

Wind-Storage Optimal Coordinated Control Strategy of Microgrid at Islanded Mode

Pingyang Jiao¹, Huihui Song¹, Yanbin Qu¹, Dianhui Chu², Shiming Xu³, Huahong Zhao⁴

¹College of Information and Electrical Engineering, Harbin Institute of Technology at Weihai, Weihai

²College of Computer Science and Technology, Harbin Institute of Technology at Weihai, Weihai

³NARI Technology Co., Ltd., Nanjing

⁴To Hunt after Technology, Beijing

Email: jiaopingyang@163.com, quyanbin@hit.edu.cn

Received: Aug. 28th, 2014; revised: Sep. 26th, 2014; accepted: Oct. 9th, 2014

Copyright © 2014 by authors and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

Abstract

The microgrid significant evolution enhances the efficiency of wind power exploitation and utilization. Aiming at problem that the wind power generation is unstable, the wind-storage structure is used to improve the stability of microgrid. The structure is given in the paper. The new wind-storage microgrid coordinated control strategy is proposed based on the existed microgrid multiple power coordinated control strategy. Considering charged state of batteries and making the best use of pitch control, the new wind-storage microgrid coordinated control strategy can improve the stability of microgrid and effectiveness of distributed generation. The simulation results verify the effectiveness of the strategy.

Keywords

Microgrid, Optimal Coordinated Control, Pitch Control

微网孤岛模式下风储优化协调控制策略研究

焦平洋¹, 宋蕙慧¹, 曲延滨¹, 初佃辉², 徐石明³, 赵华鸿⁴

¹哈尔滨工业大学(威海)信息与电气工程学院, 威海

²哈尔滨工业大学(威海)计算机科学与技术学院, 威海

³国电南瑞科技股份有限公司, 南京

⁴北京金鸿泰科技有限公司, 北京

Email: jiaopingyang@163.com, quyanbin@hit.edu.cn

收稿日期: 2014年8月28日; 修回日期: 2014年9月26日; 录用日期: 2014年10月9日

摘要

微网的发展促进了风电开发利用效率的提高。针对微网中风电出力不稳、波动较大,严重影响系统电能质量等问题,采用了风力发电与储能协调运行的方式提高系统运行稳定性,并给出了微网系统结构。基于传统的微网多电源协调控制策略,提出了新型的微网孤岛运行模式风储优化协调控制策略。该策略考虑蓄电池荷电状态,充分利用了风机变桨距控制,能够提升微网运行稳定性和可再生能源电能利用率,降低系统运行成本。经过仿真,验证了新型控制策略的有效性。

关键词

微网, 优化协调控制, 变桨距

1. 引言

微网是将发电容量较小的分布式电源及储能装置组合在一起,就近向负荷供电、供热的独立可控供电系统[1]。这一概念最早是由美国的 R.H. Lasseter 教授在 2002 年提出,近年来,伴随着可再生能源的大量开发利用,微网也得到了迅速的发展。组成微网的分布式电源种类多、动态特性复杂,这些特点对微网的协调控制提出了很高的要求,同时为了提高分布式电源电能利用率和微网运行的稳定性、高效性,微网多电源协调控制成为微网控制研究中的热点之一。微网多电源协调控制策略主要有三种,分别是:基于能量管理系统的协调控制策略、基于分层控制模式的协调控制策略和基于多代理技术的协调控制策略。其中应用较多的是基于能量管理系统与分层控制模式相结合的控制策略,该控制策略目前较为成熟,基本能够保证微网的稳定运行,并能提高系统运行效率。但是为了保证微网多层控制的互联,各层控制之间必须有高可靠度的通信模块,这直接造成系统成本的提升,并且一旦出现通信错误,直接影响系统正常运行。基于多代理技术的协调控制能够将控制权下放到各个分模块,对集中控制要求较低,能够减少集中控制层计算量,降低系统通信要求,但目前多代理技术在电力领域应用较少,有效性及可靠性尚未得到实际工程验证[2]。

本文介绍了微网的系统构成。为了提高微网运行稳定性和分布式电源的电能利用率,同时降低系统成本,接下来针对微网自身特性,提出了一种风储优化协调控制策略。该控制策略以基于能量管理系统与分层控制模式相结合的控制策略为基础,兼顾了蓄电池荷电状态,并且充分利用了风力发电机机械特性,将变桨距技术应用到协调控制中。仿真算例验证了控制的有效性。

2. 系统结构

微网不是传统电力系统的微型化,它以先进的电力技术和控制技术为基础,整个系统由大量的大功率电力电子开关器件连接而成,并且系统中至少含有一种分布式电源,通过电力电子开关的动作,微网可实现并网或孤岛运行。

本文所研究的微网中可再生能源供电来自风力发电,由于风力发电自身的不稳定性,导致系统功率、频率及电压波动。针对这一问题,通过在微网中添加储能模块来稳定系统电能质量。在运行过程中风力

发电机组尽可能保证输出功率稳定, 由于蓄电池供电稳定且持续性较强, 可以维持微网系统电能质量稳定。考虑到风速剧烈波动情况下, 风力发电机组会停发或者从系统中解列, 主供电模块的缺失会危及系统供电安全, 所以需要提供柴油发电机作为应急供电模块。这样的构成模式, 既能保证风力发电的最大利用, 又能充分维持微网系统的供电稳定性。由此可以得到系统结构简图如图 1 所示[3]。

此微网系统中: 双馈感应风力发电(DFIG)模块为主供电模块, 向负载提供所需电能, 该模块由多个双馈感应风力发电机组组成。铅酸蓄电池储能(BESS)模块为主要辅助模块, 用于维持系统电压、频率稳定以及能量平衡, 由两个 BESS 子系统组成。柴油发电机(DG)模块为应急供电模块当 DFIG 模块长时间故障或电能供应不足时向负载提供稳定的电能。负载模块包括一般负载和敏感负载, 卸荷负载模块用于在风力发电供电过剩时消耗多余电能。各模块通过大功率电力电子器件与公共母线相连, 微网通过公共连接点(PCC)与大电网相连。微网系统能够方便的实现并离网切换, 同时系统内部也可即插即用, 控制方便。

3. 优化控制策略

在并网模式下, 微网电压和频率靠大电网支撑。微网系统的电压和频率较稳定, DFIG 向负载提供电能, 系统多余电能反馈给电网, 系统电能匮乏则由电网补足。BESS 可进行充电, 并且不向负载提供电能。柴油发电机和卸荷负载均不工作。此时, 微网可视为大电网的一个可控负载, 运行控制简单。

孤岛模式下, 微网失去大电网支撑, 维持系统电压和频率稳定需要依靠微网中各个模块的协调配合, 运行状态较多, 较并网时控制难度加大。所以本文主要研究微网孤岛运行模式下的风储优化协调控制策略[4]。

3.1. 理论基础

微网控制以基于能量管理系统与分层控制模式相结合的控制策略为基础, 采用双层控制结构: 顶层微网综合调度层和底层微网模块控制层, 结构如图 2 所示。

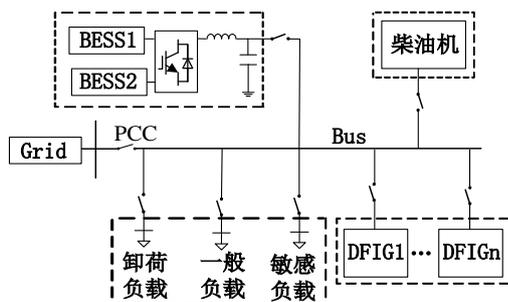


Figure 1. The structure diagram of the microgrid
图 1. 微网结构简图

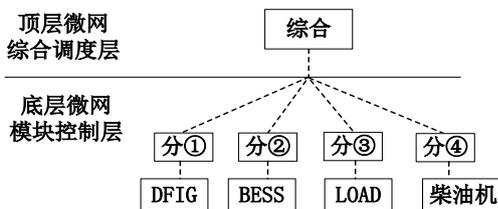


Figure 2. The hierarchical control structure of the microgrid
图 2. 微网分层控制结构

顶层微网综合调度层是微网优化协调控制策略的决策层，负责微网各模块调度策略的实施并实时监控微网运行状态，顶层控制模块参考运行状态同时根据微网优化协调控制策略做出最优化控制方案，然后将控制指令传递到底层模块，微网中各模块根据顶层指令调整各自的投切运行和功率因数，保证微网功率供需平衡。

底层微网控制层是微网各模块的具体控制层，接受顶层控制指令并收集各模块运行状态传达到顶层供分析决策使用，底层各模块之间不进行通信。

3.2. 控制目标及约束函数

协调控制是为了保证微网功率供需平衡以及电能质量稳定。由于在系统孤岛运行模式下，DFIG 和负载所需的无功功率全部由 BESS 提供，负载所需的有功功率由 DFIG、BESS 和柴油发电机协调供给，其中以 DFIG 为主。考虑到风力发电的波动性，有功功率供需平衡是协调控制的主要控制目标：

$$P_W \pm P_B + P_G = P_L + P_D \quad (1)$$

其中， P_W 为 DFIG 有功功率， P_B 为 BESS 有功功率， P_G 为柴油发电机有功功率， P_L 为负载有功功率， P_D 为卸荷负载有功功率。等式两侧的各项根据系统运行状态会有所不同。

系统运行的主要约束条件为：

$$\begin{cases} f_{\min} < f < f_{\max} \\ V_{\min} < V < V_{\max} \end{cases} \quad (2)$$

f_{\max} 、 f_{\min} 、 V_{\max} 、 V_{\min} 分别为电网规范中所要求的系统频率及电压最大值、最小值。为了减小 BESS 调频压力，也为了减小 BESS 容量、降低成本，在系统频率下降时，由 DFIG 提供一次调频[5] [6]，由 BESS 提供二次调频，这样做到了风储的充分配合。

蓄电池的充放电存在上下限，为了延长 BESS 使用寿命，运行过程中应当避免出现过充过放现象，所以系统运行的另一约束条件为：

$$SOC_{\min} < SOC_t < SOC_{\max} \quad [7] \quad (3)$$

其中 SOC_t 为 BESS 当前荷电状态， SOC_{\min} 和 SOC_{\max} 分别为 BESS 荷电状态所允许的最小值和最大值。在运行过程中应随时进行检测，确保 BESS 荷电状态正常。

由于蓄电池容量有限，为了保持系统电能质量稳定及敏感负荷的供电，应设定一放电荷电限值 SOC_{low} ，当蓄电池荷电值小于荷电限值后，切除一般负荷仅保证敏感负荷供电。

为了充分发挥风力发电机在系统中的作用，将风机变桨距控制加入到协调控制中。风速一定时，DFIG 默认运行于最大输出功率状态，运行过程中若电能供大于求且 BESS 无需充电，可通过变桨距使 DFIG 输出功率减小，最小值为 $P_{W\min}$ [8]。

3.3. 控制策略

整个风储优化协调控制策略的流程框图如图 3 所示。

启动过程中，负荷电能主要由 BESS 供给，同时 BESS 给 DFIG 提供启动所需的无功功率，DFIG 稳定运行后，检测 DFIG 功率与负载功率关系，判断是否需要 BESS 继续额外提供电能。

若 DFIG 输出有功功率 P_W 小于负载所需有功功率 P_L ，则需要提供额外电能。 $SOC_t > SOC_{\min}$ 则 BESS 可以放电。接下来判断， $P_B + P_W < P_L$ 则负荷过大，需切除一般负荷保证敏感负荷供电稳定。若切除一般负荷后，依旧不能满足电能需求，则需启动柴油发电机，向负荷供电。若切除一般负荷后，满足电能需求，则可尝试少量恢复一般负荷供电，达到供需平衡。 $P_B + P_W \geq P_L$ 则电能需求不高，可以适当切除 BESS，

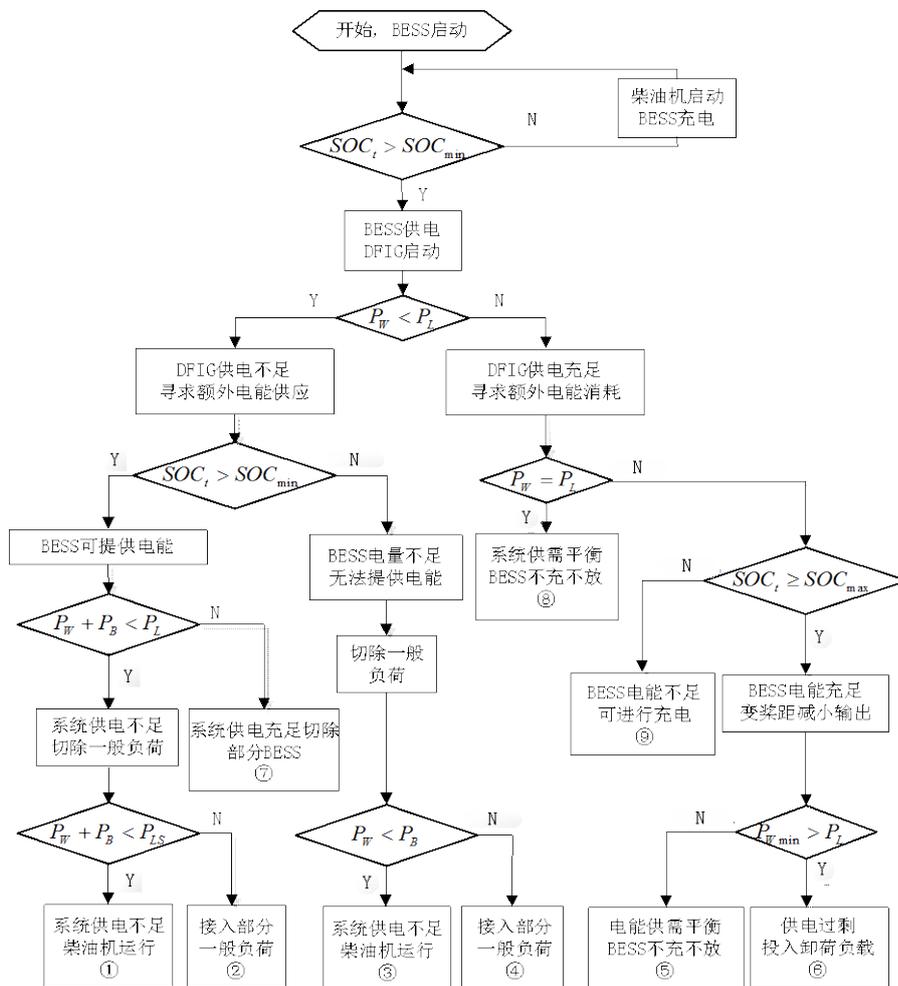


Figure 3. The flow chart of the microgrid optimization coordinated control strategy
图 3. 微网优化协调控制策略流程图

以达到供需平衡。 $SOC_t \leq SOC_{min}$ 则 BESS 不能放电, 切除一般负荷后, 判断 DFIG 提供电能与敏感负荷关系, 以便进一步启动柴油发电机供电或接入少量一般负荷保证供需平衡。

若 DFIG 输出有功功率 P_w 不小于负载所需有功功率 P_L , 则无需提供额外电能, 若 DFIG 与负荷电能供需平衡, 则 BESS 不充不放。若 DFIG 提供电能过多, 可对 BESS 进行充电。首先判断 $SOC_t < SOC_{max}$ 则可对 BESS 充电, $SOC_t \geq SOC_{max}$ 则 BESS 已满, 此时对 DFIG 进行变桨距调节, 减小输出电能, 过程中若达到供需平衡, 则维持此时状态, BESS 不充不放。若 $P_w = P_{wmin}$ 时, DFIG 电能依旧过剩, 此时需要接入卸荷负载, 消耗多余电量。

在各运行状态下, 有功功率供需平衡关系如下列式子所述(对应图 3 中的数字):

$$\begin{aligned} \textcircled{1} P_w + P_B + P_G = P_L \quad \textcircled{2} P_w + P_B = P_L \quad \textcircled{3} P_w + P_G = P_L \quad \textcircled{4} P_w + P_G = P_L \quad \textcircled{5} P_w = P_L \\ \textcircled{6} P_w = P_L + P_D \quad \textcircled{7} P_w + P_B = P_L \quad \textcircled{8} P_w = P_L \quad \textcircled{9} P_w - P_B = P_L \end{aligned}$$

4. 算例与仿真

为了验证所提出的协调控制策略的控制效果, 仿照图 1 给出的微网结构在 MATLAB/Simulink 中搭建仿真模型, 将所提出的优化控制策略加到控制器中, 观察运行控制效果。

仿真模型具体参数为：DFIG 机组最大输出功率为 6×10^4 W；BESS 最大输出功率为 4×10^4 W；负荷以阻性负荷为主，功率为 5×10^4 W，其中敏感负荷与一般负荷比例为 1:2；柴油机功率为 4×10^4 W；卸荷负载功率为 2×10^4 W [9]。

在仿真过程中，当微网中负荷发生变化时，根据顶层调度层指令，各分布式电源输出有功功率发生变化，此时微网频率会出现局部偏差，此偏差将由底层下垂控制策略进行微调，以满足系统运行的约束条件 $f_{\min} < f < f_{\max}$ 。当频率波动剧烈时，需要由大容量储能系统进行迅速调整，保证系统频率稳定。仿真主要观测有功功率波形，以验证风储优化协调控制策略的有效性。

仿真一微网最初处于并网运行状态，PCC 在 10 s 时断开，微网进入孤岛运行状态，此时负荷完全投入运行。在整个仿真过程当中，为了验证 DFIG 控制效果，采用一定范围内随机波动的风速。微网开始运行时风速逐渐变大，5 s 时达到稳定，10 s 时微网孤岛运行，此后风速在小范围内波动，50 s 时风速又开始逐渐减小，直至 60 s 时减小到稳定值。仿真曲线如图 4~6 所示。

在并网运行期间 BESS 模块进行充电，10 s 时微网转为孤岛运行，电网不再向微网提供电能，由于

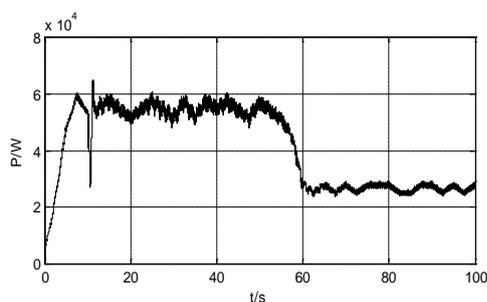


Figure 4. The active power of the DFIG module
图 4. DFIG 模块有功功率

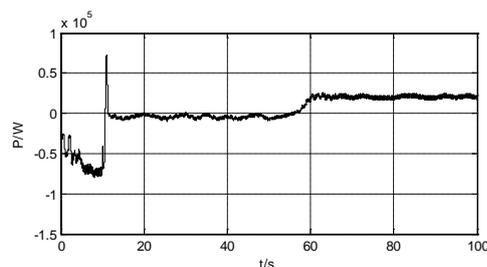


Figure 5. The active power of the BESS module
图 5. BESS 模块有功功率

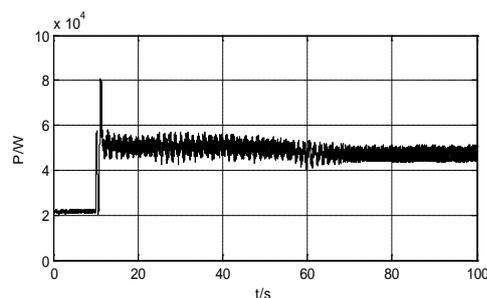


Figure 6. The active power of the load
图 6. 负载有功功率

DFIG 输出有功功率大于负荷有功功率需求量, BESS 进行小幅充电。50 s 时风速减小, DFIG 输出有功功率下降, 已经无法独立支撑负荷用电, BESS 变充电为放电, 放电功率在 3 kW 左右, 系统有功功率实现平衡。

仿真二系统参数、初始运行条件与仿真一相同, 80 s 时, 假定 BESS 荷电状态 $SOC_t < SOC_{\min}$, 则需切除部分一般负荷, 保证敏感负荷供电。仿真曲线如图 7~9 所示。

由仿真波形知, 微网 DFIG、BESS、负荷可以实现协调配合, 系统电能供需平衡, 控制效果良好。

5. 结论

微网的协调优化控制需要兼顾系统性能、运行成本、利用效益等众多方面, 是一个复杂的应用问题。本文中提出的风储优化协调控制策略, 兼顾系统运行稳定性运行要求和高风电渗透率条件, 通过对 DFIG 的最大化利用和柴油机的引入, 减少了 BESS 容量, 大大降低了系统成本。在运行调度过程中, 首先对

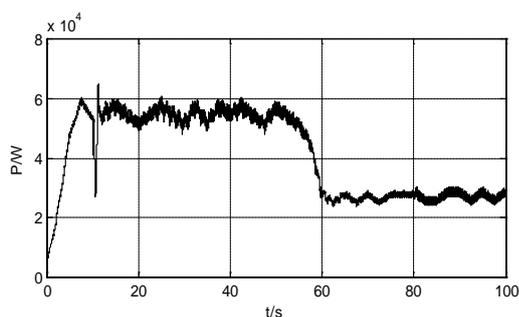


Figure 7. The active power of the DFIG module

图 7. DFIG 模块有功功率

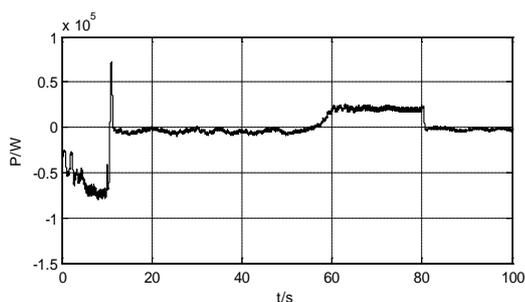


Figure 8. The active power of the BESS module

图 8. BESS 模块有功功率

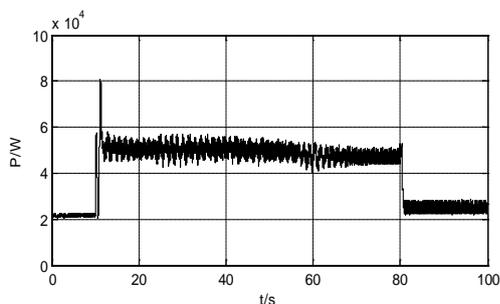


Figure 9. The active power of the load

图 9. 负载有功功率

BESS 荷电状态进行检测, 保持 BESS 的正常运行, 避免因过充过放对 BESS 造成损伤、降低使用年限。通过有功功率供需判断, 有顺序的引入 BESS、切除负荷、引入柴油机, 优化了系统运行状态, 提高了运行效率。将 DFIG 变桨距控制引入, 充分利用风机的机械特性, 是协调控制中的一个创新。

基金项目

国家发展改革委 2012 年物联网技术研发及产业化专项, “基于物联网的智能用电综合管理与能效提升技术研发及产业化”; 国家科技支撑计划项目(2012BAA13B01); 山东省高等学校科技计划(2014J14LN92); 哈尔滨工业大学科研创新基金(HIT.NSRIF.2014138)。

参考文献 (References)

- [1] Lasseter, R.H. (2002) MicroGrids. *IEEE Power Engineering Society Winter Meeting*, 305-308.
- [2] 张家军 (2013) 风光储微电网多电源协调控制策略研究. 华北电力大学, 保定.
- [3] Kroposki, B., Lasseter, R., Ise, T. and Morozumi, S. (2008) Making MicroGrids work. *IEEE Power & Energy Magazine*, **6**, 40-53.
- [4] 李福东, 吴敏 (2010) 微网孤岛模式下负荷分配的改进控制策略. *中国电机工程学报*, **30**, 1-9.
- [5] Morren, J., de Haan, S.W.H., Kling, W.L. and Ferreira, J.A. (2006) Wind turbines emulating inertia and supporting primary frequency control. *IEEE Transactions on Power Systems*, **21**, 433-434.
- [6] Margaritis, I.D., Papathanassiou, S.A., Hatzigiorgiou, N.D., Hansen, A.D. and Sorensen, P. (2012) Frequency control in autonomous power systems with high wind power penetration. *IEEE Transactions on Sustainable Energy*, **3**, 189-199.
- [7] 刘梦璇 (2012) 微网能量管理与优化设计研究. 天津大学, 天津.
- [8] Molderink, A., Bakker, V., Bosman, M.G.C., Hurink, J.L. and Smit, G.J.M. (2010) Management and control of domestic smart grid technology. *IEEE Transactions on Smart Grid*, **1**, 109-119.
- [9] Mohammadi, S., Soleymani, S. and Mozafari, B. (2014) Scenario-based stochastic operation management of MicroGrid including wind, photovoltaic, micro-turbine, fuel cell and energy storage devices. *Electrical Power and Energy Systems*, **54**, 525-535.