

直流微电网及其多变流装置协调控制技术研究

汪志成, 葛亚明

(江苏省电力公司调度控制中心, 江苏 南京 210024)

摘 要: 分布式发电技术和微电网技术是智能配电网技术的 2 个重要组成部分。微电网技术从局部解决了分布式电源大规模并网时的运行问题, 同时在能源效率优化等方面与智能配电网的目标相一致。简要介绍了微电网及其在配电网中的应用, 分析了直流微电网技术的优势, 并给出了直流微电网的基本结构, 分析了直流微电网中多变流装置的协调控制技术, 为直流输电技术在微电网中的发展提供研究思路。

关键词: 分布式发电; 直流微电网; 协调控制; 智能配电网

中图分类号: TM727

文献标志码: B

文章编号: 1009-0665(2015)03-0054-04

现有研究和实践表明, 将分布式电源以微电网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, 具有巨大的社会与经济意义, 体现在: (1) 可大大提高分布式电源的利用率; (2) 有助于电网灾变时向重要负荷持续供电; (3) 避免间歇式电源对周围用户电能质量的直接影响; (4) 有助于可再生能源优化利用和电网的节能降耗等^[1]。当前, 微电网实验室和示范工程的建设格外令人关注, 欧盟以及美国、加拿大、日本等国家都建成了具有各自特点的微电网项目, 并开展了相关领域的研究工作。欧洲已初步形成了微电网的运行、控制、保护、安全及通信等理论, 并在实验室微电网平台上对这些理论进行了验证^[2]。其后续任务将集中于研究更加先进的控制策略、制定相应的标准、建立示范工程等, 为分布式电源与可再生能源的大规模接入以及传统电网向智能电网的初步过渡做准备。故而现今许多对于分布式电源接入电网的研究都集中于微电网的研究。

与交流微电网相比, 直流微电网拥有其独特的优点。首先, 直流微电源(如光伏发电和燃料电池)可以直接将发出的直流电能注入电网中, 不需要考虑频率和电压相位的问题, 而不同步的交流微电源则通过交流/直流(AC/DC)变流器连接在直流微电网中; 其次, 直流微电网减少了由无功功率引起的线路损耗且克服了自然功率的限制; 再者, 电网可以直接将功率输送给变流装置, 而省去了传统电网中由交流转换成直流时引起的损耗^[3]。

1 微电网的定义以及在配电网中的应用

1.1 微电网的定义和基本结构

微电网是指由分布式电源、储能装置、能量转换装置、相关负荷和监控、保护装置汇集而成的小型发配电系统, 是一个能够实现自我控制、保护和管理的自治系

统, 既可以与外部电网并网运行, 也可以孤立运行。从微观看, 微电网可以看作是小型的电力系统, 具备完整的发输配电功能, 可以实现局部的功率平衡与能量优化, 与带有负荷的分布式发电系统的本质区别在于同时具有并网和独立运行能力^[1-3]。从宏观看, 微电网又可以认为是配电网中的一个“虚拟”的电源或负荷。

当前, 影响分布式发电技术发展的关键问题并不是分布式发电本身的技术问题, 而是其并网后带来的电网运行问题。本质上, 公用微电网已经具备了智能配电网的雏形, 它能很好地兼容各种分布式电源, 提供安全、可靠的电力供应, 实现网络层面的能量优化, 起到承上启下的作用, 但与智能配电网的主要区别体现在多样化商业产品的提供和与用户的互动性方面^[4]。

对于微电网的通用解释是: 微电网是集成多个分布式发电系统(DG)和负荷的独立系统, 提供电能和热能, 其中大多数 DG 都是基于电力电子设备提供所要求的灵活性, 以确保作为一个单独的集成系统运行。对于大电力系统来说这种控制的灵活性允许微电网是一个单独的可控模块, 以满足本地负荷的可靠性和安全性需要^[5]。微电网的结构如图 1 所示。

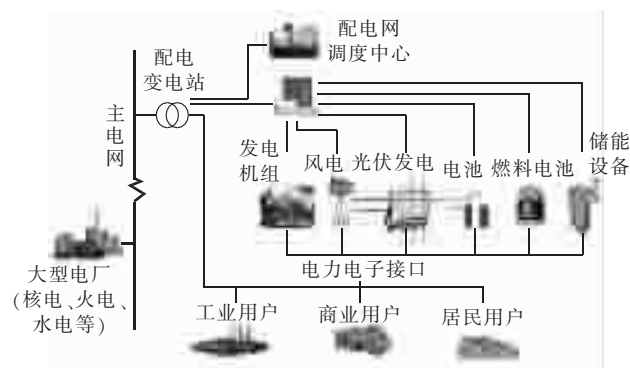


图 1 微电网结构示意图

1.2 微电网在配电网中的应用

微电网是一个独立的运行单元, 对大电网不会产生大的影响, 而且不需要修改大电网的运行策略; 利用

微电网技术可非常灵活地把 DG 接入或撤离大电网;微电网可以孤立运行,从而大大提高了电网的可靠性。

微电网可独立运行也可并网运行。在并网运行时,微电网和传统配电网类似,服从系统调度,可同时利用微电网内 DG 发电和从大电网吸取电能,并能在自身电力充足时向大电网输送多余电能。当外界大电网出现故障停电或有电力质量问题时,微电网可以通过能量管理单元控制主断路器切断与外界联系,微电网孤立运行,此时微电网内负荷全部由 DG 供电^[4,5]。当故障解除后,主断路器重新合上,微电网重新恢复和主电网同步运行,以保证系平稳恢复到并网运行状态。而这 2 种运行模式缝转换的关键是微电网与电网之间的电力电子接口,这种接口可以使分布式电源实现即插即用,可使微电网作为一个独立的模块,以尽量减少布式电源对电网的不利影响。微电网在配电网中的应用主要体现在以下几个方面:

(1) 微电网是发展可再生能源的有效形式。“十一五”规划已将积极推动和鼓励可再生能源的发展作为中国的重点发展战略之一。一方面,充分利用可再生能源发电对于中国调整能源结构、保护环境、开发西部、解决农村用能及边远地区用电、进行生态建设等均具有重要意义;另一方面,中国可再生能源的发展潜力十分巨大。中国制定的 2020 年可再生能源发展目标也将将可再生能源发电的装机容量定位为 10 万 MW。然而,可再生能源容量小、功率不稳定、独立向负荷提供可靠供电的能力不强以及对电网造成波动、影响系统安全稳定的缺点将是其发展中的极大障碍。如前所述,若能负将负荷点附近的分布式能源发电技术、储能及电力电子控制技术等很好地结合起来构成微电网,则可再生能源将充分发挥其重要潜力^[6]。例如,对于中国未通电的偏远地区,充分利用当地风能、太阳能等新能源,设计合理的微电网结构,实现微电网供电,将是发挥中国资源优势、加快电力建设的重要举措。

(2) 微电网在提高配电网的供电可靠性、改善电能质量方面具有重要作用。中国的经济已进入数字化时代,优质、可靠的电力供应是经济高速发展的重要保障。在大电网的脆弱性日益凸显的情况下,将地理位置接近的重要负荷组成微电网,设计合适的电路结构和控制,为这些负荷提供优质、可靠的电力,不仅可以省去提高整体可靠性与电能质量所带来的不必要成本,还可减少这些重要负荷的停电经济损失,吸引更多的高新技术在中国发展。

(3) 微电网与大电网间灵活的并列运行方式可使微电网起到削峰填谷的作用,从而使整个电网的发电设备得以充分利用,实现经济运行。在系统中加入基于电力电子技术的新能源并配智能灵活的控制方式,一

方面可提高系统的智能化与自动化水平,另一方面也可为电网企业带来可观的经济效益。

2 直流微电网及其协调控制技术

2.1 直流微电网基本结构

直流微电网的基本结构如图 2 所示。这种结构假设直流母线没有损耗,直流微电网通过主断路器并经 DC/AC 逆变器与交流大电网相连。微电网中的微电源大致可分为 2 类:一种是直流微电源,如光伏电池、燃料电池和蓄电池;另一种是交流微电源,如风力发电机和微型燃汽轮机。在直流微电网中,这 2 种电源分别需要通过 DC/DC 和 AC/DC 变流装置进行转换后才可以共同接入直流母线。另外,对于微电网中交流负荷,还需要将直流电经 DC/AC 逆变之后供给负荷^[4,7-9]。

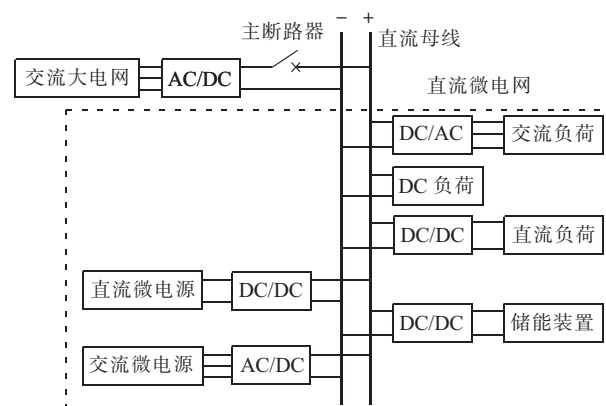


图 2 直流微电网的基本结构

直流微电网的电压稳定可定义为:当系统受到干扰时,将直流母线电压保持在一定范围内(电压波动不超过额定值的 $\pm 5\%$)的能力。直流微电网中,系统中不考虑无功功率的流动,电压成为反映系统功率平衡的唯一指标,控制直流微电网中的电压稳定,就可以控制微电网稳定运行。如果发生电压失稳,很可能引起保护动作或甩负荷,甚至还会危及大电网的正常运行^[3-7]。因此,必须对微电网中的变流装置进行有效的控制,尤其是分布式电源侧的 DC/DC 和 AC/DC 变流器,使直流母线电压保持在稳定运行的水平,从而减少微电网对大电网的扰动作用,更好地支撑交流配电网。

2.2 直流微电网中多变流装置协调控制技术

采用状态空间法可分别建立 DC/DC、AC/DC 和 DC/AC 变流器的平均模型。以单相 AC/DC 变换器平均模型为例,图 3 为单相 AC/DC 变换器原理图,图中各变量均标注在相应位置,表示对应元件名称,该变流器的状态空间平均模型如式 1 所示。

$$\begin{bmatrix} L_s \frac{di_s}{dt} \\ C_{U_d} \frac{du_d}{dt} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -R_s & S_1 - S_2 \\ S_2 - S_1 & -\frac{1}{R_{pv}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_s \\ u_d \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} -e_s \\ \frac{e_{pv}}{R_{pv}} \end{bmatrix} \quad (1)$$

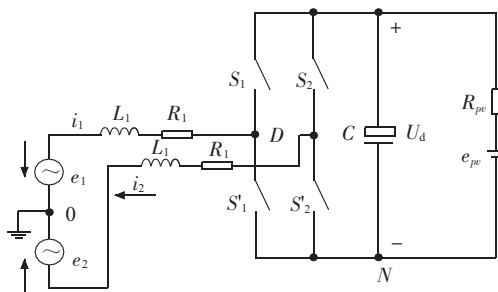


图3 单相 AC/DC 变换器原理

其中: L_s, R_s 分别为单向 AC/DC 变换器并联电感和电阻, $s=1, 2$; i_s 为流经 2 条支路的电流; e_s 为 2 条支路串联交流电源; S_1, S_2, S_1', S_2' 分别为控制开关位置, 1 为接通, 0 为断开; u_d 为并联电压值; C_{U_d} 为并联电容值; R_{pv} 和 e_{pv} 分别为变换后的直流电阻值和电源值。

这种平均模型展示了变流器的直流或者低频行为, 而不必考虑开关快速关断过程中引起的纹波及其他影响因素, 具有简单易用的特点, 便于稳定性分析及控制器的设计。

为了维持直流微电网中的直流母线电压稳定, 需要对分布式电源侧的变流器采取适当的控制策略。

(1) DC/DC 变流器的电压控制器。对于直流电源侧的增强型 DC/DC 变流器, 如图 4 所示, $U_{dc,ref}$ 为参考电压值, U_{dc} 为实际电压值, U_{in} 为输入电压值, C_{dc} 为直流母线并联电容只, 采用比例积分 (PI) 环节对变流器的输出端电压 U_{dc} 进行控制。

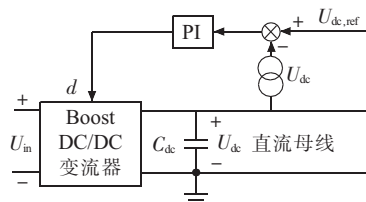


图4 DC / DC 变流器的电压控制器

(2) AC/DC 整流器的控制器。对 AC/DC 整流器的控制采用了内环电流控制与外环电压控制相结合的方法, 如图 5 所示。

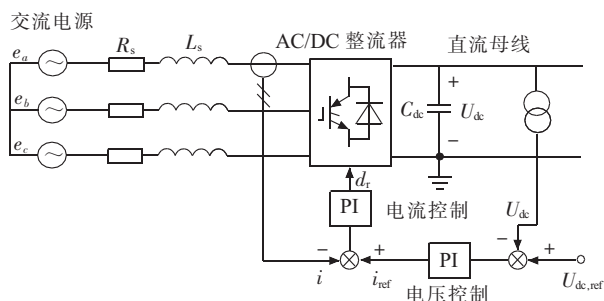
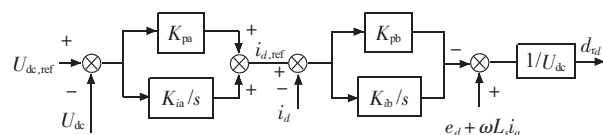


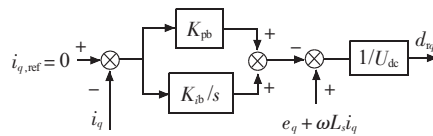
图5 AC/DC 整流器的控制策略

图中, e_a, e_b, e_c 分别为三相交流电源。外环电压采用 PI 控制环节, 参考电压值 $U_{dc,ref}$ 与实际电压值 U_{dc} 之间的差值通过电压 PI 环节后产生电流参考值 I_{ref} , 并

实际电流值 i 进行比较, 再通过电流 PI 环产生整流器平均模型的变比值 d_r , 将 abc 坐标系下的电压、电流以及变化均转换为 dq 坐标系下的量, 对整流器进行 d, q 轴解耦控制, 如图 6 所示。图中, K_{pa} 为前置控制比例系数; K_{ia} 为前置电流控制比例系数; K_{pb} 为后置控制比例系数; K_{ib} 为后置电流控制比例系数; $I_{d,ref}, I_{q,ref}$ 分别为 d, q 轴参考电流; e_d, e_q 分别为 d, q 轴电源分量; I_d, I_q 分别为 d, q 轴电流分量; ω 为角频率; d_{rd}, d_{rq} 分别为 d, q 轴变比值。



(a) d 轴控制环



(b) q 轴控制环

图6 AC/DC 整流器控制策略

包含风力发电、光伏发电和储能蓄电池、交流和直流负荷的直流微电网系统如图 7 所示, 图中, P_{pv} 为光伏发电功率; P_{wt} 为风电发电功率; P_{grid} 为交流大电网功率; P_{BT} 为蓄电池输入功率。可以采用状态空间法建立算例系统中多种变流装置的平均模型, 并对该直流微电网进行小扰动稳定性分析, 变流器的控制策略如上所述。可以发现, 对多种变流装置进行适当的协调控制, 可以有效地维持直流微电网的电压稳定。

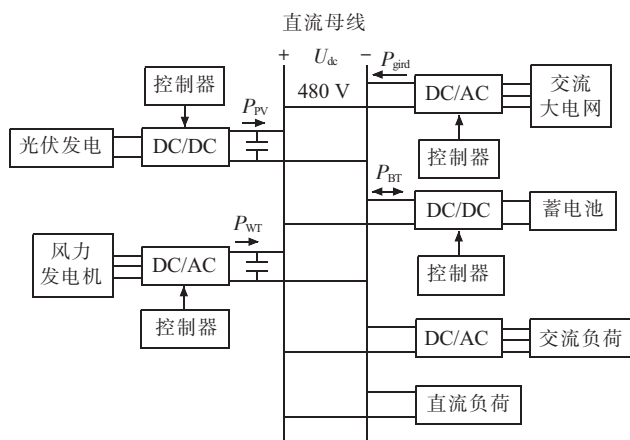


图7 直流微电网稳定分析与协调控制

3 结束语

分布式电源对于优化配电网的运行方式、改善其电能质量是一个不可多得的极佳选择, 但是同时分布式电源接入配电网也会带来诸多问题, 目前这些问题正是研究的热点, 已经解决或者正在研究解决方案的过程中。而在目前的环境下, 发展分布式电源的经济

性、能源政策导向性、联网技术性以及体制等问题都在一定程度上制约了其发展,随着分布式电源技术水平的不断提高、各种分布式电源设备性能的不断改进和效率以及并网技术的不断提高,分布式电源将存在巨大潜力,其发电成本会不断降低,应用范围不断扩大,可延伸到生活的各种场所,不仅可作为传统供电模式的一种重要补充,还将在能源综合利用上占有十分重要的地位,将成为未来能源领域的一个重要发展方向。可以预见,分布式电源作为集中供电方式技术不可缺少的重要补充手段,将在电力系统中发挥作用,大规模发展分布式发电技术以及接入配电网已成必然趋势。

参考文献:

- [1] 张国荣,徐宏. 直流微网中的关键技术综述[J]. 低压电器, 2012(15):1-5.
- [2] 吴卫民,何远彬,耿攀,等. 直流微网研究中的关键技术[J]. 电工技术学报,2012,27(1):98-106.
- [3] 肖宏飞,刘士荣,郑凌蔚,等. 微型电网技术研究初探[J]. 电力系统保护与控制,2009,37(8):114-119.
- [4] 王成山,孙充勃,彭克,等. 微电网交直流混合潮流算法研究[J]. 中国电机工程学报,2013,33(4):8-15.
- [5] 黄文焘,邵能灵,范春菊,等. 微电网结构特性分析与设计[J]. 电力系统保护与控制,2012,40(18):149-155.
- [6] 丁明,张颖媛,茆美琴. 微网研究中的关键技术[J]. 电网技术, 2009,33(11):6-11.
- [7] 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.
- [8] 郑漳华,艾芊. 微电网的研究现状及在我国的应用前景[J]. 电网技术,2008,32(16):27-31.
- [9] 黄春燕. 引入虚拟电抗的独立运行微电网改进下垂控制[J]. 江苏电机工程,2014,33(4):39-43.

作者简介:

汪志成(1979),男,安徽黄山人,高级工程师,从事电力调度运行管理工作;

葛亚明(1984),男,安徽宣城人,工程师,从事电力调度运行管理工作。

Research on DC Micro-grids and its Multiple Convert Set Coordinated Control Technologies

WANG Zhicheng, GE Yaming

(Jiangsu Electric Power Dispatching and Control Center, Nanjing 210024, China)

Abstract: Distribution generation (DG) and Micro-grids (MG) are two important aspects of intelligent distribution network (IDN). MG provides solution of integration of large-scale distribution sources into power grids. Meanwhile, MG shares the same goal of energy optimization with IDN. Also, it has the advantage of low loss. In this paper, first, MG and its application in distribution network is introduced. Then, the superiority of DC MG and its basic structure are presented. At last, coordinated control technologies of multi-converters in DC MG are analyzed. The discussion in this paper might be useful for the research on DC transmission technologies in MG.

Key words: distribution generation; DC micro-grids; coordinated control; intelligent distribution network

(上接第 53 页)

Research on the EHV Automatic Voltage Control Mode in Regional Power Grid

YANG Ke, ZHENG Ting, DU Lei, GU Dongjiang

(NARI Technology Development Co. Ltd., NanJing 211106, China)

Abstract: In order to improve regional power grid's voltage regulation ability, a method of introducing high voltage level automatic voltage control system to the grid is proposed. The EHV substation is taken as the key position substation in each regional power grid and the voltage control aim in the EHV substation is established based on load prediction. Using this method the voltage quality in this regional power grid can be fast optimized and voltage regulation times can be reduced. The results of the Zhongshan power grid show that the proposed method can rapidly improve voltage qualification rate, reduce action times of equipment effectively, and improve the economical performance of regional power grid.

Key words: regional power grid; EHV; auto-control; optimization

欢迎投稿 欢迎订阅