

文章编号:1004-289X(2011)01-0048-05

光伏发电接入微网运行控制仿真研究

杨文杰¹, 曾德容²

(1. 西南交通大学 电气工程学院, 四川 成都 610031; 2. 中国市政工程西南设计研究院, 四川 成都 610081)

摘要:微网中可能含有多个控制特性不同的分布式电源,其中光伏发电一般采用 PQ 控制策略,实现有功和无功功率的指定控制。直流稳定型电源采用 Droop 控制策略,按下垂特性调节频率和电压。在 Matlab/Simulink 仿真环境中建立 PQ 和 Droop 两种控制策略的模型,通过仿真算例获得微网运行特性,仿真表明综合采用两种控制策略能够在微网运行模式切换、孤岛模式下负荷投切、光伏发电出力变化情况下保证敏感负荷的电能质量和微网的频率与电压的稳定,但在孤岛重并网时可能出现微网运行失败。

关键词:光伏发电;微网控制;PQ 控制;Droop 控制

中图分类号:TM61

文献标识码:B

Simulation Research on Photovoltaic Generation Switching in the Microgrid Operation Control

YANG Wen-jie¹, ZENG De-rong²

(1. School of Electrical Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, China; 2. Southwest Municipal Engineering Design & Research Institute, Chengdu 610081, China)

Abstract: There may be several distributed sources of different control features in microgrid, of which PQ control strategy is adopted in Photovoltaic generation generally, so as to realize the designed control of active power and reactive power. A droop control strategy is adopted in stable DC source, frequency and voltage are regulated in terms of droop characteristic. The models of PQ and Droop control strategy were established in the environment of Matlab/Simulink, and the operation characteristics of Microgrid were got through simulation. The result demonstrate that by using these two control strategies, the operation variations of the Microgrid, the change of load and the changing of electrical power can be ensured, but it may fail in grid-connected again.

Key words: photovoltaic generation; microgrid control; PQ control; droop control

1 引言

光伏发电(PV)是分布式发电(DG)技术中极具代表性和发展前景的一种。目前由 PV 等小容量 DG 形成微网受到广泛的关注^[1]。微网在实际运行中需要解决的关键问题之一就是控制问题,常见的两种控制策略是 PQ 控制和 Droop 控制。

对于像微型燃气轮机和燃料电池这样的 DG,直流侧输出比较稳定有较好的动态响应响应,能够满足功率下垂调节的要求,可以采用基于下垂特性的 Droop 控制,以保证微网孤岛运行时的频率和电压稳定。对于像 PV 和风力发电这类 DG,其输出功率的大小受外界环境影响较大,发电具有明显的随机性和间

歇性,对这类 DG 的控制目标应该是如何保证可再生能源的最大利用率,因此可以采取 PQ 控制方式^[1,2]。

本文分别建立两种控制策略的模型。用于 PV 接入微网运行控制的仿真研究。PV 采用 PQ 控制,直流稳定型 DG 采用 Droop 控制策略。仿真得到微网中各个 DG 功率、电压、电流及系统频率的变换规律,从而分析综合运用两种控制策略的可行性。

2 光伏发电结构

PV 通常采用两级式结构。第一级为 DC-DC 变换,采用 Boost 电路拓扑结构,其作用是将光伏电池输出直流电压升高到一个合适的水平,同时实现最大功率跟踪控制(MPPT),第一级结构如图 1 所示。

光伏电池采用文献[3]介绍的工程用数学模型建立。MPPT 控制采用扰动观察法,通过控制 Boost 电路占空比实现^[4]。第二级为 DC - AC 变换,采用 PQ 控制的三相全桥逆变电路拓扑结构。

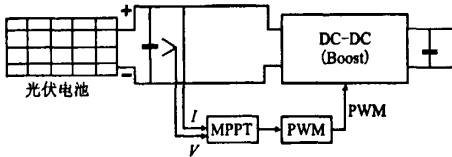


图1 PV 直流侧结构

3 微网结构

本文研究的微网结构如图 2 所示。图中含有 4 个 DG。DG2、DG4 为 PV。DG1、DG3 为燃气轮机、燃料电池等直流输出稳定的 DG,或者是 DG 与储能装置的结合,仿真中将其假设为直流源,经正弦脉宽调制 (SPWM) 的逆变器输出三相交流电。4 个 DG 逆变器出口均采用 LC 滤波器滤掉高次谐波,然后接入微网馈线。微网中负荷 1、2、4 为电压敏感负荷,负荷 3 为可变负荷。微网经隔离变压器接入 10kV 配电网。DG2 和 DG4 采用 PQ 控制,使得两者输出到母线 1 的功率为恒定值。DG1 和 DG3 采用 Droop 控制,控制母线 1、2、3 的电压恒定。

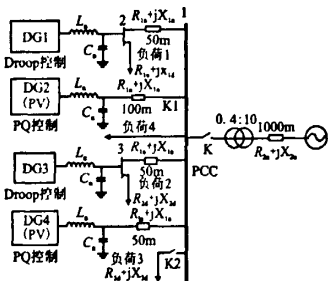


图2 微网结构

4 控制策略建模

4.1 PQ 控制

本文研究的 PQ 控制结构如图 3 所示。

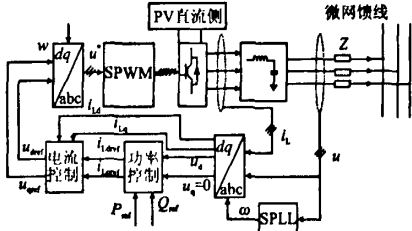


图3 PQ 控制结构

正常电网电压 u 经 dq 变换得 $u_d = U_m, u_q = 0$ 。当设定逆变器输出参考有功和无功分别为 P_{ref} 和 Q_{ref} , 由式(1)^[5]可知,对输出功率的控制转换为对电流的控制,其中有功由 d 轴电流决定,无功由 q 轴电流决定。

$$\begin{cases} i_{dref} = \frac{P_{ref}}{u_d} \\ i_{qref} = -\frac{Q_{ref}}{u_d} \end{cases} \quad (1)$$

图 3 中软件锁相环 (SPLL) 跟踪电网频率为 dq 变换提供参考频率。功率控制环的输入有功参考值 P_{ref} 为光伏电池输出最大功率,无功参考值 $Q_{ref} = P_{ref} \tan\theta$ ($\cos\theta$ 为逆变器功率因数)。按式(1)产生 dq 轴参考电流作为电流环输入与实际电感电流 dq 轴分量做差,其差值经 PI 调解可以使稳态误差为 0。电流控制环结构如图 4 所示。电流控制环中包含电流状态反馈解耦以及电网电压前馈补偿两项,其输出经 dq 反变化可以得到正弦调制信号 u^* 。

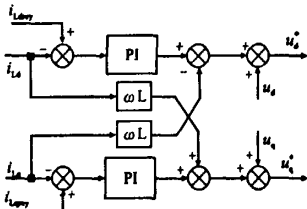


图4 电流控制环结构

4.2 Droop 控制

本文研究的 Droop 控制结构如图 5 所示,包括功率控制环和电压电流双环。

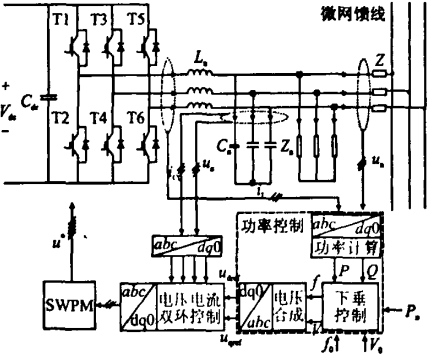


图5 电流控制环结构

功率控制环部分,有功功率下垂控制得到参考电压频率 f ,无功功率控制得到参考电压幅值 V 。两者合成的三相参考电压作为双环控制器的输入。其结构如图 6 所示。

双环控制采用电容电流内环电压外环。其结构如

图 7 所示。

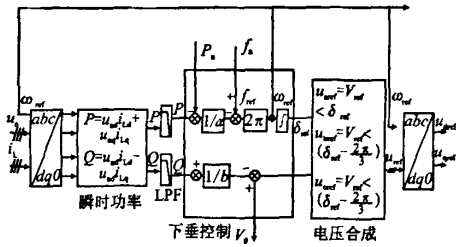


图 6 功率控制环结构

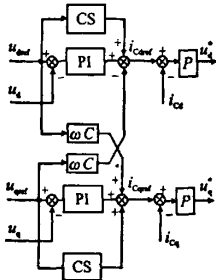


图 7 双环控制结构

外部电压环采用 PI 控制器,目的是稳定负载电压,使负载电压稳态精度为 0,电压环输出作为电流内环的参考电流。电流内环采用比例控制器 P,可以提高系统的动态响应^[6]。电流内环输出经过 dq 反变换,得到可控正弦调制信号 u^* 。

5 仿真分析

5.1 仿真参数

PV 采用的光伏电池阵列(多个光伏电池串并联)标况下参数如表 1 所示。

表 1 PV 仿真参数

DG2	$I_{sc}=14.88\text{ A}, V_{oc}=566.4\text{ V}, I_m=13.88\text{ A},$ $V_m=460.8\text{ V}, P_m=6.3\text{ kW}, \cos\theta=1$
DG4	$I_{sc}=14.88\text{ A}, V_{oc}=708\text{ V}, I_m=13.88\text{ A},$ $V_m=576\text{ V}, P_m=8\text{ kW}, \cos\theta=1$

DG1、DG3 直流侧电压 $V_{dc}=800\text{ V}$,额定频率下功率分别为 $P_{n2}=20\text{ kW}, P_{n3}=25\text{ kW}$,额定频率 $f_0=50\text{ Hz}$,额定电压幅值 $V_0=380\text{ V}$ 。

线路仿真参数如表 2,负荷参数如表 3 所示。

表 2 线路仿真参数

380V 线路	$R_{1n}=0.642\Omega/\text{km}, X_{1n}=0.101\Omega/\text{km}$
10kV 线路	$R_{2n}=0.347\Omega/\text{km}, X_{2n}=0.2345\Omega/\text{km}$

表 3 负荷参数

负荷 1	$R_{1d}=500\Omega, X_{1d}=3.14\Omega$
负荷 2	$R_{2d}=200\Omega, X_{2d}=3.14\Omega$
负荷 3	$R_{3d}=10\Omega, X_{3d}=6.28\Omega$
负荷 4	$P_{4d}=100\text{ kW}, Q_{4d}=50\text{ Var}$

LC 滤波器参数:滤波电阻 $r=0.01\Omega$,滤波电感 $L=0.6\text{ mH}$,滤波电容 $C=1500\mu\text{F}$ 。隔离变压器参数:采用 D, yn11 连接,额定容量 500 kVA ,电压等级 $0.4\text{ kV}/10\text{ kV}$,短路阻抗 4%,短路损耗 4.26 kW ,配电网电压 10 kV 。Droop 控制参数:下垂控制系数 $1/a=10^{-5}, 1/b=3\times 10^{-3}$,双环控制器参数: $K_{up}=10, K_{ui}=100, K_i=5$ 。SPWM 调制载波频率 $f_s=6\text{ kHz}$ 。PQ 控制参数:SPWM 调制载波频率 $f_s=8\text{ kHz}$ 电流环参数: $K_{ip}=1, K_{ii}=50$ 。

5.2 仿真结果

(1)1.0s 前微网并网运行,1.0s 与配电网断开,仿真结果如图 8 所示。

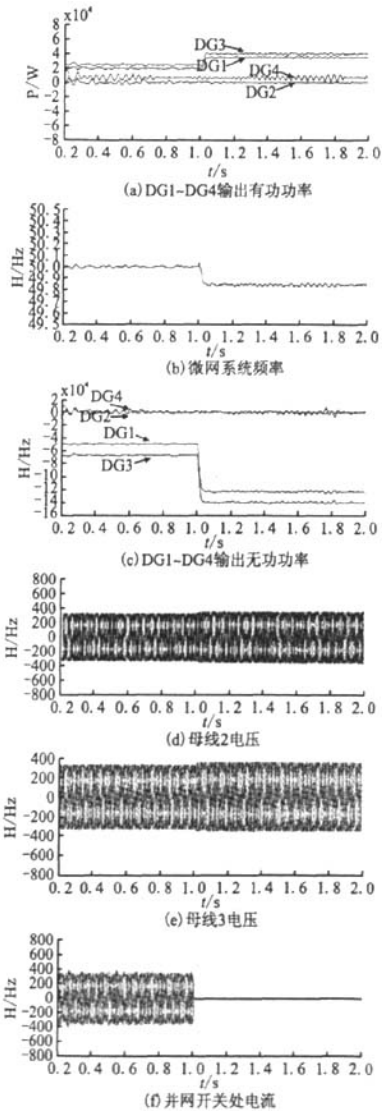


图 8 与配电网断开时微网运行特性

图 8(a)表明微网断开与配电网连接后,DG1、DG3

有功功率增加。由此可知并网运行时配电网向微网输送功率,与配网断开后出现有功功率缺额,采用 Droop 控制的 DG1 和 DG3 增加输出的有功功率,用于平衡系统功率缺额。采用 PQ 控制的 DG4、DG2 功率输出不变。

图 8(b)微网系统频率下降,下降量在允许范围内,证明了 Droop 控制通过调节频率来调整有功输出。

图 8(c)表明 DG1 和 DG3 输出无功功率减小,两者的差值为未断开前向电网输送的无功。DG2 和 DG4 无功输出为 0。

图 8(d)、(e)为母线 2、3 处的电压,由于 DG1、DG3 输出无功减小,电压幅值增加,变化幅度小于 5%,在允许范围内。可见从并网切换到孤岛时,能够保证电压和频率满足敏感负荷要求。

图 8(f)表明断开瞬间,不会出现电流冲击,过渡过程平滑。

(2) 孤岛运行中,2s 时掉切负荷 3,3s 重新给负荷 3 供电,仿真结果如图 9 所示。

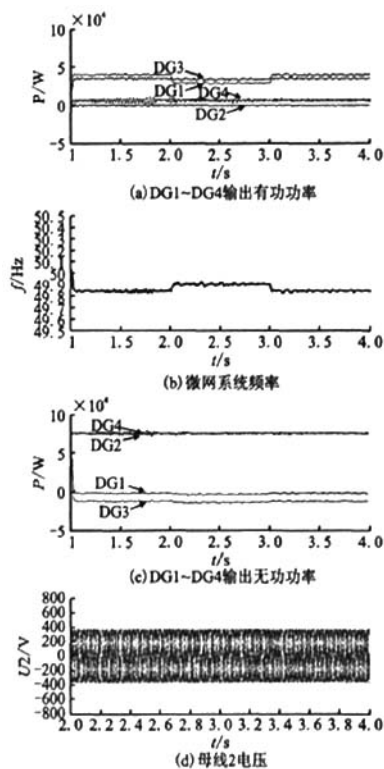


图9 负荷变化时微网运行特性

图 9(a)和(c)反映了微网孤岛模式下,当负荷变化时,DG1 和 DG3 能够自动调节其输出的有功和无功功率。切负荷时,输出功率减小,投负荷时输出功率增

加,保证孤岛功率平衡。

图 9(b)表明 Droop 控制的调节满足垂特性。在 2s 切掉负荷 3,DG1 和 DG3 输出有功功率减小,频率增加;3s 重新给负荷 3 供电,DG1 和 DG3 输出有功功率增加,频率下降。并且频率变化在允许范围内。

图 9(d)为母线 2 的电压,电压调节满足 Q-V 特性。由于无功变化较小,电压幅值增减不明显。母线 3 有同样的结果(图略)。表明孤岛中负荷投切不影响对敏感负荷的供电。

(3) 孤岛运行中,4s 时光照强度由从 $1000\text{W}/\text{m}^2$ 下降到 $400\text{W}/\text{m}^2$ 仿真结果如图 10 所示。

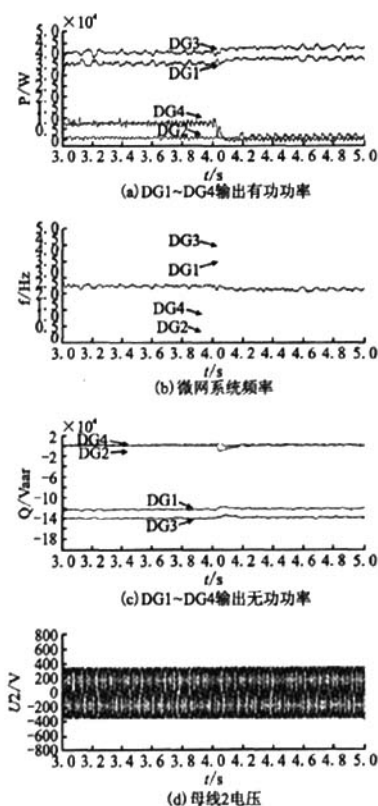


图10 光照强度变化时微网运行特性

图 10(a)和(c)表明,当光照强度下降,DG2 和 DG4 输出有功功率下降,无功功率保持为 0。DG1 和 DG3 自动调节其输出功率达到系统功率平衡。

图 10(b)表明孤岛运行中不会因为外界环境变化,有 DG 输出功率变化,而影响系统运行,主控 DG 能够提供频率支撑。

图 10(d)说明,敏感负荷不会因有 DG 功率变化而受到影响,其电压能够保持稳定。母线3处电压有

(下转第 54 页)

提取等,基于粗糙集理论的电力系统智能故障的实现过程如图1所示,必须承认解决建立原始电力系统数据库是粗糙集应用的瓶颈,作者认为最好建立电力系统的仿真模型然后提取故障特征是比较有效的解决措施。

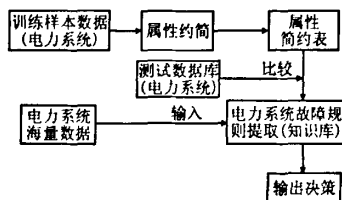


图1 基于粗糙集理论的电力系统智能诊断过程

5 结论

粗糙集理论是一种非常有潜力的软计算方法,该理论能有效地分析不精确、不一致、不完整等不完备的信息,且与其他理论有很好的融合性。本文在介绍粗糙集特征的基础上分析了粗糙集在电力系统中的应用现状和发展前景。

参考文献

- [1] 苏宏升. 软计算方法及其在电力系统故障诊断中的若干应用研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2007.
- [2] 朱洪泰, 孙向飞, 于继来. 粗糙集理论在电力系统中的应用[J]. 电力系统自动化, 2005, 28(3): 90-95.
- [3] 李冰清. 一种粗糙集和神经网络相结合的故障诊断方法研究[M]. 太原: 太原理工大学, 2005.
- [4] 董立新, 肖登明, 杨荆林, 等. 基于粗糙集理论的电力设备故障诊断方法[J]. 高压电器, 2003, 39(5): 23-25.
- [5] 苏宏升, 李群湛. 基于粗糙集理论和神经网络模型的变电站故障诊断方法[J]. 电网技术, 2005, 29(16): 66-70.
- [6] 孙秋野, 张化光, 戴璟. 基于改进粗糙集约简算法的配电系统在线故障诊断[J]. 中国电机工程学报, 2007, 27(7): 58-64.
- [7] 成蓬勃. 基于数据挖掘技术的配电网故障诊断研究[D]. 南宁: 广西大学, 2007.
- [8] 廖志伟, 孙雅明. 基于数据挖掘模型的高压输电线系统故障诊断[J]. 电力系统自动化, 2001, 25(15): 15-19.
- [9] 谢宏, 程浩忠, 张国立, 等. 基于粗糙集理论建立短期电力负荷神经网络预测模型[J]. 中国电机工程学报, 2003, 23(11): 1-4.

收稿日期: 2011-01-04

作者简介: 丁娟(1978-), 女, 宁夏银川人, 助理工程师, 主要研究方向: 电力系统自动化。

(上接第51页)

同样的变化(图略)。

(4) 5s时微网与配电网重并网仿真结果如图11

所示。

图11并网开关处电流响应表明微网重联到配电网的过渡时间较长约0.2s。重联到电网的瞬间, 由于微网孤岛运行时频率与电网频率不同, 开关两侧有电压相角差, 会有较大的冲击电流, 可能导致微网运行失稳。

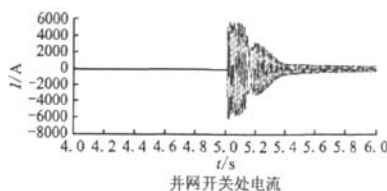


图11 微网重联到配网时并网开关处电流

6 结论

通过对仿真结果的分析结论如下:

(1) PV接入微网运行采用PQ控制, 可以实现无功和有功功率的解耦。有功输出以光伏阵列最大输出功率为参考, 能够在外界条件变化时保证最大能源利用率。

(2) 采用Droop控制的直流稳定性DG均参与孤岛调节, 自动共享功率波动, 并为PV等其他电源提供频率与电压支撑。

(3) 综合采用PQ和Droop控制, 能够在微网模式切换、负荷变化、DG出力变化等情况下保证敏感负荷的电能质量。

(4) 从孤岛运行重并网瞬间, 电流出现较大的冲击, 过渡时间约为十个工频周期, 可能出现不稳定, 应采取一定的抑制冲击电流措施。

参考文献

- [1] 王成山, 肖朝霞, 等. 微网综合控制与分析[J]. 电力系统自动化, 2008, 32(7): 98-102.
- [2] 王成山, 杨占刚, 等. 微网实验系统结构特征及控制模式分析[J]. 电力系统自动化, 2010, 34(1): 99-103.
- [3] 王长江. 基于MATLAB的光伏电池通用数学模型[J]. 电力科学与工程, 2009, 25(4): 11-14.
- [4] 李炜, 朱新坚. 光伏系统最大功率点跟踪控制仿真模型[J]. 计算机仿真, 2006, 23(06): 249-243.
- [5] V. Galdi, A. Piccolo, P. Siano Dynamic Performances and Control of Dispersed Generators Connected through Inverter[C]. CIMCA - IAWTIC', 2005, 05(s): 1060-1065.
- [6] 王成山, 肖朝霞, 等. 微网中分布式电源逆变器的多环反馈控制策略[J]. 电工技术学报, 2009, 24(2): 100-106.

收稿日期: 2010-04-12

作者简介: 杨文杰(1984-), 甘肃人, 研究方向为分布式发电与微网运行控制。

光伏发电接入微网运行控制仿真研究

作者: [杨文杰](#), [曾德容](#), [YANG Wen-jie](#), [ZENG De-rong](#)
作者单位: [杨文杰, YANG Wen-jie \(西南交通大学, 电气工程学院, 四川, 成都, 610031\)](#), [曾德容, ZENG De-rong \(中国市政工程西南设计研究院, 四川, 成都, 610081\)](#)
刊名: [电气开关](#)
英文刊名: [ELECTRIC SWITCHER](#)
年, 卷(期): 2011, 49(1)

本文链接: http://d.g.wanfangdata.com.cn/Periodical_dqkg201101017.aspx