

基于功率平衡的微电网稳定性控制策略

樊一江¹, 尚飞艳², 张龙³, 刘海珍⁴

(1. 中石化宁波工程有限公司, 浙江 宁波 315103; 2. 解放军 61243 部队, 兰州 730000;

3. 兰州理工大学 电信学院; 4. 甘肃省工业过程先进控制重点实验室, 兰州 730050)

摘要: 针对含有储能元件的分布式发电系统存在直流母线电压难以准确控制, 直流子网切负荷瞬间交流子网电压及频率会偏离正常值的缺点, 提出了基于功率平衡带负载前馈的蓄电池控制策略和改进的 V/f 逆变控制方法对其进行改进。仿真结果表明: 交直流混合微电网在孤岛模式下和受扰动时, 该方法均能使直流母线电压实现稳定且电压和频率都能够满足正常运行的要求, 同时提高了整个系统的抗扰动能力。

关键词: 电压稳定; 改进的 V/f 逆变控制; 分布式发电; 交直流混合微电网

中图分类号: TM712 文献标识码: A 文章编号: 1000-0682(2017)02-0063-04

Micro power grid stability control strategy based on power balance

FAN Yijiang¹, SHANG Feiyan², ZHANG Long³, LIU Haizhen⁴

(1. Sinopec Ningbo Engineering Co., Ltd. Zhejiang Ningbo 315103 China; 2. 61243 PLA Troops, Lanzhou 730000 China;

3. College of Electrical and Information Engineering, Lanzhou University of Technology;

4. Key Laboratory of Gansu Advanced Control for Industrial Processes, Lanzhou 730050 China)

Abstract: Distributed generation system for contain energy storage element is difficult to accurately control DC bus voltage and DC subnet cutting load voltage and frequency instant communication subnet will deviate from normal faults, storage battery control strategy based on power balance with load feed forward is proposed and improved V/f inverter control methods for improvement. The simulation results show that AC/DC hybrid micro power grid operates in an island mode and the disturbance, this method can make the DC bus voltage stability, and voltage and frequency to be able to meet the requirements of normal operation, at the same time it improve the ability to resist disturbance of the whole system.

Key words: voltage stability; improved V/f control; distributed generator; AC/DC hybrid micro power grid

0 引言

为了提高电能质量、供电可靠性、安全性,减少电力电子器件给电网带来的谐波污染,文献[1-2]提出了交直流混合微电网。传统方法采用储能环节系统去调节直流母线电压使其达到稳定,而交流子网通常采用 V/f 控制或下垂控制策略调节交流母线的电压幅值和频率。文献[3]中分布式能源的交直流混合微电网中,交流子网和直流子网均含电池储

能系统,分别采取 P-f, Q-V 下垂控制和 P-V²下垂控制,确保混合微电网的稳定。文献[4]针对在孤岛模式下的太阳能和风能发电系统,提出一种新能量存储策略,通过控制太阳能和风能的输出功率,在一定范围内调节电池的电荷状态,防止电池过充或过放,从而确保直流母线电压稳定;而交流子网采用 V/f 控制策略调整交流侧的电压和频率幅值使其趋于稳定。文献[5]在交直流混合微电网分别处于并网和孤岛两种模式下,根据锂电池和超级电容的电荷状态是否处于正常值,判断负荷功率的需求,进而确保直流母线电压处于稳定。因储能装置容易受环境、温度、充放电特性等因素的影响,使其对直流母线电压难以准确控制;同时含有储能环节的系统,

收稿日期: 2016-07-18

作者简介: 樊一江(1983),男,工程师,主要从事国内大型化工装置变配电相关的电气设计工作。

其成本也会大大增加。

该文研究交直流混合微电网处于孤岛模式下，直流子网的母线电压的稳定性以及直流子网切负荷瞬间交流侧的电压幅值和频率的变化。对直流子网而言，提出一种新的控制策略，即根据直流母线电压稳定瞬间，蓄电池的电压视为不变，将蓄电池的容量作为稳定量值，由功率守恒原则，将电容充放电的功率和负载消耗的功率前馈并与蓄电池的容量进行比较，输出控制信号，从而控制直流母线电压的稳定，即基于功率平衡带负载前馈的蓄电池控制策略；对交流子网采用改进的 V/f 逆变控制策略调节电压和频率，达到交流子网正常运行的要求，从而提高交直流混合微电网的抗扰动能力，确保整个系统的正常运行。

1 交直流混合微电网

交直流混合微电网是包括分布式电源(DG)、负荷和储能装置的电网。整个系统由直流子网和交流子网两部分组成，通过静态开关与大电网相连，可以孤岛模式运行，也可以并网模式运行，如图 1 所示。

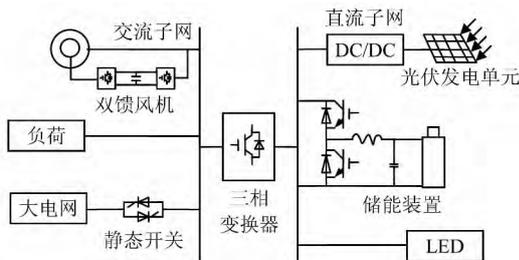


图 1 交直流混合微电网拓扑结构

由于交直流混合微电网中的分布式电源具有间歇性，不能输出稳定的功率，使直流微网的稳定性变差；此外，当电网突然发生扰动，就会造成直流母线电压发生振荡使其稳定性变差，导致交流子网的电压幅值和频率偏离正常值，进而影响整个微电网的稳定。

2 交直流混合微电网的控制策略

对交直流混合微电网的控制分为两部分，一是对直流母线电压的控制，二是在直流子网切负荷时对交流子网的电压幅值和频率的控制。

2.1 直流母线电压控制

传统上多采用储能元件对直流母线电压稳定性进行控制。如图 2 所示，采用含有超级电容的双向

DC/DC 电路对直流母线电压稳定性进行控制^[6]。

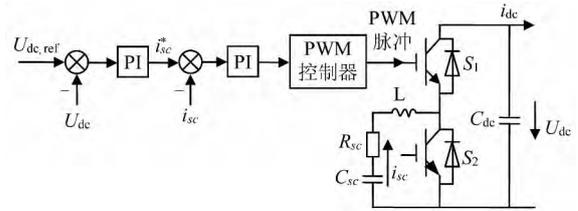


图 2 超级电容双向 DC/DC 电路及其控制策略

该方法利用了超级电容自身的优点，仅利用 PI 控制就能达到控制要求。但从实际工程中看，若超级电容器安装位置不合理，很容易引起电解质泄漏等问题，而且其成本投入也比较大。该文提出一种新的控制策略，即根据变换器前后功率平衡的原则，将蓄电池的容量作为稳定量值，以直流母线电压作为反馈，且将负载消耗的功率和电感储能消耗的功率作为前馈，以消除对直流母线电压的影响。

基于功率平衡带负载前馈的蓄电池控制策略如下：

1) 功率分析

图 3 为带储能装置的主电路。

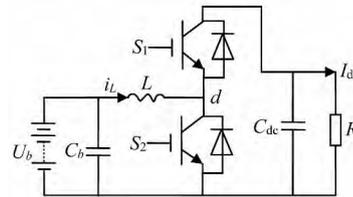


图 3 蓄电池双向 DC/DC 电路

假设忽略变换器开关引起的损耗，由基尔霍夫电压定律列回路方程可得：

$$U_b i_L = i_L \cdot L \cdot \frac{di_L}{dt} + U_d i_L \tag{1}$$

由能量守恒定律可得：

$$U_b i_L = C_{dc} \cdot \frac{dU_{dc}}{dt} \cdot U_{dc} + \frac{U_{dc}^2}{R} \tag{2}$$

将式(2)代入式(1)中可得：

$$U_b i_L = i_L \cdot L \cdot \frac{di_L}{dt} + C_{dc} \frac{dU_{dc}}{dt} \cdot U_{dc} + \frac{U_{dc}^2}{R} \tag{3}$$

即：

$$P_b = P_R + P_L + \frac{1}{2} C_{dc} \cdot \frac{dU_{dc}^2}{dt} \tag{4}$$

式中： C_{dc} 为直流母线电容， L 为电感， i_L 为电感电流， U_b 为电池电压， U_d 为 DC/DC 变换电路的输出电压， R 为负载。

当直流微电网中的功率平衡和直流母线电压稳

定时 P_b 将不发生变化且作为母线电压负载侧和蓄电池侧的功率平衡的参考值。

由式 (4) 可知, 电容吸收的功率等于蓄电池的总容量减去电感吸收的功率和负载消耗的功率, 而直流母线电压主要由电容吸收功率决定。

2) 控制系统的设计

将直流母线电压整体反馈, 则直流母线电压 U_{dc} 与 P_b 的关系为:

$$U_{dc} = \sqrt{\int \frac{2}{C_{dc}} P_{C_{dc}} dt} = \sqrt{\int \frac{2}{C_{dc}} (P_b - P_R - P_L) dt} \quad (5)$$

由式 (5) 可得出, 通过控制直流母线电容的充放电功率 $P_{C_{dc}}$ 即可控制直流母线电压。

根据反馈控制规律, 设计母线电容的控制环:

$$P_c^* = k_p (U_{dc,ref} - U_{dc}) + k_I \int (U_{dc,ref} - U_{dc}) dt \quad (6)$$

式中: k_p 为储能装置的 PI 调节器的比例系数; k_I 为积分系数。

负荷的增加和减少也影响直流母线电压的稳定, 因此将负荷消耗的功率和电感储能消耗的功率前馈, 以消除负载扰动对直流母线电压的影响。

基于以上分析, 可得到基于功率平衡负载反馈的控制框图, 如图 4 所示。

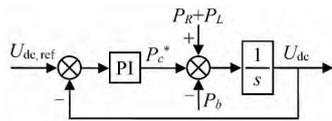


图 4 基于功率平衡负载反馈的控制框图

由图 4 可知, 将直流母线电压 U_{dc} 与参考值 $U_{dc,ref}$ 进行比较得到电压误差, 通过 PI 调节器得到电容充放电功率的参考值 P_c^* 。 P_c^* 再与负载消耗的功率和电感储能消耗的功率之和(功率前馈)与蓄电池的容量 P_b 进行比较, 输出控制信号占空比 d , 从而决定母线电容充电或是放电, 进而控制直流母线电压。

2.2 电压幅值和频率的控制

交流子网的电压和频率是衡量整个微电网系统是否稳定的重要参数, 而直流子网在切负荷瞬间直流母线电压会出现波动, 通过 DC/AC 逆变器的输出功率出现振荡, 使交流子网的频率和电压偏离正常值, 其抗扰动性变差, 从而影响整个微网的稳定性。采用改进的 V/f 控制策略来调整交流子网的频率和电压, 可提高系统的抗扰动能力。

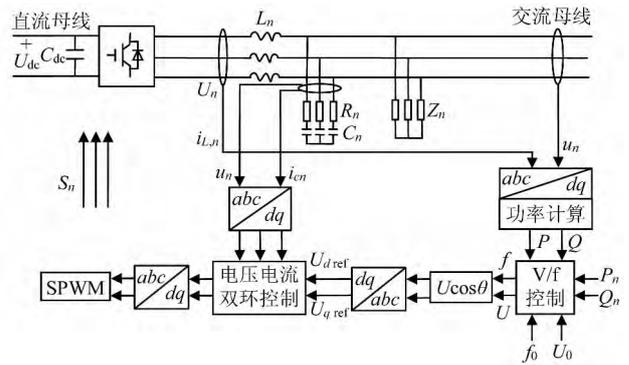


图 5 传统 V/f 下垂控制原理图

传统 V/f 控制原理如图 5 所示, 根据负载上的电压 u_n 和逆变输出电流 $i_{L,n}$, 计算出瞬时有功功率 P 和无功功率 Q , 通过 V/f 控制得出 $U \cos \theta$, 由坐标变换得到参考电压 $U_{d,ref}$ 、 $U_{q,ref}$, 再通过电压电流双环控制产生开关信号, 实现对 DC/AC 逆变器触发角的控制。

由于此策略并没有考虑到直流子网切负荷瞬间直流母线电压出现波动, 影响交流子网的电压和频率, 为此采用改进的 V/f 控制, 如图 6 所示。在输出的瞬时有功功率 P 和无功功率 Q 处加一个前置功率环, 即通过高通滤波器将其振荡滤除, 得到修正分量 w_p 和 w_q , 进而可得到修正后的频率 w_s' 和电压 u_s' 。

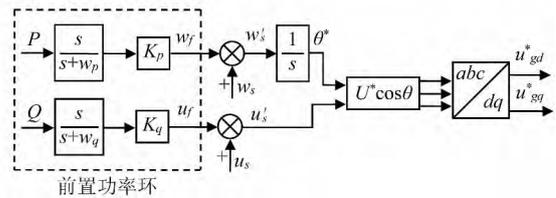


图 6 改进的 V/f 控制原理图

即:

$$w_s' = K_p \cdot \frac{s}{s + w_p} + w_s \quad (7)$$

$$u_s' = K_q \cdot \frac{s}{s + w_q} + u_s \quad (8)$$

通过坐标变换得到参考电压, 再根据传统 V/f 的控制原理调整交流子网的电压和频率的偏值。

3 仿真分析

针对直流子网的直流母线电压所提出的控制策略, 该文借助 MATLAB/Simulink 平台搭建模型。采用基于功率平衡带负载前馈的蓄电池控制策略, 对直流母线电压的稳定性进行仿真验证。蓄电池选择铅酸电池, 直流母线电压的参考值为 700 V, $C = 1000 \mu F$, $L = 9.5 \text{ mH}$, $R = 100 \Omega$ 。

图 7 是直流母线电压的波形图。由图中可以看

出,在 35 ms 前直流母线电压有波动。超级电容 DC/DC 变换电路在 35 ms 前直流母线电压最大幅值达到 950 V,在 35 ms 后稳定在 700 V;基于功率平衡带负载前馈的蓄电池控制策略在 15 ms 前直流母线电压有波动,最大幅值达到 830 V,在 15 ms 后稳定在 700 V。因此,采用基于功率平衡带负载前馈的蓄电池控制策略输出波形比超级电容 DC/DC 变换电路的幅值波动小,超调小,反应速度快。

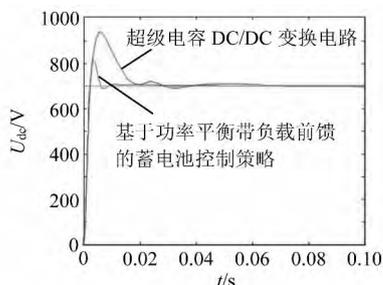


图 7 直流母线电压波形图

图 8 是切负荷瞬间直流母线电压波形。切负荷前与图 7 中的波形基本相同。在 $t = 50$ ms 切负荷,负载功率从 15 kW 降到 7.5 kW,直流母线电压变得不稳定。基于功率平衡带负载前馈的蓄电池控制策略直流母线电压幅值最大达到 750 V;超级电容 DC/DC 变换电路直流母线电压幅值最大达到 980 V,而两者达到稳定的时间基本相同,但前者幅值波动很小。

综上所述可以看出,基于功率平衡带负载前馈的蓄电池控制策略,使得输出的直流母线电压幅值波动小,超调小,快速达到稳定。

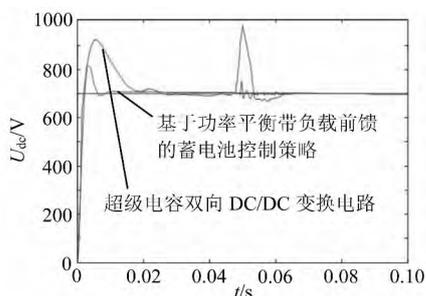


图 8 切负荷时直流母线电压波形图

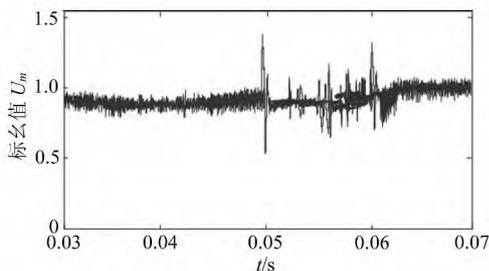


图 9 改进的 V/f 控制的交流子网的电压幅值

图 9 和图 10 是交流子网的电压幅值和频率的变化情况。在 $t = 50$ ms 时,负载功率由 15 kW 降到 7.5 kW,交流子网的电压和频率幅值偏离了正常值。采用改进的 V/f 控制,仅需 10 ms 使交流子网的电压幅值和频率恢复到正常值,进而保证了交流子网的正常运行。

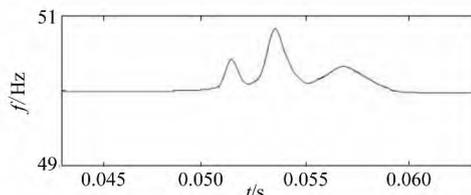


图 10 改进的 V/f 控制的交流子网的频率

4 结论

结合传统的控制方法,与该文所提出的控制策略进行比较,该文方法在证明其有效性的同时也提高了系统的反应速度。当切负荷时,直流母线电压波动小,超调量小,反应速度快。改进的 V/f 控制能够对交流子网偏离正常值的电压和频率快速调整到正常值,从而确保交直流混合微电网的稳定性,提高了整个系统的抗扰动能力。

参考文献:

- [1] 殷晓刚,戴冬云,韩云,等. 交直流混合微网关键技术研究[J]. 高压电器, 2012, 48(9): 43 - 46.
- [2] 杨新法,苏剑,吕志鹏,等. 微电网研究综述[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(1): 57 - 70.
- [3] Sung - Hwan Park, Jin - Young Choi, Dong - Jun Won. Cooperative Control Between the Distributed Energy Sources in AC/DC Hybrid Microgrid [C]. Washington, DC: Innovative Smart Grid Technologies Conference (ISGT), 2014.
- [4] Ye Zhang, Hong Jie - Jia, Li Guo. Energy Management Strategy of Islanded Microgrid Based on Power Flow Control [C]. Washington, DC: Innovative Smart Grid Technologies (ISGT), 2012.
- [5] Dong Bo, Li Yongdong, Zheng Zhixue, et al. Control Strategies of Microgrid with Hybrid DC and AC Buses [C]. Birmingham: Power Electronics and Applications (EPE 2011), Proceedings of the 2011 - 14th European Conference on. 2011.
- [6] 李志勇,凌鸣泉,李敏. 混合母线微电网的功率平衡控制策略[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2014, 44(6): 2331 - 2338.
- [7] 张旭辉,陈效华,龚春英. 直流变换器虚拟电容前馈控制策略[J]. 电力电子技术, 2014, 48(2): 59 - 61.
- [8] 吴志清,赵德勇,胡杨. 基于电容储能反馈的单向 PWM 整流器的研究[J]. 电力电子技术, 2015, 49(3): 16 - 21.