

风电接入对系统频率影响及风电调频技术综述

谷俊和¹, 刘建平¹, 江浩²

(1. 中国电力投资集团公司, 北京 100033; 2. 清华大学电机工程与应用电子技术系, 北京 100084)

Literature Review on the Influence of Wind Power on System Frequency and Frequency Regulation Technologies of Wind Power

GU Junhe¹, LIU Jianping¹, JIANG Hao²

(1. China Power Investment Corporation, Beijing 100033, China; 2. Department of Electrical Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

摘要: 随着电力系统中风电接入比例的不断提高, 风电接入对电力系统的影响日益凸显。风电的一个典型特点是风能具有随机性和间歇性, 这会导致风电本身出力的波动性, 进而对电力系统的频率造成影响。本文从风电本身的波动性及风力发电设备的特殊性两方面, 对已有研究进行综述, 阐述风电接入对电力系统频率的影响。在此基础上, 对风机参与系统调频(主要是一次调频和二次调频)的具体方法进行了综述。

关键词: 风电; 频率; 频率控制; 一次调频; 二次调频

Abstract: Renewable energy, especially wind energy, has developed rapidly in recent years, which will substitute the conventional fossil fuel energy. The impacts of wind power on power system become more and more evident with the increasing percentage of wind power in power systems. The stochastic and intermittent properties of wind energy cause the wind power fluctuation, which further impact system frequency. In this paper, the current research on the impacts of wind power on power systems are reviewed from following two aspects, the fluctuation of wind power and the particularity of equipments of wind generation. Based on this, the detail approaches for regulating system frequency, mainly primary and secondary frequency regulation, are concluded.

Keywords: wind power; frequency; frequency control; primary frequency regulation; secondary frequency regulation

基金项目: 国家高技术研究发展计划项目(863计划)(2012AA050218, 2014AA051901); 国家自然科学基金(51207077, 51261130472); 中国-丹麦可再生能源发展项目(2014DFG62670)

0 引言

传统能源经过人类社会长久的开发和利用, 目前存在两方面的危机。其一是其储量日渐枯竭。如果不能及时建立新的能源体系, 严重的能源短缺将导致全球经济出现大幅度萎缩, 进而引发全球范围的经济危机, 甚至演变为抢占剩余化石能源的战争。其二是传统化石能源的利用所引发的环境问题。传统化石能源在燃烧时释放的氮氧化物、硫化物等均会对环境造成威胁——具体包括局部影响(土地、水源污染)、地区性影响(酸雨)以及全球性影响(温室效应)等^[1]。传统能源所导致的环境问题在我国尤为突出, 其原因是我国目前的能源结构以煤炭为主体, 而燃煤所产生的大气污染和酸沉降对环境会造成十分显著的破坏。为解决上述两方面的危机, 需要摆脱对传统化石能源的过度依赖, 建立以可再生能源为核心的新的能源体系^[2]。

在各种能源形式中, 电能有其天然的优势, 包括易于生产和输送, 使用方便, 应用广泛等。因此, 充分利用可再生能源替代传统化石能源进行发电, 是建立以可再生能源为核心的新的能源体系中最关键的一步。在现有的多种用于发电的可再生能源中, 风能发电最近几年在全世界范围得到了空前的发展^[3]。而近年来, 我国的风电并网发电的装机更是以超过100%的速度飞速增长, 成为了世界范围内风电并网发电容量增长最快的国家之一。截至2011年, 我国风电累计装机容量已跃居世界首位^[4]。随着风电规模的不断扩大, 风电对系统的影响也日益凸显。由于风能的随机性, 导致风电出力

具有波动性, 在风电接入比例较高时, 会对系统频率产生影响。与此同时, 目前风机一般采用最大功率点跟踪(MPPT)的控制方式, 无法参与系统频率控制。研究风电接入对系统频率的影响, 以及如何利用风机参与系统频率控制, 对大规模风电接入的电力系统来说至关重要。因此, 本文对现有研究中风机接入对系统频率的影响, 以及风机参与系统调频的控制技术进行文献综述。

1 风电接入对系统频率的影响

电力系统的一个重要特点是电能不能大量存储, 因此需要保证系统中发电与用电的实时平衡。相较于传统的火电/水电/核电等机组, 风电的输出功率随风速的变化而波动, 其随机性较强。随着风电接入比例的增加, 风电功率的剧烈波动必然会影响到系统频率。与此同时, 由于风力发电设备大量应用电力电子器件, 与传统的同步发电机有较大区别。综合考虑风电波动性和风机结构特殊性, 进而研究风电接入对系统频率的影响, 是国内外学术界关注的一个重点。

1.1 风电波动性对系统频率的影响

文献 [5] 以时间区间长度为标准, 将风电波动性分为 3 类, 并分别讨论其对系统频率的影响: 第一类是秒级到分钟级的波动, 这些波动主要影响系统的一次调频(Primary Frequency Control); 第二类是分钟级到小时级的波动, 这些波动主要影响系统的二次调频(Secondary Frequency Control); 第三类是小时级到天级的波动, 这些波动主要影响系统的发电计划(Daily Scheduling)和机组组合(Unit Commitment), 需要结合短期风速预测合理安排机组启停, 以保证系统具有充足的备用容量。文献 [6] 则在根据风电场的实测风电数据, 分析了风速以及风功率输出的频谱特性, 并利用扫频的方法求得电力系统频率对功率波动的频率响应特性。根据风功率输出的频谱, 结合电力系统频率对功率波动的频率响应特性, 得出如下结论: 高频的风功率波动对系统频率的影响会被电力系统的自身惯性所衰减; 而低频的风功率波动则可以通过 AGC 抑制其对系统的影响; 对系统频率影响最为显著的是中频的风功率波动(0.2~10Hz)。文献 [7] 利用文献 [6] 的结论, 考虑系统频率偏差不能超过额定频率 1% 的约束条件, 发现由于风速的

功率波动大多都是高频的波动, 即使风电的穿越比例达到了 27.6%, 系统频率的波动也不会超过额定频率的 1%。文献 [8] 则在文献 [6] 的基础上, 具体讨论了风电场不同控制策略对系统频率的影响, 发现若采用最大功率追踪的运行方式, 则风机自身的稳定性较好(不易发生失速), 但对系统频率的影响也较大; 而若采用恒转矩的控制方式, 则可以减小对系统频率的影响, 但风机转子的速度波动较大。

为研究变速恒频机组风电场的功率波动对电网节点频率的影响, 文献 [9] 对过去仅采用稳态模型和发电机转速进行频率偏差评估的方法进行了改进, 提出了综合考虑直流潮流, 发电机及其调速器的动态的节点动态频率定义评估模型。文献 [10] 则基于文献 [9] 的模型, 评估了并网风电对主要负荷或传输节点频率造成的影响, 评估中考虑了网络结构及发电机和调速器的动态特性等因素, 能够适用于多风电输入及多节点频率输出的评估。

1.2 风电机组结构特点对系统频率的影响

与传统的同步发电机不同, 风力发电机组中广泛采用了电力电子装置。按照风力发电机组结构以及控制方法的不同, 一般可将风力发电机组分为以下 4 种^[11]: 恒速恒频异步风机(Type 1 型)、变转子电阻型异步风机(Type 2 型)、双馈异步风机(Type 3 型, Doubly Fed Induction Generator, DFIG)和永磁同步风机(Type 4 型, Permanent Magnet Synchronous Generator, PMSG)。与传统的同步电机相比, Type 1 和 Type 2 型风机的惯量较小, 同时由于机组为异步机, 与电网耦合较弱, 因此在系统频率发生扰动时, 其所能提供的有功支撑幅度较小, 且响应较慢。而目前得到广泛应用的 Type 3 和 Type 4 型风机, 由于采用了电力电子装置与电网进行连接, 可以实现有功-无功解耦控制, 但其在系统频率发生扰动时, 无法向系统提供有功支撑。文献 [12] 和文献 [13] 以爱尔兰电网为例, 分析了随着恒速恒频异步风机和 DFIG 接入比例的增加, 会导致扰动后系统频率最低点(Frequency Nadir)降低, 同时系统初始频率变化率(Rate Of Change of Frequency, ROCOF)也会增加。DFIG 对频率最低点的影响要明显大于恒速风机, 但二者对 ROCOF 的影响几乎没有差别, 都无法及时提供有功支撑。文献 [14] 利用考虑备用容量的调度模型, 研究了爱尔兰电网在不同风电接入

比例以及不同 HVDC 交换功率下, 系统 ROCOF 以及频率最低点的变化情况。结论是风电接入比例的增加对系统的频率控制提出了更高的要求。文献 [15] 则考虑了风电接入对系统惯量的影响, 分析了系统惯量的累积分布函数, 以及系统惯量在一年中的变化情况。发现随着风电接入比例的增加, 系统惯量明显降低, 同时在系统发生扰动时, ROCOF 会越过安全阈值。

1.3 小结

由以上两部分的分析可知, 风电接入比例增加会对系统频率产生显著影响。从风能本身的波动性方面来说, 对系统频率影响最为显著的是其中的中频波动分量(0.2~10Hz)。从风机结构方面来说, 由于 Type 3 和 Type 4 风机采用电力电子装置, 与电网耦合特性较弱。随着风电接入比例的增加, 会显著地影响系统惯性, 进而影响系统频率最低值。因此, 需要考虑如何利用风机自身参与系统调频, 以解决风电接入后系统的频率问题。

2 风电参与调频控制技术

电力系统的频率是电力系统运行的重要参数。保证频率位于额定值附近, 防止频率的剧烈变化, 是电力系统正常运行的重要条件。根据时间尺度和控制目标的不同, 一般把频率控制分为一次调频、二次调频和三次调频。其中, 一次调频和频率稳定密切相关, 二次调频在于消除频率偏差, 而三次调频主要关注的系统的经济运行。本文主要介绍风电参与一次和二次调频的研究情况。

2.1 风机参与一次调频控制技术

Type 3 型风机(DFIG)与 Type 1 和 Type 2 型风机相比, 由于采用了电力电子装置和解耦控制技术, 具有调速范围更广, 控制更为灵活的特点。而与 Type 4 型风机相比, 由于变流器容量只有风机容量的三分之一左右, 成本相对较低。因此 Type 3 型风机目前得到了广泛应用。但 DFIG 一般采用的是 MPPT 控制, 在无附加控制的情况下, 无法根据系统频率变化提供有功支撑。如何合理地设计附加控制利用 DFIG 参与系统调频, 是目前国内外的研究热点之一。根据反馈信号以及控制器的不同, 可将 DFIG 参与一次调频的附加控制器分为惯性控制、下垂控制(或称比例控制)以及阶跃控制, 下文将分别进行讨论。

2.1.1 惯性控制

传统的同步发电机组在系统频率下降时, 其转速也会下降, 因此可以释放一部分动能对系统进行有功支撑。Jenkins 等在文献 [15] 中提出了双馈风机的惯性控制器, 其中控制器的反馈信号为频率变化率 df/dt , 如图 1 所示。由于该信号模拟的是传统同步电机的惯性, 因此称为惯性控制。迟永宁等在文献 [16] 中分别对双馈风机中的惯性控制在电网频率下降和频率上升情况下进行的仿真分析, 仿真结果表明惯性控制可以有效地改善系统最低/最高点的频率值。Milanovic 等在文献 [17] 中指出, 如果采用附加转矩的惯性控制, 有可能造成风机转子出现失速而导致风机失稳, 文中也 compares 附加功率和附加转矩控制对系统频率响应的影响, 其结论是附加转矩控制对频率最低点的提升效果要优于附加功率控制。Gómez-Expósito 等在文献 [18] 中提出了风机与传统机组相协调的频率控制方法, 同时考虑了风机转子转速的限制, 并比较了单独采用风机惯性控制与风机与传统机组协调控制的控制效果。

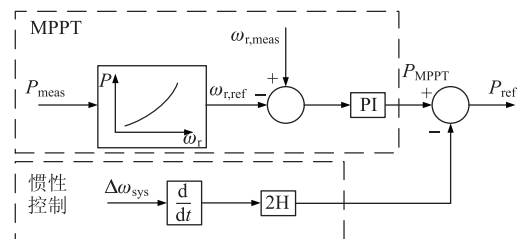


图 1 惯性控制示意图

2.1.2 下垂控制(比例控制)

下垂控制借鉴的是传统同步电机中的调速器的控制思想, 以系统频率偏差 df 作为反馈信号, 经过比例放大等环节, 从而产生功率或转矩附加控制信号, 如图 2 所示。Lopes 等在文献 [19] 中提出了风机的下垂控制器, 若风机在高风速时参与调频, 则还可以通过调整桨距角以增加风机输入的机械功率, 从而减小风机转子转速的下降。文献 [20] 则根据风速的不同, 分别对低、中、高 3 种风速下的风机控制模式进行了探讨, 同时采用的是与风机当前减载量相关的自适应下垂控制。孙元章等在文献 [21] 中同样对 3 种不同区间风速下风机参与调频进行了讨论, 并根据风速的不同提出了超速与变桨相互协调的频率控制方法。

由于反馈信号的不同, 惯性控制和下垂控制各

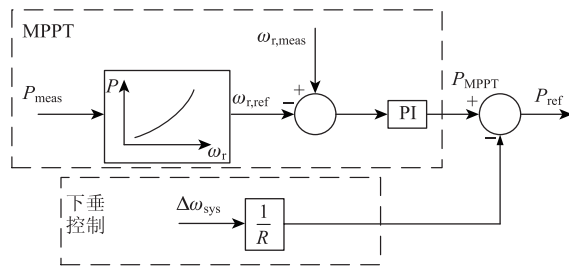


图 2 下垂控制(比例控制)示意图

有优劣。惯性控制的反馈信号是频率变化率，因此其在扰动发生的初始时刻可以提供较大的有功支撑。而与惯性控制相比，下垂控制附加信号与频率偏差相关，因此其能在频率最低点附近进行较强支撑，但控制速度比惯性控制慢。很多文献将二者结合起来以设计风机调频控制器。Ferreira 等在文献 [22] 中设计了惯性控制和下垂控制共同作用的风机调频控制器。邱家驹等在文献 [23] 中提出了与文献 [18] 相类似的风机与传统机组协调控制的方法，其中风机采用的是惯性控制和下垂控制相结合的控制。吴政球等在文献 [24] 中，比较了惯性控制和比例控制在控制效果和对风机转子转速影响的区别，提出了根据风机工作状态切换惯性控制和比例控制具体策略以避免风机转子失速。文献 [25] 则指出，若在两种控制相结合的控制中采用固定的下垂系数，可能会造成转子失速，在此基础上给出了基于当前风机备用容量和当前风速的自适应下垂系数调整方法。文献 [26] 中在设计控制器时考虑了风机的初始运行点，以及风机出力变化率的限制，并比较了不同出力变化率限值对风机调频控制效果的影响。

2.1.3 阶跃控制

以上两种控制仍然借鉴的是传统同步电机控制的思路。事实上，由于 DFIG 采用了电力电子装置，可以在短时间内增加输出功率至允许输出功率的上限。由于该类型控制器在系统频率变化时，会瞬间增加风机的功率输出，因此又称阶跃控制。与前两种控制方法相比，该控制器可以使风机在最短时间内将功率出力值提升至上限。

Ullah 等在文献 [27] 中分析了不同风速情况下风机的功率支撑能力，结论是风机在任何风速下都能提供时长为 10s，幅值为 0.1p. u. 的功率支撑，并根据这一结论设计了风机调频阶跃控制器，仿真含风电的 Hydro-Québec 系统，证明了该控制策略

的有效性。Ooi 等在文献 [28] 中考虑了阶跃调频控制器对风机转子转速的影响，避免由于风机提供功率支撑而造成的转子失速。为了避免风机同时降低有功输出对电网产生二次冲击，阶跃调频控制器并不是在频率恢复后瞬间减小风机的有功出力，而是将功率在 30s 内由最大允许输出值 P_{max} 逐渐减小至 MPPT 的功率值。文中的仿真算例为水电和风电组成的小系统，通过仿真还发现若风电功率支撑太快太强，会造成水电机组调速器动作幅度过小，反而会对频率控制产生不利影响。文献 [29] 中为解决阶跃控制导致的风电机组同时降低出力从而对电网产生的二次冲击问题，以风电场提供最大的有功出力为目标，同时考虑风电机组退出运行时的约束，设计了风电场内风电机组时序协同控制策略。

需要注意的是，阶跃控制能使风电机组在短时间内提供大量有功支撑，但同时会造成风机转速的迅速下降，从而导致转子失速；此外，若控制策略不当，在电网频率恢复时风电机组集体退出调频也会对电网造成二次冲击。如何协调各风电机组之间甚至各风电场之间的控制策略，仍然有待进一步的研究。

2.2 风机参与二次调频控制技术

在风电发展的初期，由于其总容量不大，因此一般将风电作为“负”的负荷出力，其波动性完全依靠系统中传统机组的调节作用(主要是热备用)进行平抑。然而随着风电接入功率的增加，单独依靠传统机组的调节作用将无法完全平抑风电的功率波动，因此要求风电场也能接收系统 AGC 指令，参与系统的二次调频。

由于风机一般运行在 MPPT 模式，因此在二次调频中风机一般只具备向下调节的能力。与一次调频有所不同，二次调频需要长时间的功率输出。因此如果想发挥风机上调的能力，则需要风机工作在减载运行(Deloding)的状态。对 Type 3 型风机而言，目前减载的主要方法包括超速法和变桨法^[21]，二者分别通过调整转子转速和桨距角达到减载的目的，其对比如表 1 所示。

表 1 风机参与二次调频的超速法和变桨法比较

比较内容	超速法	变桨法
调整物理量	转子转速	叶片桨距角
调整速度	快	慢
适用范围	中低风速	所有风速

文献 [30] 中考虑如何使风电场的有功和无功出力最大化地匹配电网调度员下发的有功和无功指令。文献 [31] 考虑了不同风速下风机的控制策略, 使风机能像传统机组一样, 接受 AGC 系统的调度指令, 参与系统二次调频。然而需要指出的是, 对大型互联电网而言, 由于备用容量一般较为充足, 同时考虑到风机参与二次调频需要进行减载, 不利于经济运行以及受风速影响, 风电场可信容量一般较低。因此, 在一般情况下并不需要全部风机均参与二次调频。然而对于风电接入比例较高的电力系统, 需要考虑进行风电功率平滑控制及适当进行风电减载运行, 以减轻系统的调频压力。

3 总结与展望

随着电力系统中风电接入比例的不断增加, 风电对电力系统的影响也日益凸显。本文主要总结了两方面内容, 即风电接入对电力系统频率的影响, 以及如何设计附加控制器使风机参与系统调频, 主要是一次调频和二次调频。前者是风电接入给电力系统带来的问题, 而后者则是利用风机本身对该问题加以解决。相信随着风电技术的不断发展, 电力系统可接纳的可再生能源的比例会越来越高, 能源问题也会得到相对完善的解决。

参 考 文 献

- [1] 霍雅勒. 化石能源的环境影响及其政策选择 [J]. 中国能源, 2000, 23(5): 17-21.
- [2] 江泽民. 对中国能源问题的思考 [J]. 上海交通大学学报, 2008, 42(3): 345-359.
- [3] World Wind Energy Association. World Wind Energy Report 2010 [EB/OL]. [2011-04-08]. http://www.wwindea.org/home/images/stories/pdfs/worldwindenergyreport2010_c.pdf.
- [4] 李俊峰. 2012 中国风电发展报告 [R]. 北京: 中国环境科学出版社, 2013.
- [5] Parsons B, Milligan M, Zavadil B. Grid impacts of wind power: a summary of recent studies in the United States [J]. Wind Energy, 2004, 7(2): 87-108.
- [6] Banakar H, Luo C L, Ooi B T. Impacts of wind power minute-to-minute variations on power system operation [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2008, 23(1): 150-160.
- [7] Luo C L, Far H G, Banakar H. Estimation of wind penetration as limited by frequency deviation [J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2007, 22(3): 783-791.
- [8] Luo C L, Far H G, Banakar H. Strategies to smooth wind power fluctuations of wind turbine generator [J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2007, 22(2): 341-349.
- [9] Lin J, Li G J, Sun Y Z. A dynamic model to evaluate the node frequency deviation caused by wind power fluctuation [C]. Proceedings of International Conference on UHV Transmission. Beijing: 2009.
- [10] 林今, 孙元章, 李国杰, 黎雄. 采用变速恒频机组的风电场有功功率波动对系统节点频率影响的动态评估模型 [J]. 电力系统自动化, 2010, 30(2): 14-18.
- [11] Akhmatov V. Analysis of dynamic behaviour of electric power systems with large amount of wind power [D]. Denmark: DTU. 2003.
- [12] Lalor G, Mullane A, O' Malley M. Frequency control and wind turbine technologies [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2005, 20(4): 1905-1913.
- [13] Doherty R, Mullane A, Nolan G. An assessment of the impact of wind generation on system frequency control [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2010, 25(1): 452-460.
- [14] Ruttledge L, Miller N W, O' Sullivan J, Flynn D. Frequency response of power systems with variable speed wind turbines [J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2012, 4(3): 683-691.
- [15] Ekanayake J, Jenkins N. Comparison of the response of doubly fed and fixed-speed induction generator wind turbines to changes in network frequency [J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2004, 19(4): 800-802.
- [16] 关宏亮, 迟永宁, 王伟胜, 等. 双馈变速风电机组频率控制的仿真研究 [J]. 电力系统自动化, 2007, 31(7): 61-65.
- [17] Kayikci M, Milanović J V. Dynamic contribution of DFIG-based wind plants to system frequency disturbances [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2009, 24(2): 859-867.
- [18] Mauricio J M, Marano A, Gómez-Expósito A, et al. Frequency regulation contribution through variable-speed wind energy conversion systems [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2009, 24(1): 173-180.

- [19] Almeida R G, Lopes J A. Participation of doubly fed induction wind generators in system frequency regulation [J]. *IEEE Transactions on Power Systems*, 2007, 22(3): 944 - 950.
- [20] Chang-Chien L R, Lin W T, Yin Y C. Enhancing frequency response control by DFIGs in the high wind penetrated power systems [J]. *IEEE Transactions on Power Systems*, 2011, 26(2): 710 - 718.
- [21] 张昭遂, 孙元章, 李国杰, 等. 超速与变桨协调的双馈风电机组频率控制 [J]. *电力系统自动化*, 2011, 35(17): 20 - 25.
- [22] Morren J, Haan S W H, Kling W L, Ferreira J A. Wind turbines emulating inertia and supporting primary frequency control [J]. *IEEE Transactions on Power Systems*, 2006, 21(1): 433 - 434.
- [23] 曹军, 王虹富, 邱家驹. 变速恒频双馈风电机组频率控制策略 [J]. *电力系统自动化*, 2009, 33(13): 78 - 82.
- [24] 邹贤求, 吴政球, 陈波, 等. 变速恒频双馈风电机组频率控制策略的改进 [J]. *电力系统及其自动化学报*, 2011, 23(3): 63 - 68.
- [25] Vidyanandan K V, Senroy N. Primary frequency regulation by deloaded wind turbines using variable droop [J]. *IEEE Transactions on Power Systems*, 2013, 28(2): 837 - 846.
- [26] Wang Y, Delille G, Bayem H, et al. High wind power penetration in isolated power systems—assessment of wind inertial and primary frequency responses [J]. *IEEE Transactions on Power Systems*, 2013, 28(3): 2412 - 2420.
- [27] Ullah N R, Thiringer T, Karlsson D. Temporary primary frequency control support by variable speed wind turbines—potential and applications [J]. *IEEE Transactions on Power Systems*, 2008, 23 (2): 601 - 612.
- [28] Keung P K, Li P, Banakar H, Ooi B T. Kinetic energy of wind-turbine generators for system frequency support [J]. *IEEE Transactions on Power Systems*, 2009, 24(1): 279 - 287.
- [29] 何成明, 王洪涛, 孙华东, 陈得志. 变速风电机组调频特性分析及风电场时序协同控制策略 [J]. *电力系统自动化*, 2013, 37(9): 1 - 6.
- [30] Almeida R G, Castronuovo E D, Lopes J A. Optimum generation control in wind parks when carrying out system operator requests [J]. *IEEE Transactions on Power Systems*, 2006, 21(2): 718 - 725.
- [31] Chang-Chien L R, Yin Y C. Strategies for Operating Wind Power in a Similar Manner of Conventional Power Plant [J]. *IEEE Transactions on Energy Conversion*, 2009, 24(4): 926 - 934.

收稿日期: 2014-05-05

作者简介:

谷俊和(1961—), 男, 高级工程师, 研究方向为电力系统稳定与控制, E-mail: gujunhe@gmail.com;

刘建平(1965—), 男, 高级工程师, 研究方向为电力系统稳定与控制, E-mail: liujianping@gmail.com;

江浩(1987—), 男, 博士研究生, 研究方向为电力系统稳定与控制, E-mail: h-jiang10@mails.tsinghua.edu.cn.

(责任编辑: 林海文)