

不同风电系统动态电压稳定的分岔分析

许珊珊, 汤放奇, 周任军, 马新惠

(长沙理工大学 电气与信息工程学院, 湖南省 长沙市 410004)

Bifurcation Analysis on Dynamic Voltage Stability of Power Grid Connected With Different Wind Power Systems

XU Shan-shan, TANG Fang-qi, ZHOU Ren-jun, MA Xin-hui

(School of Electrical and Information Engineering, Changsha University of Science and Technology,
Changsha 410004, Hunan Province, China)

ABSTRACT: To research the influences of individual and combined actions of the two parameters, i.e., the injection active power from wind farm and reactive power at load nodes, on dynamic voltage stability of power grid to which one of the two kinds of wind farms consisting of induction generators and doubly fed induction generators (DFIG) respectively are connected, the one-parameter and two-parameter bifurcation analysis on dynamic models corresponding to above-mentioned two kinds of wind power farms, to which dynamic load model are added, is performed under the condition of typical single-machine infinite bus system connected with one of the two wind farms. Analysis results show that the two-parameter bifurcation analysis can reveal the affection of the parameters on system dynamic voltage stability better than one-parameter bifurcation analysis. Under the same system structure and parameters, when the injection active power from the two kinds of wind farms increases, too heavy reactive power load will extremely decrease stability margin of the system; when injection active power keeps constant, the variation of reactive power load does not affect system stability; by means of coordinative operation of injection active power from wind farm with reactive power load to abstain from the condition that reactive power load is heavy while injection active power continuously increases, the whole system can operate at its highest efficiency; stability of the system connected with wind farm consisting of DFIGs is higher than that connected with wind farm consisting of induction generators, and such a system can attain better system stability margin.

KEY WORDS: wind farm consisting of induction generators; wind farm consisting of doubly-fed generators (DFIG); voltage stability; dynamic load model; one-parameter bifurcation; two-

parameter bifurcation; bifurcation analysis

摘要: 为研究接入风电场的电力系统的风电场注入功率和负荷节点无功功率这 2 个参数独立及共同作用对系统动态电压稳定的影响, 针对接入加入动态负荷模型的异步机风电场和双馈机风电场的单机无穷大系统, 分别进行了单参数和双参数分岔分析。分析结果表明, 双参数分岔分析相对单参数分岔分析更能揭示系统参数对电压稳定的影响。同一系统结构和参数下, 2 种系统中当注入功率持续增大时, 无功负荷过重会极大降低系统的稳定裕度; 当注入功率保持恒定时, 无功负荷的变化不影响系统稳定; 通过风电场注入功率与无功负荷的协调运作, 避开注入功率持续增大时无功负荷重载情况, 系统可运行到效率最高; 双馈电机风电系统稳定性高于异步电机风电系统, 且双馈电机风电系统能得到更准确的系统稳定裕度。

关键词: 异步风电系统; 双馈风电系统; 电压稳定; 动态负荷模型; 单参数分岔; 双参数分岔; 分岔分析

0 引言

随着风力发电技术的不断发展, 风电并网对系统的影响范围逐渐扩大。由于风能的随机性和不确定性、异步电机的无功特性、电压控制和措施的缺乏等, 风电的接入会改变系统原有的潮流分布、线路传输功率等^[1], 给接入地区电网的电压稳定性带来不同程度的影响。

目前风电并网的电压稳定研究集中在对静态数学模型的分析(如灵敏度方法^[2]、随机潮流法^[3]、暂态时域仿真分析^[4]等), 缺乏对动态过程的描述。由于电压稳定通常被认为是系统负荷能力问题, 负荷模型是电力系统中对电压稳定影响较大的主要动态元件^[5-6]。因而应计及负荷的动态作用建立动态模型, 对风电场接入系统进行动态仿真。

分岔理论作为动、静态普遍适用的数学分析方

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(70601003)。

Project Supported by National Natural Science Foundation of China (NSFC)(70601003).

法可对非线性电力系统的稳定性进行一定研究。分岔点对应于 $P-V$ (或 $Q-V$) 曲线的拐点, 即为网络可传输的最大传输功率^[7]。目前分析多局限于单参数分岔, 而系统的稳定性是由诸多独立参数相互作用呈现出的复杂动态特性, 仅考虑某一个控制参数的作用会掩盖电压失稳的机理。在风电系统中, 风电场注入功率和无功负荷作为 2 种重要参数对电压稳定的影响并不能完全解耦。选取注入功率和无功负荷为分岔参数进行双分岔参数分析, 能更清晰地得到各参数对动态电压稳定带来的影响程度。

风电系统中, 根据发电机类型可分为异步电机风电机组和双馈电机风电机组^[8-9]。发电机是风力发电系统的核心元件, 对风电系统的运行起决定性作用。由于风力机与发电机的柔性连接, 风力机动态数学模型也可大为化简。因而在风电并网的电压稳定分析中, 考虑基于异步电机和基于双馈电机的 2 种不同风电系统, 能更全面地得到风电场动态特性对并网后系统稳定性的影响。

本文针对异步机风电场和双馈机风电场 2 种不同风电系统, 加入更接近实际且能够描述大扰动下感应电动机动态行为的 *Walve* 综合负荷模型^[10-11]进行动态建模, 应用分岔理论对风电并网的电压稳定进行动态分析。以风电场的注入功率 P_m 、负荷的无功功率 Q_1 为分析参数分别进行单参数分岔分析和双参数分岔分析, 研究不同形式下 P_m 和 Q_1 2 参数对风电接入系统电压稳定与运行的影响。

1 系统与模型

典型的单机无穷大系统接线如图 1^[12]所示。平衡点恒定电压标幺值为 1, 系统至地方接入点的阻抗为 $Z_1=R_1+jX_1$, 风电场经变压器 jX_b 升高电压, 再经输电线路 $Z_2=R_2+jX_2$ 至地方接入点, 地方接入点有负荷 P_1+jQ_1 。

风电场异步发电机选用以暂态电势为变量的 3 阶机电暂态模型^[13-14], 双馈发电机选用忽略电机定子磁链暂态过程的 3 阶动态模型^[15-16], 负荷选用

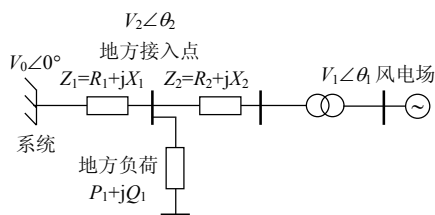


图 1 含风电场的电力系统
Fig. 1 Power system with wind-farm

Walve 模型。考虑所有风力发电机组接于同一母线, 风力发电机组运行于额定转速的理想情况, 并且不考虑尾流效应和地形变化等因素, 风速-功率关系选取见文献^[12]。

将系统各元件模型与网络方程联立可得到描述系统的综合模型, 一般形式^[17]为

$$\dot{x} = f(x, \mu)$$

其中: f 定义了发电机和负荷的动态行为; $x=[E'_d E'_q s u_2 \theta]^T$ 代表状态变量; μ 为控制参数向量。

2 动态电压稳定的结果分析

2.1 2 种风电系统的单参数分岔分析

针对系统建立动态模型, 在电路结构和参数都保持不变的情况下, 采用了分别以风电场注入功率 P_m 、无功负荷 Q_1 为控制参数的 2 种单参数分岔和综合考虑 P_m 、 Q_1 的双参数分岔分析。图 2~3 中的实线与虚线分别表示稳定、不稳定平衡点处 u_2 的数值随着参数变化的情况。曲线拐点 L_P 表示极值点。

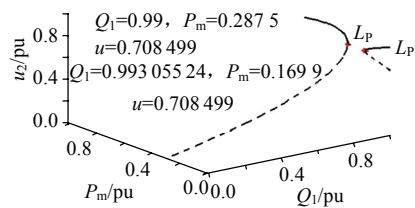


图 2 异步电机风电系统的单参数分岔
Fig. 2 Single-parameter bifurcation with induction generator based wind power system

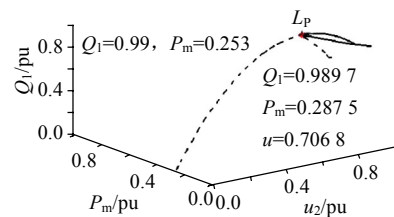


图 3 双馈电机风电系统的单参数分岔
Fig. 3 Single-parameter bifurcation with doubly-fed generator based wind power system

图 2 和 3 中, 左边分岔曲线是以无功负荷 Q_1 为控制参数所得, 右边分岔曲线是以风电场注入功率 P_m 为控制参数所得, 2 种单分岔图形放在同一个空间中进行分析。图 2 中得到 2 个 L_P 分岔点, 当以风电场注入功率 P_m 为控制参数时, 系统从稳定初始点 $Q_1=0.99$ 出发, 随着风电场注入功率的增加, 由于异步电机风场自身的无功特性, 其无功消耗也随之增加, 地方接入点的电压持续下降, 因而系统在 $P_m=0.1699$ 时达到了稳定极限 $u_2=0.708499$, 进

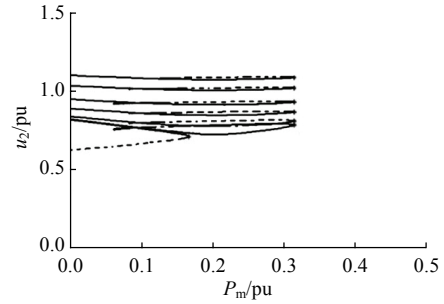
入不稳定区域；当控制参数为负荷无功 Q_1 时，系统从初始点 $P_m=0.2875$ 出发，随着 Q_1 的不断增大，系统能在 $Q_1=0.993\ 055\ 24$ 时达到稳定极限 $u_2=0.7085$ ，说明风电场注入功率持续增加对系统电压失稳的影响大于负荷无功持续增加对系统电压失稳的影响，使得风电场注入功率的稳定裕度明显降低。图3中随着各自控制参数的变化2个 L_P 分岔点趋于重合，系统在近似 $u_2=0.7$ 到达临界状态。从2图比较可得出，采用同种单分岔形式，双馈电机风电场所得的注入功率稳定裕度比较一致。

2.2 2种风电系统的双参数分岔分析

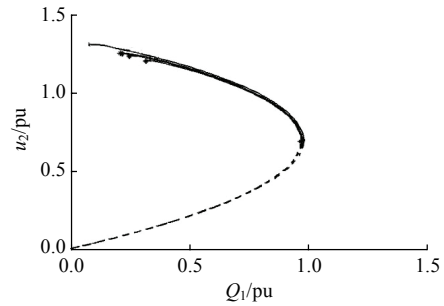
2.2.1 异步电机风电系统的双参数分岔分析

图4(a)为负荷无功 Q_1 分别取0.7、0.8、0.9、0.95、0.98、0.989、0.99时地方接入点电压 u_2 随风电场注入功率 P_m 变化而发生的分岔情况(即为第1种双参数分岔)。无论 Q_1 在0.7~0.989范围内取何值，分岔图形的实线部分(即稳定运行区域内)呈小幅度凹形，表明地方接入点电压 u_2 随着注入的有功功率 P_m 的持续增大，异步电机风电场的无功消耗也在增大。系统总的无功需求增加，地方接入点的电压单调下降，当异步电机机端的无功补偿加入后电压水平又有所提升，其中 $Q_1=0.989$ 时电压变化轨迹最为明显。同时，图中前6条分岔曲线拐点的横坐标一致，近似有相同的系统风电场最大注入功率0.3178，随着选取的初始点 Q_1 数值增大，各曲线 L_P 点的纵坐标数值单调下降，表明初始点无功负荷越大，系统的无功缺失越大，电压临界点越小。当 $Q_1=0.99$ 时的分岔曲线显然不同，从表1的各分岔点数值可以得到，此时系统在 $P_m=0.1654$ 处到达极限点，进入不稳定部分。风电场注入稳定功率裕度有明显下降，说明此时初始值选取 $Q_1=0.99$ ，系线路的无功已经不平衡，随着控制参数 P_m 变化，风电场无功补偿不足以抵消随之带来的风电场无功消耗增大对电压的影响，系统无功缺失急剧恶化，电压持续下降，系统仅运行到 $P_m=0.1654$ 时电压就到达临界点，如果 P_m 继续增大，系统电压就会失去稳定或发生崩溃。

图4(b)为 P_m 分别为0.05、0.1、0.2、0.2875、0.3时地方接入点电压 u_2 随无功负荷 Q_1 变化而发生的分岔情况。从图4和表2可得出，无论 P_m 在0.05~0.3内如何取值，分岔图形均相似，且分岔点 L_P 的坐标近似重合，当 P_m 的各初试值选定后，则



(a) 第1种双参数分岔图形



(b) 第2种双参数分岔图形

图4 异步电机风电系统2种双参数分岔图形

Fig. 4 Two-type graph of two-parameter bifurcation in wind farm system with induction generator

表1 异步电机的第1种双参数分岔点数值

Tab. 1 Numerical of the first two-parameter bifurcation with induction generators

无功负荷 Q_1 /pu	控制参数 P_m /pu	地方接入点 u_2 /pu
0.700	0.317 90	1.083 0
0.800	0.317 80	1.016 0
0.900	0.317 95	0.926 8
0.950	0.317 90	0.863 2
0.980	0.317 70	0.806 7
0.989	0.317 80	0.779 1
0.990	0.165 40	0.697 8

表2 异步电机的第2种双参数分岔点数值

Tab. 2 Numerical of the second two-parameter bifurcation with induction generators

注入功率 P_m /pu	控制参数 Q_1 /pu	地方接入点 u_2 /pu
0.050 0	0.993 1	0.708 5
0.100 0	0.989 3	0.706 6
0.200 0	0.994 6	0.709 2
0.287 5	0.995 1	0.709 5
0.300 0	1.002 0	0.712 6

风电场的有功输出和无功消耗为确定值，随着无功负荷 Q_1 的增大，地方接入点的电压临界值均为 $u_2=0.7$ 左右。当风电场无功消耗确定不变后，无功负荷的持续增大对风电系统电压稳定域带来的影响并不大。

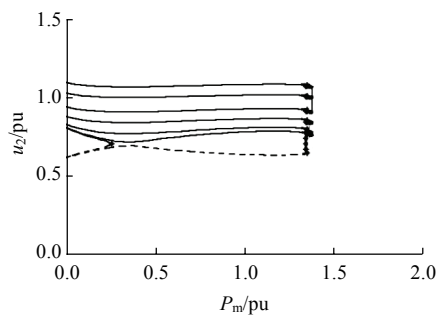
分析可得，在实际风电系统中，可能由于风速的急剧变大，使风电场注入功率持续陡增，此时应选择地方接入点负荷处于无功轻载的工况。否则会由于风电场注入有功功率极值的急剧减小，而使整

个系统迅速进入临界状态，将负荷无功调整在轻载状态，有利于风电注入有功功率的临界值变大，使系统稳定运行的裕度得到大的改善。若在风速随机变化的情况下，通过控制装置将风电场的注入功率保持定值不变，地方接入点无功负荷无论怎样变化，系统的稳定裕度不受影响，电压临界值不变。

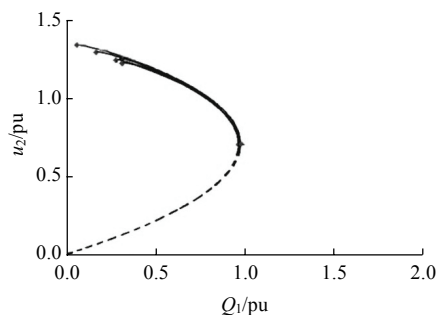
2.2.2 双馈电机风电系统的双参数分岔分析

图 5 为采用同样控制参数和数值对双馈电机风电系统模型而进行的 2 种双分岔分析，其分岔图形结构与图 4 相似。图 5(a) 中地方接入点电压 u_2 随着风电场注入功率的增大有所下降，双馈发电机启动变流器控制无功功率的输出，系统无功功率得到平衡，电压 u_2 在较短过程中运行在初始水平，其变化轨迹为 $Q_1=0.989$ 时最明显。当 Q_1 取 0.7、0.8、0.9、0.95、0.98 时，系统发生极值分岔点的横坐标均在 1.36 左右，随着 P_m 的继续增长，系统地方接入点电压进入小振荡不稳定区域；当 Q_1 为 0.989 时，分岔图形的拐点处出现多个 L_P 点；当 $Q_1=0.99$ 时，分岔极值点坐标急速变化为一个 L_P 点，当系统运行在 $P_m=0.253$ 时，系统就到达临界点。图 5(b) 中在 P_m 取 0.3、0.2875、0.2、0.1、0.05 不同参数下，系统发生的极值分岔点几乎重合。表 3、4 分别为双馈风机第 1 种、第 2 种双参数分岔点数值。

比较各表可得，同一系统和参数下的分岔分析，



(a) 第 1 种双参数分岔图形



(b) 第 2 种双参数分岔图形

图 5 双馈电机风电系统 2 种分岔分析

Fig. 5 Two type of bifurcation in doubly-fed generator wind farm system

表 3 双馈电机的第 1 种双参数分岔点数值

Tab. 3 Numerical of the first two-parameter bifurcation with doubly-fed generators

无功负荷 Q_1 /pu	控制参数 P_m /pu	地方接入点 u_2 /pu
0.700	1.362	1.079 0
0.800	1.363	1.012 0
0.900	1.363	0.922 5
0.950	1.363	0.857 8
0.980	1.363	0.798 0
0.989	1.358	0.774 5
0.990	0.253	0.696 6

表 4 双馈电机的第 2 种双参数分岔点数值

Tab. 4 Numerical of the second two-parameter bifurcation with doubly-fed generators

注入功率 P_m /pu	控制参数 Q_1 /pu	地方接入点 u_2 /pu
0.050 0	1.002 3	0.712 9
0.100 0	0.997 3	0.710 6
0.200 0	0.991 7	0.706 5
0.287 5	0.989 7	0.796 8
0.300 0	0.989 5	0.707 8

基于双馈电机风电模型所得到的控制参数 P_m 的临界值普遍大于基于异步电机风电模型所得到的临界值。

3 结论

1) 在风电系统中，风电场注入功率与无功负荷 2 参数不仅对风电系统的电压稳定性有影响，且 2 者相互耦合影响风电系统的裕度和电压稳定。在风电系统动态电压稳定分析中，应克服以单参数进行分析的局限性，综合考虑各种参数对系统的影响。

2) 风电系统外部条件保持一致的情况下，当控制参数为风电场注入功率时，地方接入点的负荷无功较大，2 种风电系统的稳定裕度都有急速下降的现象。说明在实际运行时当风电场注入功率持续增大时，应避免地方接入点负荷无功重载，否则会导致系统急速进入不稳定状态或电压快速崩溃。当控制参数为地方接入点负荷无功时，无论怎样变化，2 种风电系统的稳定裕度几乎不变。在实际风电系统中应多选用风电场的注入功率保持恒定的运行状态，此时无功负荷的扰动对系统裕度和电压稳定的影响不大，有利于风电系统安全、稳定、可靠运行。

3) 风电系统各种形式下的运行，最理想的状态是同时得到最大的风电场注入功率裕度和地方接入点负荷无功裕度。可看出表 4 中 $Q_1=0.989$ ， $P_m=1.358$ 的极限点所得到的 2 种临界值最大，在实际风电系统中当 P_m 为持续增大状态时，由于负荷

无功 Q_1 的取值可能会引起系统稳定裕度的急剧减小, 所以运行状态不可靠, 但若通过对负荷无功 Q_1 的调整为合适范围, 不仅可避免此种运行模式下的缺陷, 还可使系统得到最大的运行裕度。

4) 将 2 种不同发电机模型的风电系统得到的单、双参数分岔图形结构和分岔点数值进行比较, 能够判断出与异步电机风电机组相比, 基于双馈电机的风电系统模型不但更有利于得到精确的系统实际稳定裕度, 且提高了系统的稳定性。

参考文献

- [1] 迟永宁, 王伟胜, 刘燕华, 等. 大型风电场对电力系统暂态稳定性的影响[J]. 电力系统自动化, 2006, 30(15): 10-14.
Chi Yongning, Wang Weisheng, Liu Yanhua, et al. Impact of large scale wind farm integration on power system transient stability [J]. Automation of Electric Power Systems, 2006, 30(15): 10-14(in Chinese).
- [2] 潘文霞. 大型风电场电压稳定性分析与控制研究[D]. 南京: 河海大学, 2004.
- [3] 王成山, 郑海峰, 谢莹华, 等. 计及分布式发电的配电系统随机潮流计算[J]. 电力系统自动化, 2005, 29(24): 39-44.
Wang Chengshan, Zheng Haifeng, Xie Yinghua, et al. Probabilistic power flow containing distributed generation in distribution system [J]. Automation of Electric Power Systems, 2005, 29(24): 39-44(in Chinese).
- [4] Rodriguez J M, Fernandez J L, Beato D, et al. Incidence on power system dynamics of high penetration of fixed speed and doubly fed wind energy systems: study of the Spanish case[J]. IEEE Trans on Power Systems, 2002, 17(4): 1089-1095.
- [5] 贺仁睦. 电力系统动态仿真准确度的探究[J]. 电网技术, 2000, 24(12): 1-4.
He Renmu. Research into veracity of power system dynamic simulation [J]. Power System Technology, 2000, 24(12): 1-4(in Chinese).
- [6] Kosterev D N, Taylor C W, Mittelstadt W A. Model validation for the August 10, 1996 WSCC system outage[J]. IEEE Trans on Power Systems, 1999, 14(3): 967-979.
- [7] 王建, 刘永强, 吴捷. 分岔方法及其在电力系统中的应用[J]. 电力系统及其自动化学报, 2001, 13(1): 1-6.
Wang Jian, Liu Yongqiang, Wu Jie. Bifurcation method and its application in power system[J]. Proceedings of the CSU-EPSA, 2001, 13(1): 1-6(in Chinese).
- [8] Salman S K, Ibrahim M R. Investigating the impact of embedded generation on relay setting of utilities' electrical feeders[J]. IEEE Trans on Power Systems, 2001, 16(2): 246-251.
- [9] Akhmatov V. Analysis of dynamic behaviour of electric power systems with large amount of wind power[D]. Denmark: Technical University of Denmark, 2003.
- [10] Pal M A, Sauer P W, Lesicutre B C. Static and dynamic nonlinear loads and structural stability in power systems[J]. IEEE Trans, 1995, 83(11): 1562-1572.
- [11] 刘韶峰, 高金峰, 李鹏. 基于 Walve 负荷模型的励磁系统多参数分岔分析[J]. 中国电机工程学报, 2004, 24(12): 58-62.
Liu Shaofeng, Gao Jinfeng, Li Peng. Multi-parameter bifurcation analysis of excitation system with the Walve aggregated load model [J]. Proceedings of the CSEE, 2004, 24(12): 58-62(in Chinese).
- [12] Saad-Saoud Z, Jenkins N. Models for predicting flicker induced by large wind turbines[J]. IEEE Trans on Energy Conversion, 1999(14): 743-748.
- [13] Cidras J O A E. Modeling of wind farms in the load flow analysis[J]. IEEE Trans on Power Systems, 2000, 15(1): 10-115.
- [14] 吴学光, 张学成, 印永华, 等. 异步风力发电系统动态稳定性分析的数学模型及其应用[J]. 电网技术, 1998, 22(6): 68-72.
Wu Xueguang, Zhang Xuecheng, Yin Yonghua, et al. Application of models of the wind turbine induction generators (WTGs) to wind power system dynamic stability analysis[J]. Power System Technology, 1998, 22(6): 68-72(in Chinese).
- [15] 李晶, 宋家骅, 王伟胜. 大型变速恒频风力发电机建模与仿真[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]. Proceeding of the CSEE, 2004, 24(6): 100-105(in Chinese).
- [16] Ioannides M G. Doubly fed induction machine state variable model and dynamic response[J]. IEEE Trans on Energy Conversion, 1991, 16(1): 55-61.
- [17] 张强, 王宝华. 基于规范形的电力系统静态分岔分析[J]. 电力自动化设备, 2003, 23(10): 17-20.
Zhang Qiang, Wang Baohua. Analysis of static bifurcation in electric power system based on normal form[J]. Electric Power Automation Equipment, 2003, 23(10): 17-20(in Chinese).



许珊珊

收稿日期: 2009-09-28。

作者简介:

许珊珊(1983—), 女, 硕士研究生, 从事电力系统运行及其优化方法的研究, E-mail: xss1202@126.com;

汤放奇(1953—), 女, 教授, 从事电力系统控制、运行等研究;

周任军(1964—), 女, 博士, 教授, 从事电力系统控制、运行及优化等研究。

(责任编辑 王晔)