

分布式发电实验室的潮流仿真

吴红斌, 孙辉

(合肥工业大学 电气与自动化工程学院, 安徽省 合肥市 230009)

Power Flow Simulation of Distribution Generation Laboratory

WU Hongbin, SUN Hui

(School of Electric Engineering and Automation, Hefei University of Technology, Hefei 230009, Anhui Province, China)

ABSTRACT: The modeling of distribution generation (DG) laboratory system and the simulation of its power flow are conducted. The calculation models for photovoltaic generation and wind power generation are expounded. By use of simulation software, the power flow of DG laboratory system under various conditions, e.g., the isolated island operation and grid-connected operation, is simulated. Establishing above-mentioned laboratory platform can offer experimental verification for theoretical research on DG system in future.

KEY WORDS: distribution generation (DG) laboratory; photovoltaic generation; wind power generation; power flow simulation

摘要: 对分布式发电实验室系统进行了建模和潮流仿真分析, 介绍了光伏发电、风力发电的潮流计算模型。最后, 利用仿真软件对实验室系统在并网和孤岛运行等各种情况下的潮流进行了仿真分析。该实验室平台可以为今后进行分布式发电系统的理论研究提供试验验证工具。

关键词: 分布式发电实验室; 光伏发电系统; 风力发电系统; 潮流仿真

0 引言

分布式发电^[1-4]是指发电功率在几kW至50 MW的小型模块化、分散式、布置在用户附近为用户供电的发电系统。在电力市场环境下, 用户除向电网购电之外也可以自建电站, 拥有分布式电源的发电运营商和用户可以根据自身的特点, 参与市场竞争, 满足电力系统和用户的多种需要, 因此在许多情况下, 分布式供电是集中式供电不可缺少的重要补充^[5-6]。

基金项目: 国家 863 高技术基金项目(2007AA05Z240); 国家自然科学基金项目(5067002, 50837001)。

The National High Technology Research and Development of China 863 Program(2007AA05Z240); Project Supported by National Natural Science Foundation of China(NSFC)(5067002, 50837001)。

在实验室建立分布式发电示范系统, 是研究分布式发电技术的一个重要补充手段。文献[7]介绍了德国卡塞尔大学太阳能研究所微电网实验室在并网与孤岛情况下控制分布式发电系统的运行, 提高分布式发电系统高效性、可靠性和经济性的控制策略等情况; 文献[8-9]介绍了美国电气可靠性技术解决方案联合会(Consortium for Electric Reliability Technology Solutions, CERTS)分布式发电系统的初步成果, 检验了系统的建模和仿真方法、保护和控制策略等相关问题。

合肥工业大学作为国内较早从事分布式发电系统研究的高校之一, 在实验室也建立了一个小型的分布式发电示范系统。该系统既可以实现联网运行, 也可以独立运行。

本文对分布式发电实验室进行介绍, 并对光伏发电、风力发电的潮流计算模型进行分析。利用仿真软件对实验室系统在并网运行下的受电和送电模式、孤岛运行等多种情况下的潮流进行仿真分析。

1 分布式发电实验室系统

1.1 实验室系统简介

实验室示范系统如图1所示。图中 Bus1 处为无穷大电源系统, 发电机 F1 和 F2 用来模拟常规的

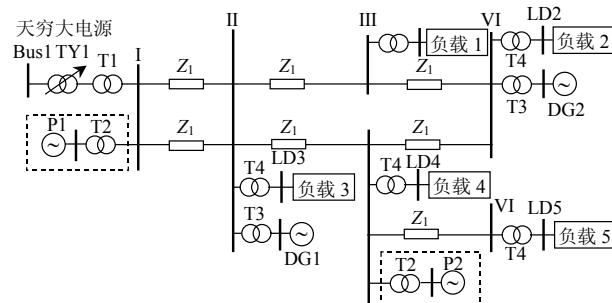


图1 分布式发电系统设计图

Fig. 1 The design of distributed power generation system

发电机系统, 分布式电源 DG1、DG2 分别用来模拟太阳能发电和风力发电系统。当无穷大电源与实验室系统相连时, 即为并网运行; 当无穷大电源断开后, 则可模拟分布式发电系统孤岛运行。

1.2 太阳能光伏发电系统

在本实验室设计中, 考虑到太阳能作为分布式发电系统独立电源之一, 因此在实验室中采取太阳能光伏并网的运行方式。

太阳能发电系统^[10-12]如图 2 所示, 由光伏阵列、最大功率点跟踪(maximum power point tracking, MPPT)和控制器组成, MPPT 模块完成光伏阵列的最大功率点跟踪, 控制器结合控制策略调制逆变器触发脉冲, 通过直流/交流将直流电转换成交流电, 经过变压器后与电网相连。

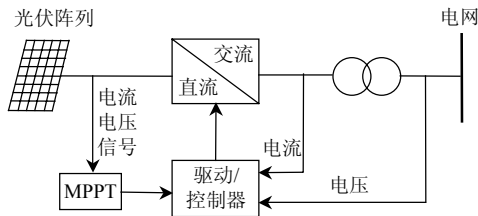


图 2 太阳能光伏并网系统结构

Fig. 2 The design of photovoltaic-grid system

1.3 风力发电系统

在本实验室系统中, 模拟的是变速恒频的双馈风力发电系统^[13-16]。由三相交流异步电动机来模拟风力机的输出特性, 通过转轴连接转子绕线式的双馈发电机。采用双向逆变器, 来实现能量在发电机的转子和电网间的双向流动。

发电机并网后, 系统根据风力机模拟算法计算出当前功率, 并控制异步电机部分输出此功率, 达到模拟风力机输出功率的目的, 而发电机部分根据最大功率点跟踪算法使发电机工作在当前风速下最大功率点工作需要的转速, 通过发电机与异步电机的配合, 可以使系统模拟运行在风力机最佳功率曲线上的任一点。

2 潮流仿真中分布式电源的处理

对于光伏发电系统, 光伏阵列的输出功率受天气影响较大, 发电具有明显的间歇性。一般来说, 光伏发电多采用单位功率因数并网(即功率因数为 1.0), 并网电流和电压同频同相, 因此, 光伏发电系统只发有功, 而不发送无功。在这种情况下, 可以将光伏发电作为 PQ 节点, 在潮流中进行计算。

对于双馈型风力发电系统, 其注入电网的总有

功功率由定子绕组发出的有功功率和转子绕组发出或吸收的有功功率组成; 其无功功率是发电机定子侧从电网吸收或发出的无功功率。通过调节控制策略, 可以使风力发电系统的功率因数恒定, 在本文中取值为 0.95, 因此, 在潮流计算中, 双馈型风力发电系统也可以视为 PQ 节点。

3 实验室系统的潮流计算仿真

3.1 仿真条件

如图 1 所示, 在并网情况下, 将无穷大电源设置为平衡节点, 发电机 F1 和 F2 设置为 PV 节点, 分布式电源和负荷均设置为 PQ 节点。在仿真过程中, 以分布式电源输出功率最大为原则, 负荷 LD1、LD2 的功率因数取 0.85, LD3、LD4 的功率因数取 0.9, LD5 的功率因数取 0.95。

以下将分别就受电模式和送电模式 2 种情况下并网运行、孤岛运行以及联网后断开的潮流情况进行仿真分析。

3.2 并网情况下满载受电模式的仿真

如图 1 所示, 将实验室系统并入电网, 在满负载 25 kW 的情况下运行, 仿真结果如表 1 所示。

表 1 满载受电模式下潮流计算结果

Tab. 1 Result of power flow in full-load received power mode

节点名	有功 发电/kW	无功 发电/kvar	有功 负荷/kW	无功 负荷/kvar	电压 幅值/pu
Bus1	10.53	3.21	0	0	1
DG1	2.00	0	0	0	0.954 01
DG2	3.00	0.99	0	0	0.957 39
F1	5.00	1.99	0	0	1
F2	5.00	1.67	0	0	1.000 01
LD1	0	0	5.00	3.10	0.953 85
LD2	0	0	5.00	3.10	0.957 32
LD3	0	0	5.00	2.42	0.953 95
LD4	0	0	5.00	2.42	0.999 91
LD5	0	0	5.00	1.64	0.961 54

由表 1 可知, 全网总有功功率为 25.53 kW; 负荷的总有功功率为 25 kW, 无功功率为 12.68 kvar。全网中分布式电源(风能、太阳能)总的输出为 5 kW, 2 台发电机输出为 10 kW, 因此需要从电网吸收约 10.53 kW 的有功功率。

分布式发电系统并入电网并没有影响到整个系统的稳态运行, 在负荷满载情况下, 利用分布式电源可以减轻电网的供电负担, 这在目前常规能源日益短缺的情况下, 保证电力的正常供应十分有意义。

3.3 并网情况下送电模式切换到孤岛运行的仿真

当用户对用电量需求较小时,分布式发电系统中输出的电能满足系统中负荷要求后,还可以向大电网输送多余的电能。为了维持系统的独立运行,其负荷的总功率必须低于分布式系统中电源所能够发送出的最大容量。取总负荷 12 kW 为例,仿真结果如表 2 所示。

表 2 送电模式下潮流计算结果

Tab. 2 Result of power flow in sending power mode

节点名	有功 发电/kW	无功 发电/kvar	有功 负荷/kW	无功 负荷/kvar	电压 幅值/pu
Bus1	-2.98	0.63	0	0	1
DG1	2.00	0	0	0	0.981 51
DG2	3.00	0.99	0	0	0.983 90
F1	5.00	0.92	0	0	1
F2	5.00	1.45	0	0	1
LD1	0	0	2.00	1.24	0.970 72
LD2	0	0	2.00	1.24	0.983 86
LD3	0	0	3.00	1.45	0.981 47
LD4	0	0	3.00	1.45	0.999 94
LD5	0	0	2.00	0.68	0.985 80

由表 2 可知,当系统中总的负荷降至 12 kW 时,分布式发电系统中分布式电源总输出有功为 15 kW。除了在系统中线路损耗 0.02 kW 电能后,分布式发电系统中多余的 2.98 kW 电能都向大电网进行了回馈。此时,分布式发电系统不仅可以提供自身系统的用电需要,还可以将多余电能输送到电网,以此来达到系统中负荷的平衡。

在上述并网送电模式下,如果系统联络线突然出现故障,要求分布式系统立即脱离电网孤岛运行,其潮流结果如表 3 所示。

由表 3 的结果可以看出,在并网情况送电模式下,分布式发电系统能从系统中脱离出来,平稳过渡并以孤岛模式进行稳定运行。

对比表 2 和表 3 的结果可以看出,在分布式系

表 3 孤岛运行时潮流计算结果

Tab. 3 Result of power flow in islanded operation

节点名	有功 发电/kW	无功 发电/kvar	有功 负荷/kW	无功 负荷/kvar	电压 幅值/pu
Bus1	0	0	0	0	0.999 99
DG1	2.00	0	0	0	0.981 51
DG2	3.00	0.99	0	0	0.983 89
F1	2.02	1.00	0	0	1
F2	5.00	1.45	0	0	1
LD1	0	0	2.00	1.24	0.970 72
LD2	0	0	2.00	1.24	0.983 68
LD3	0	0	3.00	1.45	0.981 47
LD4	0	0	3.00	1.45	0.999 94
LD5	0	0	2.00	0.68	0.985 80

统由送电模式切换到孤岛运行模式时,由于此时负荷没有变化,因此是通过减少分布式电源的输出来完成的。

3.4 并网情况下受电模式切换到孤岛运行的仿真

分布式发电系统在受电运行模式下,若电网故障导致联络线断开,分布式发电系统将从并网运行过渡到孤岛运行模式。然而,如果系统中负荷较大,分布式电源的输出无法维持与负荷的功率平衡,则需要通过切负荷的策略来维持系统的稳定。为简单起见,以下取负荷为 13 kW,来对并网情况下受电模式切换到孤岛运行进行仿真。表 4 给出了并网情况下受电模式的仿真结果,表 5 则给出了在该模式下联络线断开后分布式系统孤岛运行的仿真结果。

表 4 受电模式下潮流计算结果

Tab. 4 Result of power flow in received power mode

节点名	有功 发电/kW	无功 发电/kvar	有功 负荷/kW	无功 负荷/kvar	电压 幅值/pu
Bus1	1.04	0.37	0	0	1
DG1	2.00	0	0	0	0.978 80
DG2	3.00	0.99	0	0	0.975 11
F1	3.00	1.29	0	0	1
F2	4.00	1.11	0	0	1.000 01
LD1	0	0	2.00	1.24	0.964 82
LD2	0	0	3.00	1.86	0.975 07
LD3	0	0	3.00	1.45	0.978 76
LD4	0	0	3.00	1.45	0.999 95
LD5	0	0	2.00	0.66	0.985 83

表 5 孤岛运行时潮流计算结果

Tab. 5 Result of power flow in islanded operation

节点名	有功 发电/kW	无功 发电/kvar	有功 负荷/kW	无功 负荷/kvar	电压 幅值/pu
Bus1	0	0	0	0	0.999 99
DG1	2.00	0	0	0	0.978 79
DG2	3.00	0.99	0	0	0.975 11
F1	4.04	1.66	0	0	1
F2	4.00	1.11	0	0	1.000 01
LD1	0	0	2.00	1.24	0.964 82
LD2	0	0	3.00	1.86	0.975 07
LD3	0	0	3.00	1.45	0.978 75
LD4	0	0	3.00	1.45	0.999 95
LD5	0	0	2.00	0.66	0.985 83

仿真结果表明,从表 4 所示的并网运行情况切换到表 5 所示的孤岛运行情况下,分布式发电系统中电源的有功和无功输出增加,以此来弥补并网运行前大电网向分布式电源提供的电能,从而达到系统中电能的新平衡。

由于分布式系统的电能输出最大只有 15 kW,因此在受电模式下,其负荷不能超出上述的系统容量,否则,在切换到孤岛运行时必须通过切负荷来完成系统的平衡。

4 结论

1) 分布式发电系统的接入可减轻电网的供电负担, 在电力市场条件下, 将会是集中式供电不可缺少的重要补充。

2) 在系统孤岛运行时, 需要通过增加分布式电源的功率输出或者采取切负荷的策略来实现系统的平衡。

参考文献

- [1] Driesen J, Katiraei F. Design for distributed energy resources[J]. IEEE Power and Energy Magazine, 2008, 6(3): 30-39.
- [2] 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.
Ding Ming, Zhang Yingyuan, Mao Meiqin. Key technologies for microgrids being researched[J]. Power System Technology, 2009, 33(11): 6-11(in Chinese).
- [3] 王成山, 王守相. 分布式发电供能系统若干问题研究[J]. 电力系统自动化, 2008, 32(20): 1-4.
Wang Chengshan, Wang Shouxiang. Study on some key problems related to Distributed generation systems[J]. Automation of Electric Power Systems, 2008, 32(20): 1-4(in Chinese).
- [4] 刘杨华, 吴政球, 涂有庆, 等. 分布式发电及其并网技术综述[J]. 电网技术, 2008, 32(15): 71-76.
Liu Yanghua, Wu Zhengqiu, Tu youqing, et al. A survey on distributed generation and its networking technology[J]. Power System Technology, 2008, 32(15): 71-76(in Chinese).
- [5] 黄伟, 孙昶辉, 吴子平, 等. 含分布式发电系统的微网技术研究综述[J]. 电网技术, 2009, 33(9): 14-18.
Huang Wei, Sun Xuhui, Wu Ziping, et al. A review on microgrid technology containing distributed generation system[J]. Power System Technology, 2009, 33(9): 14-18(in Chinese).
- [6] 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.
Zheng Zhanghua, Ai Qian. Present situation of research on microgrid and its application prospects in China[J]. Power System Technology, 2008, 32(16): 27-31(in Chinese).
- [7] Nikos H, Hiroshi A, Reza I, et al. Microgrids[J]. IEEE Power & Energy Magazine, 2007, 5(4): 78-94.
- [8] Nikkhajoei H, Lasseter R H. Distributed generation interface to the CERTS microgrid[J]. IEEE Trans on Power Delivery, 2009, 24(3): 1598-1608.
- [9] Stevens J, Vollkommer H, Klapp D. CERTS microgrid system tests [C]. 2007 IEEE PES General Meeting, Tampa, Florida, USA, 2007.
- [10] 赵争鸣, 刘建政, 孙晓瑛, 等. 太阳能光伏发电及其应用[M]. 北京: 科学出版社, 2005: 73-79.
- [11] 茆美琴, 余世杰, 苏建徽. 带有 MPPT 功能的光伏阵列 Matlab 通用仿真模型[J]. 系统仿真学报, 2005, 17(5): 1248-1251.
Mao Meiqin, Yu Shijie, Su Jianhui. Versatile Matlab simulation model for photovoltaic array with MPPT function[J]. Journal of System Simulation, 2005, 17(5): 1248-1251(in Chinese).
- [12] 王飞, 余世杰, 苏建徽, 等. 光伏并网发电系统的研究及实现[J]. 太阳能学报, 2005(5): 605-608.
Wang Fei, Yu Shijie, Su Jianhui, et al. Study and realization of photovoltaic grid-connected power system[J]. Acta Energetica Solaris Sinica, 2005(5): 605-608(in Chinese).
- [13] 谢震. 变速恒频双馈风力发电模拟平台的研究[D]. 合肥: 合肥工业大学, 2005.
- [14] 李晶, 宋家骅, 王伟胜. 大型变速恒频风力发电机组建模与仿真[J]. 中国电机工程学报, 2004, 24(6): 100-105.
Li Jing, Song Jiahua, Wang Weisheng. Modeling and dynamic simulation of variable speed wind turbine with large capacity [J]. Proceedings of the CSEE, 2004, 24(6): 100-105(in Chinese).
- [15] 蒋禹, 高雪松. 双馈型变速恒频风力发电系统最大风能追踪控制研究[J]. 电网技术, 2008, 32(2): 260-263.
Jiang Yu, Gao Xuesong. Study on maximum wind energy tracing of doubly-fed VSCF wind-power generation system[J]. Power System Technology, 2008, 32(2): 260-263(in Chinese).
- [16] 闫广新, 晁勤, 刘新刚, 等. 并网型双馈风电机组动态稳定性仿真[J]. 电网技术, 2007, 31(24): 63-67.
Yan Guangxin, Chao Qin, Liu Xingang, et al. Dynamic stability simulation of double-fed wind generator connected into power grid [J]. Power System Technology, 2007, 31(24): 63-67(in Chinese).



吴红斌

收稿日期: 2010-06-24.

作者简介:

吴红斌(1972), 男, 博士, 研究员, 从事分布式发电、电力系统安全性分析的研究和教学工作, E-mail: hfwuhongbin@163.com;

孙辉(1985), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为分布式发电技术的应用。

(编辑 褚晓杰)