地实现转矩的快速响应, 并且能明显地减小转矩脉动。

参考文献

[1] 欧阳慧平, 章小印, 顾涛. 基于 DSP 的永磁同步电

机直接转矩控制系统研究 [J]. 华北科技学院学报, 2005, 2(3): 95-97.

[2] 魏欣, 陈大跃, 赵春宇. 异步电机直接转矩控制算法的DSP实现[J]. 工业控制计算机, 2005, 18(4): 64-65.
 [3] 夏长亮, 文德, 王娟. 基于自适应人工神经网络的无刷直流电机换相转矩波动抑制新方法[J]. 中国电机工程学报, 2002, 22(1): 54-58.
 [4] 罗宏浩, 吴峻, 赵宏涛, 等. 永磁无刷直流电机换相控制研究 [J]. 中国电机工程学报, 2008, 28(24): 108-112.
 [5] Sung P J, Han W P, Man L H, Harashima F. A New Approach for Minimum-Torque-Ripple Maximum-Efficiency Control of BLDC Motor[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2000, 47(1): 109-114.
 [6] Yoon-Ho Kim, Yoon-Sang Kook, Yo Ko. A New Technique of Reducing Torque Ripples for BDCM Drives[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 1997, 44(5): 735-739.
 [7] 夏长亮. 无刷直流电机控制系统[M]. 北京: 科学出版社, 2009.
 [8] Se-Kyo Chung, Hyun-Soo Kim, Chang-Gyun Kim, Myung-Joong Youn. A New Instantaneous Torque Control of PM Synchronous Motor for High Performance Direct Drive Applications[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 1998, 13(3): 388-400.

收稿日期: 2011-07-21

(上接第4页)

(2004-08-01)[2011-10-26]. <http://certs.lbl.gov/pdf/55281.pdf>.
 [6] Dimeas A, Tsikalakis A, Hatziargyriou N, et al. More Microgrids-Advanced Architectures and Control Concepts for More Microgrids[EB/OL]. (2006-07-24)[2011-10-26]. <http://Micro-Grids.power.ece.ntua.gr>.
 [7] 李红蕾, 戚伟, 陈昌伟. 智能电网模式下的配网调控一体化研究[J]. 陕西电力, 2010(5): 90-93.
 [8] Lasseter R H. Microgrids[C]// IEEE Power Engineering Society Winter Meeting. New York, USA, 2002: 305-308.
 [9] Stevens J. Development of Sources and a Testbed for CERTS Microgrid Testing[C]// IEEE Power Engineering Society General Meeting.

Denver, CO, USA, 2004: 2032-2033.

[10] Lasseter R H, Piagi P. Microgrid: A Conceptual Solution[C]// Proceedings of IEEE 35th Annual Power Electronics Specialists Conference. Aachen, Germany, 2004: 4285-4290.
 [11] Lopes J A P, Moreira C L, Madureira A G. Defining Control Strategies for Microgrids Islanded Operation[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2006, 21(2): 916-924.
 [12] Kroposki B, Lasseter R, Ise T, et al. Making Microgrids Work[J]. IEEE Power Energy Magazine, 2008, 6(3): 41-53.
 [13] 张文亮, 刘壮志, 王明俊, 等. 智能电网的研究进展及发展趋势[J]. 电网技术, 2009, 33(13): 1-11.
 收稿日期: 2011-10-27