

微型电网联网和孤岛运行控制方式初探

鲁鸿毅, 应鑫龙, 何奔腾

(浙江大学, 浙江 杭州 310027)

摘要: 简要介绍了微型电网的相关概念, 然后在理论分析的基础之上, 介绍和分析了微型电网在联网运行和孤岛运行时的控制方式。使用 Matlab 建立了微型电网的基本模型, 并基于所提出的控制方式, 对微型电网联网运行和孤岛运行状态进行了仿真分析, 结果表明所提出的控制方式的正确性。

关键词: 微型电网; 联网运行; 孤岛运行; 控制方式

Control strategy for micro-grid in net-connected and islanded operation

LU Hong-yi, YING Xin-long, HE Ben-teng

(Zhejiang University, Hangzhou 310027, China)

Abstract: In this paper, the concept of micro-grid is introduced, and the control strategy is proposed based on the analysis of micro-grid. The basic model of micro-grid is established in Matlab, based on which, micro-grid net-connected operation and islanded operation are simulated with the control strategy. The result shows the validity of the control strategy.

Key words: micro-grid; net-connected operation; islanded operation; control strategy

中图分类号: TM71 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2009)11-0028-04

0 引言

随着煤、石油、天然气等能源供应日益紧张和用电需求的不断增高, 利用光能、风能、沼气等能源的发电方式应运而生, 由于利用此类能源的发电机组分布在能源所在地, 所以这种发电方式又称为“分布式发电”, 分布式发电机通常有光伏电池、风力发电机、微型内燃机和燃料电池等^[1]。分布式发电的出现, 既缓解了能源不足、利用煤等能源发电造成环境污染的问题, 更提高了负荷的用电可靠性, 所以得到了越来越多的重视和应用。

当电网出现故障, 某一区域与主网跳开之后, 区域内的分布式电源仍会带本地负荷运行, 形成所谓的“孤岛”。孤岛的形成, 不仅会由于发电机容量不足等问题, 造成本地负荷的不稳定运行, 更会在与主网重合时对电网产生冲击, 所以以往的做法是禁止孤岛的形成, 即: 分布式发电机所在的区域与主网脱离之后, 立即切除分布式发电机组, 等到与主网重合后再将分布式发电机并入电网^[2]。

禁止孤岛运行, 的确消除了分布式发电带来的一些问题, 但是人们也渐渐意识到, 如果能允许孤岛运行, 那么本地重要负荷将可以得到不间断的供电, 分布式发电也能发挥更大的优势。所以“微型

电网(微网)”的概念被提了出来。微型电网包括分布式发电机组和负荷, 以及相应的控制、保护单元。在与主网连接时称为“联网运行”, 与主网跳开后独立运行称为“孤岛运行”, 这两种都是微型电网的正常运行状态。

本文的主要内容是介绍和分析微型电网在联网和孤岛运行时的控制方式, 并用仿真来验证控制方式的可行性。

1 微型电网的控制方式

1.1 微型电网的结构

微型电网(微网)是一个完备的小型电力系统, 包括分布式发电机、负荷、控制单元和保护单元等, 如图1中虚线框内所示。

在图1中, 微网包括了一台风力发电机、一组光伏电池、一台燃沼气发电机、功率变换器件、控制器和两个等效负荷。开关KA闭合时, 微网处于联网运行状态, 开关KA打开时, 微网则进入孤岛运行。

分布式发电机主要是利用本地的二次能源如光能、风能、沼气, 也有利用如柴油等一次能源的高效率的微型内燃机, 其发出的或为直流电压, 或为高频电压, 均不能直接连接到电网上, 而是要通过

逆变器、或者整流器+逆变器功率变换器件, 转换成 50 Hz, 幅值为 1p.u., 且与电网基本同相位的电压后, 再并入电网, 功率变换器件还是实现不同控制方式的主要器件。

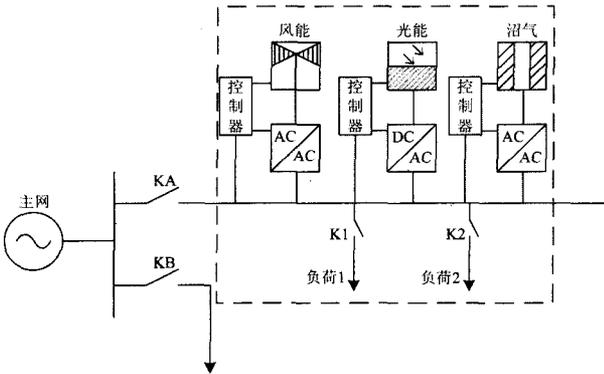


图 1 微型电网简化图

Fig.1 Sketch map of micro-grid

1.2 微网联网运行时的控制方式

为了最大地利用二次能源, 在联网运行的时候, 分布式发电机应以最大功率输出。如果不需补偿无功, 则可设定输出有功等于额定功率, 输出无功为零, 电压和频率将由系统来调节, 所以在联网运行时逆变器适合用恒定输出功率控制。下面简要叙述逆变器定输出功率控制的原理。

在恒定输出功率控制下, 逆变器输出的有功 P 和无功 Q 均为定值。对于三相系统, 其有功、无功瞬时值的计算式分别为:

$$P = u_A i_A + u_B i_B + u_C i_C$$

$$Q = (u_{BC} i_A + u_{CA} i_B + u_{AB} i_C) / \sqrt{3}$$

实现有功和无功的解耦控制的办法就是将三相电压和电流在同步坐标轴即 $d-q$ 坐标轴下分解为相互垂直的 d 分量和 q 分量, 过程如下:

$$\begin{bmatrix} u_0 \\ u_q \\ u_d \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1/\sqrt{2} & 1/\sqrt{2} & 1/\sqrt{2} \\ \cos\theta & \cos(\theta-2\pi/3) & \cos(\theta-4\pi/3) \\ \sin\theta & \sin(\theta-2\pi/3) & \sin(\theta-4\pi/3) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_A \\ u_B \\ u_C \end{bmatrix}$$

电流变换的过程与上式相同^[3]。

由于所选取的同步坐标的 d 轴与 A 相同相位, 且电压和电流变换选取的是相同的同步坐标, 变换结果见图 2。

$d-q$ 坐标系下的有功、无功瞬时值表达式为:

$$P = u_d i_d + u_q i_q + u_0 i_0$$

$$Q = u_d i_q - u_q i_d$$

在三相电压对称的情况下, $u_q = 0, u_0 = 0$, 上式简化为:

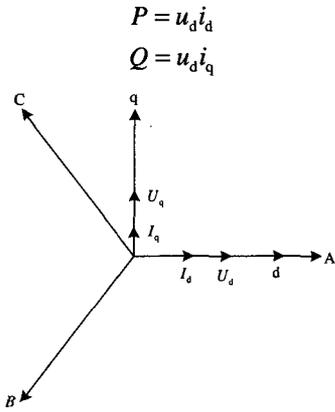


图 2 向量分解图

Fig.2 Vector decomposition in d-q coordinate

因为 u_d 为定值, 于是有功和无功可以分别通过 i_d, i_q 的控制来实现, 简化的原理图如图 3。

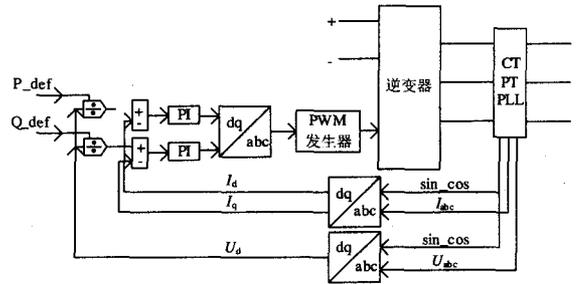


图 3 恒定输出功率控制原理图

Fig.3 Schematic diagram of invariable power output control

图中 P_{def} 和 Q_{def} 是逆变器输出有功和无功的设定值, 与 d 轴电压相除可以分别得到 d, q 轴电流的设定值。 d, q 轴电流的设定值与实际电流的误差通过 PI 调节环节后, 重新转换为 abc 三相坐标, 再输入 PWM 发生器, 从而控制逆变器的输出电流以输出恒定的有功和无功功率。

1.3 微网孤岛运行时的控制方式

图 1 中的开关 KA 打开之后, 虚线框内的微型电网即进入孤岛运行状态。假如分布式发电机仍然输出恒定数值的有功和无功, 那么在输出功率小于负荷功率额定时, 系统频率和电压将会降低; 在输出功率大于负荷功率额定时, 系统频率和电压将会升高, 均会造成负荷的不稳定运行。即使此时输出功率正好等于负荷的额定功率, 那么之后负荷的增大或减少仍会造成系统的失稳。所以分布式发电机必须担负起微网电压和频率的调整任务, 即在进入孤岛运行后, 分布式发电机要转为定电压控制, 这种控制同样是通过逆变器来实现的。定电压控制的原理图如图 4。

如图 4 所示在恒定电压控制时，使用电压互感器和锁相环分别取得系统电压及其相位，并进行 d-q 分解。由图 2 可知系统稳定运行时，若取 d 轴与 A 同向，q 轴超前 d 轴 90°，三相电压在 d-q 坐标下的分解结果为 $U_q=0$ ， $U_d=1$ ，所以在恒定电压控制时 q 轴设定值为零，d 轴设定值 $U_{d,def}$ 为 1。d 轴设定值与实际值的误差通过 PI 调节后，再由 d-q 反变换为 abc 三相电压，输入至 PWM 发生器以达到控制输出电压的目的。

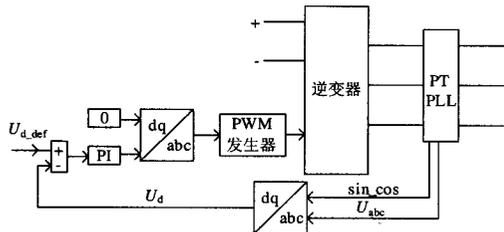


图 4 恒定电压控制原理图

Fig.4 Schematic diagram of invariable voltage control

对于多台分布式发电机的情况，光能和风力发电机仍然使用恒定输出功率控制，最大的利用难以存储的二次能源；使用沼气或燃油的发电机，应切换为电压和频率控制，以随时补充有功和无功的不足，稳定微网电压，保证负荷正常运行。但是分布式发电的容量往往是小于本地总负荷的，无论使用何种控制方式都不可能维持微网在孤岛下的正常运行。所以在微型电网进入孤岛运行后，应切除次要负荷，保留重要负荷，并留有一定的功率裕量。

2 仿真分析

本次仿真使用 Matlab 建模，简化图如图 5。

系统各元件参数：

主网：短路容量 10 MVA, 额定电压 20 kV, $X/R=7$;

变压器：额定容量 50kVA, D11/Yg 接法, 20 kV/400 V, $R=0.97 \Omega$, $X=35 \Omega$;

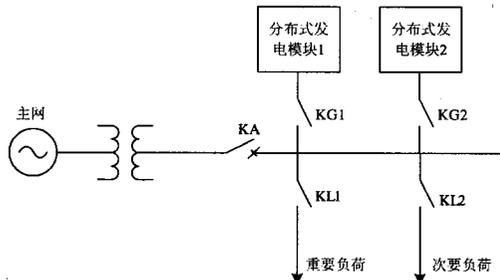


图 5 仿真模型简化图

Fig.5 Sketch map of simulation model

分布式发电模块如图 6。

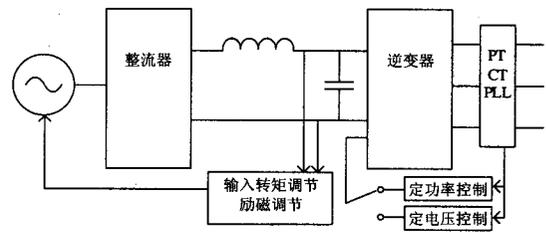


图 6 分布式发电模块简化图

Fig.6 Sketch map of distributed generation module

发电机为标准同步发电机，额定容量 35 kVA，机端电压 800 V，其他参数为默认参数。为了使电容电压恒定，加入了发电机输入转矩和励磁调节环节。通过可控的单刀双掷开关来切换逆变器的控制方式。

负荷：微网内负荷被分为重要负荷和次要负荷，设均为 $P=50 \text{ kW}$ ， $Q=5 \text{ kvar}$ 。微型电网进入孤岛运行时，应将 K2 打开，将次要负荷切除。

基准电压 400 V，基准容量 10 kVA。

仿真过程如下：

$t=0 \text{ s}$ ：KA、KL1、KL2 闭合，KG1、KG2 打开；

$t=0.1 \text{ s}$ ：KG1、KG2 闭合，分布式发电模块并网，有功输出定值 32 kW，无功输出定值 0 var；

$t=0.2 \text{ s}$ ：某一故障后，KA 打开，进入孤岛运行；

$t=0.3 \text{ s}$ ：分布式发电模块 2 转为定电压控制，模块 1 控制方式不变，K2 打开切除次要负荷。

仿真结果如图 7。

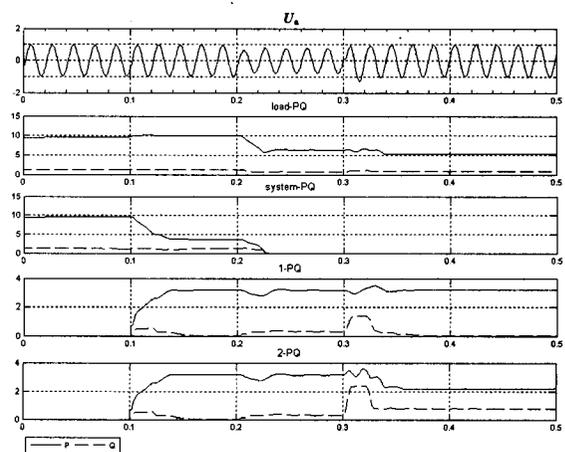


图 7 仿真结果

Fig.7 Simulation result

图 7 中 U_a 为负荷 a 相电压，由于本次仿真三相

对称, 所以省略 b、c 相电压波形。system-PQ 为系统输出功率, load-PQ 为负荷吸收的功率, 1-PQ 为分布式发电模块 1 输出的功率, 2-PQ 为分布式发电模块 2 输出的功率。

$t = 0.1$ s 时, 分布式发电模块 1 和 2 接入电网, 输出有功定值为 32 kW, 无功定值为 0 var。经过 0.05 s 达到稳定后, 两台分布式发电机有功和无功输出各为 32 kW、0 var, 系统输出有功 38 kW, 输出无功 10 kvar, 负荷吸收的功率不变, 负荷电压波形保持稳定。这就验证了恒定有功和无功输出的控制方法, 适合在联网运行时采用。但是可以看出, 负荷吸收的功率在分布发电机接入之后略有增大(3%左右), 这是因为在分布式发电机注入恒定功率之后, 造成了对应节点电压的增高。节点电压的增高幅度与系统等值阻抗、负荷等值阻抗以及注入功率的大小有关(证明从略), 这涉及到分布式发电准入容量的问题, 此处不详细讨论。

$t = 0.2$ s 时, 系统发生某故障跳开 KA, KA 右侧系统形成孤岛。经过 0.04 s 后, 系统达到新的稳定点, 分布式发电模块输出有功仍为 32 kW, 无功输出略有增大。由于发电机的总输出功率小于负荷的额定功率, 系统电压降低近 30%, 这将造成系统的不稳定运行。

$t = 0.3$ s 时, 分布式发电模块 2 切换为定电压控制, 模块 1 输出功率如前所设不变, 并切除次要负荷。由图可见, 经过 0.04 s 后系统达到稳定, 系统电压恢复正常值, 分布式发电模块 1 按照预定值输出有功和无功, 分布式发电模块 2 以电压为指标进行调整, 补偿有功和无功的缺额, 进入稳定后, 孤岛可以保持正常运行。这表明: 一台机采用定电压控制, 另一台(或多台)机采用定输出功率控制, 可以保证孤岛的正常运行, 但是切除次要负荷也是必要的。

3 结论

本文先从理论上分析了微型电网的控制方式, 即:

联网运行时, 分布式发电机采用恒定输出功率

的控制方式——输出有功等于额定输出功率, 输出无功为零, 以最大的利用二次能源。电压和频率的调整由系统完成。

孤岛运行时, 微网中的一台分布式发电机采用定电压控制, 其余发电机的控制方式与联网运行时相同。定电压控制的发电机应取用燃气或燃油的发电机, 以迅速、准确补充微网功率缺额, 保证电压稳定。利用光能、风能等难以存储的二次能源的分布式发电机, 仍保持最大有功输出, 以最大地利用二次能源。必要时切除次要负荷, 保证一定的功率裕量。

在理论分析的基础上, 本文使用 Matlab 建立了模型并进行仿真, 仿真结果表明: 如上所述的控制方式, 能够保证微型电网在联网和孤岛时均能稳定运行, 且调整速度快, 性能良好, 有一定的实践指导意义。

参考文献

- [1] Ackerman T, Anderson G, Seder L. Distributed Generation, a Definition [J]. *Electric Power System Research*, 2001, 57(6): 195-204.
- [2] Dugan R C, McDermott T E. Operating Conflicts for Distributed Generation on Distribution Systems[A]. In: *Rural Electric Power Conference*[C]. Arkansas: 2001.
- [3] Zeng Q, Chang L. Improved Current Controller Based on SVPWM for Three-Phase Grid-Connected Voltage Source Inverters[A]. In: *IEEE 36th Annual Power Electron SPEC Conf 2005(PESC 05)*[C]. 2005.2912-2917.

收稿日期: 2008-07-08; 修回日期: 2008-08-26

作者简介:

鲁鸿毅(1984-), 男, 硕士研究生, 主要从事微型电网的控制与保护的研究; E-mail: luhongyi1984@126.com

应鑫龙(1985-), 男, 博士研究生, 主要从事微型电网的控制与保护的研究;

何奔腾(1959-), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事电力系统继电保护和控制的研究。