

特高压电网最大风电渗透率计算方法

刘金强, 卢芸, 王晓茹

(西南交通大学, 四川成都 610031)

摘要: 随着中国可持续发展战略的不断推进, 风电并网容量不断增加, 大量风电将通过特高压交直流输电系统由风电资源丰富的“三北”地区传输到东部负荷中心, 而风电本身的波动性和电力电子化特点给其在特高压交直流混连系统中的消纳带来了诸多挑战。因此开展高渗透率风电对特高压交直流混连系统安全稳定运行影响的研究, 估算系统最大风电渗透率, 具有重要的学术创新和工程实践价值。提出了考虑系统频率响应的最大风电渗透率计算方法, 分别从大扰动后系统频率响应和风电波动引起的频率偏移两个方面研究了风电渗透率的制约因素, 并基于计及风电并网的频率响应(SFR)模型计算出相应的最大风电渗透率。研究成果对于未来并网风电场和传输风电的特高压交直流输电系统的规划设计具有一定的指导意义, 同时也论证了风电场提供辅助调频服务的必要性。

关键词: 特高压电网; 风电渗透率; 风电波动; 频率响应; SFR模型

Abstract: With the continuous progress of national sustainable development strategy, wind power integration steadily increases in China, which are mainly transmitted from "three north" area to load center in the east of China. However, many challenges for wind power absorption in ultra-high voltage (UHV) AC/DC interconnected power system emerge due to its inherent fluctuations and characteristics of power electronics. Therefore, it is of great significance to study the impact of high wind power penetration on the stability and security of UHV AC/DC interconnected power system and further estimate the maximum wind power penetration from both academic and engineering perspectives. A method based on system frequency response (SFR) model is proposed to calculate the maximum wind power penetration considering system frequency response under both considerable disturbances and wind power fluctuations. This work presents some guidance on planning and design of wind farms and related UHV AC/DC transmission systems in the future, and also demonstrates the necessity of ancillary frequency regulation services from wind farms.

Key words: UHV power system; wind power penetration; wind power fluctuation; frequency response; system frequency response (SFR) model

中图分类号: TM715 文献标志码: A 文章编号: 1003-6954(2017)01-0032-05

DOI:10.16527/j.cnki.cn51-1315/tm.2017.01.007

0 前言

过去5年,中国风力发电得到了长足的进步,目前累计装机容量已经跃居世界第一^[1]。同时可以预见,风力发电在中国仍具有很大的发展潜力。着眼于不可再生资源的逐渐消耗和人类可持续发展的思想,新能源发电在未来能源结构中的比重将持续增加,预计到2050年,中国新能源发电比例将达到31.9%^[2]。另一方面,由于中国风电开发潜力与国民经济发展程度在地域分布上的不一致性,“三北”地区风电资源丰富^[3],而华东、华北地区是全国负荷中心,因此中国形成了不同于西方国家分布式接入的大规模集中式风电并网模式,大量风电需要经

过特高压交直流输电系统传输到负荷中心^[4-6],这种并网-传输-再消纳的模式较前者而言加剧了风电波动的强度和预测难度。

不同于传统电源,风电固有的波动性和间歇性为电力系统调峰调频造成了极大的困难,因此造成的弃风限电在中国大规模风电接入地区已有发生^[7]。而在风电渗透率不高的区域电网,虽然名义上完成了对风电的100%消纳,没有出现弃风限电问题;但是少量波动性的风电涌入大电网目前尚未得到足够重视,这在一定程度上阻碍了对大规模风电并网的复杂性分析与解决方案的研究步伐,一旦全国范围内风电渗透率提高,电网的安全稳定运行将面临严峻的挑战。另一方面,电网系统异常工况下风电机组自身控保的脆弱性和穿越能力的局限性

已成为电力系统发生故障后维持安全稳定运行的重要威胁,大面积的风机脱网和非计划并网引发连锁故障最终导致系统解列的事故已见诸报道^[8-9]。而且在特高压交直流混连系统中,大量并网风电机组与直流输电系统之间的故障耦合作用也增加了系统在发生直流单极、双极闭锁故障后引发风机大面积脱网的可能性。

在目前风电渗透率较低的情况下,开展具有前瞻性的风电接入对特高压交直流混连系统的影响及最大风电渗透率预测研究,对未来并网风电场和传输风电的特高压交直流输电系统的规划设计具有一定的指导意义;同时也为风电场规范化运行及风电参与系统辅助服务提供了必要性论证。下面提出了考虑系统频率响应的最大风电渗透率计算方法,研究风电渗透率较高时系统惯性时间常数、调频能力的下降和风电自身功率波动给系统频率响应造成的影响,进而根据相应的频率指标结合SFR模型计算出网内可承受的最大风电渗透率。由于研究问题关注的是最大风电渗透率计算,而系统的容量大小对计算结果的影响较小,因此所有工作均在标么制下展开。

1 考虑大扰动后系统频率响应的最大风电渗透率估计方法

风电机组通过背靠背电力电子变换器并入电网,实现了机组出力与电网频率的解耦控制,因此风电机组无法自然响应系统频率的变化。在国内风电场尚未应用辅助调频功能的情形下,大量并网风电机组代替原有传统发电机组,造成系统惯性时间常数的下降,因此导致系统的惯性响应能力受到削弱;同时系统一次调频能力也会随传统能源比例降低而减小。采用计及风电并网的频率响应(system frequency response, SFR)模型研究不同风电渗透率下系统发生大扰动后电力系统频率响应,并结合电力系统低频减载的整定值和电网运行原则估算最大风电渗透率。

1.1 计及风电并网的SFR模型

SFR模型在频率分析和控制相关的研究中得到了广泛应用,它将系统中所有的发电机聚合为一个等值转子模型,同时将所有的调速器原动机聚合为一个等值调速器原动机模型,忽略了网络和电压变

化对系统频率的影响^[10-11],如图1所示。其中 P_{d0} 为系统扰动后瞬间显性不平衡功率; H_e 为系统的等值转子惯性时间常数; D 为系统的等值阻尼系数,包含负荷的频变效应; R 为等值调差系数; F_H 为等值高压缸做功比例; T_R 为等值再热时间常数。SFR模型简单的结构使其能够快速计算出系统的惯性中心频率偏差 $\Delta\omega$,进而可以得到系统频率曲线。出于描述方便考虑,所提及的系统频率均实指系统的惯性中心频率。

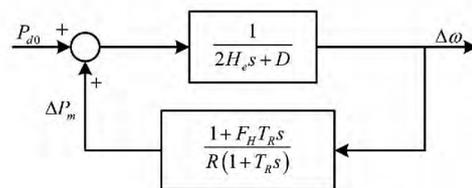


图1 SFR模型结构图

风电并网后,一部分传统电源被风机代替,考虑到目前中国装备的风机并不具备频率调节能力,因此将风电等效为功率源,得到风电渗透率为 ρ 下的计及风电并网的SFR模型,如图2所示,其中 D_{new} 表示风电并网后系统等值转速阻尼系数。

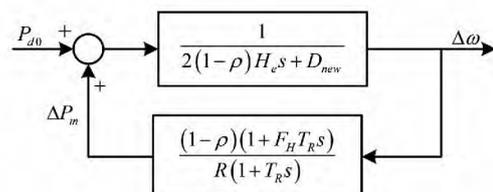


图2 计及风电并网的SFR模型结构图

1.2 不同风电渗透率下大扰动后系统频率响应分析

根据实际电网典型数据,以电网总发电容量为基准功率,SFR模型中参数设置如表1所示。

表1 SFR模型参数列表

参数	取值
H_e	12 s
D	1
R	-0.05
F_H	0.3
T_R	11 s

特高压交直流混连系统中常见的负荷冲击、机组脱网、区域特高压交直流联络线故障后退出运行等大扰动均会引发严重的有功功率不平衡,进而造成频率偏移额定水平。分别取0.1 p. u.的负荷跃升、跃降扰动,分析在不同备用水平下,不同风电渗透率下的系统频率响应,结果如图3~图6所示。

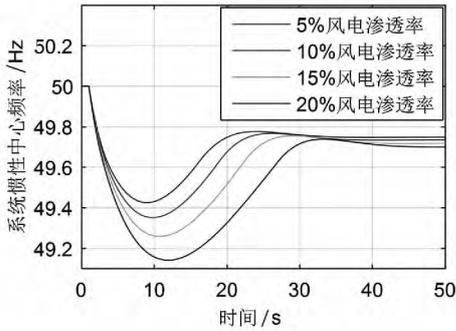


图3 0.1 p. u. 负荷跃升后系统频率响应(15%备用)

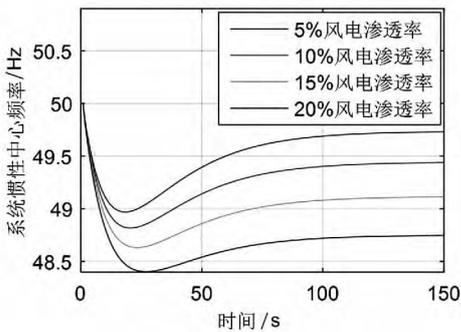


图4 0.1 p. u. 负荷跃升后系统频率响应(10%备用)

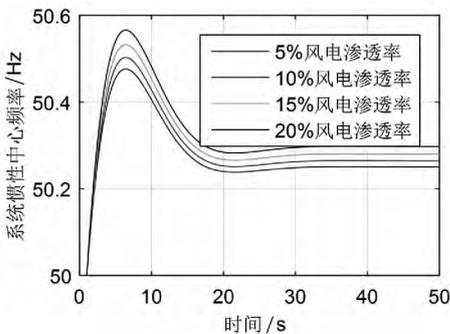


图5 0.1 p. u. 负荷跃降后系统频率响应(15%备用)

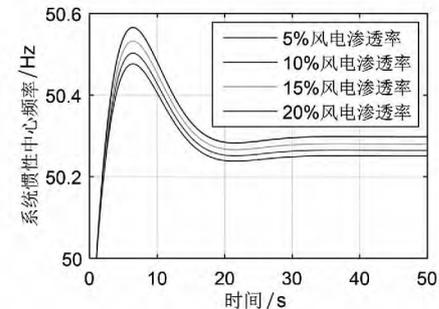


图6 0.1 p. u. 负荷跃降后系统频率响应(10%备用)

由图3~图6中可以看出,备用的水平对高频扰动后频率动态影响较小,但对低频扰动后频率动态具有极大的影响,较低的备用水平下系统难以依靠增加发电来弥补有功缺额,进而导致频率的持续下跌。同时可以看出,风电渗透率对大扰动后系统频率动态的影响十分显著,从5%到20%的渗透率

变化过程中,系统扰动后的最大频率偏差逐渐变大,在低频故障下甚至已经到达了48.5 Hz以下,电网面临频率失稳甚至低频解列的风险。而在强调节能、经济运行的特高压交直流混连电网中,10%的备用已经十分保守,在这种情况下,大扰动后系统频率响应对风电渗透率的制约比较显著。假设系统低频减载首轮动作频率整定值为48.5 Hz^[2],为了避免在上述低频故障情况下触发低频减载保护,根据SFR模型可以计算出该系统可承受的最大风电渗透率为18%。在实际应用中,基于电网的不同运行方式、备用水平、常见大扰动故障集、机组参数和频率响应指标要求等信息,采用所提方法可以进行考虑大扰动后系统频率响应的特高压交直流混连系统最大风电渗透率的估计。

2 考虑风电波动引起系统频率偏移的最大风电渗透率估计方法

受风速固有的间歇性、波动性的影响,注入到电网中的风电功率也具有随机波动的特点。风电的随机波动不仅在特高压联络线上引发随机波动威胁电网安全稳定运行,其引发的系统频率偏移也对电网的电能质量造成了不利影响。下面重点研究不同渗透率下秒级风电功率波动引起的系统频率响应。基于四川省德昌风电场SCADA实测数据,某10 min内风电场出力比变化如图7所示。

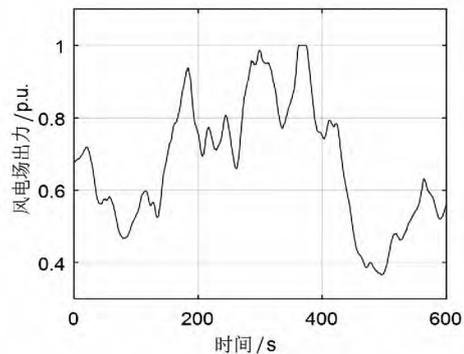


图7 风电场出力比变化(以风电场装机容量为基准功率)

由图7可以看出即使是时间尺度很短的秒级数据,风电场出力的波动依然十分明显,因此有必要研究风电波动在运行时间尺度内引起的系统频率响应。

随着风电渗透率增加,风电场规模和数量不断扩大,由于风速在地理分布上的差异,一个区域内风电总出力的波动会呈现一定的平滑效应^[13],假设研

究区域电网内各风电场出力波动统计特性不随该风电场装机容量增加而发生改变,不同风电场出力互相关系数参考现有风电场出力互相关系数,如表2所示。

表2 四川省内4处风电场出力互相关系数

	德昌	芳地坪	鲁南	伊达
德昌	1	0.464 8	0.461 1	0.399 3
芳地坪	0.464 8	1	0.383 2	0.327 9
鲁南	0.461 1	0.383 2	1	0.577 0
伊达	0.399 3	0.327 9	0.577 0	1

首先根据现有各风电场出力互相关系数及总风电功率与各风电场功率的映射关系,模拟得到风电渗透率为 ρ 时该区域电网内总风电功率的秒级数据。

然后将模拟得到的秒级风电出力数据在5 min内的波动数据输入到计及风电并网的SFR模型中,得到不同风电渗透率下系统频率的曲线,如图8所示。可以看出,随着风电渗透率的增加,风电波动引起的系统频率响应幅度也随之增加。

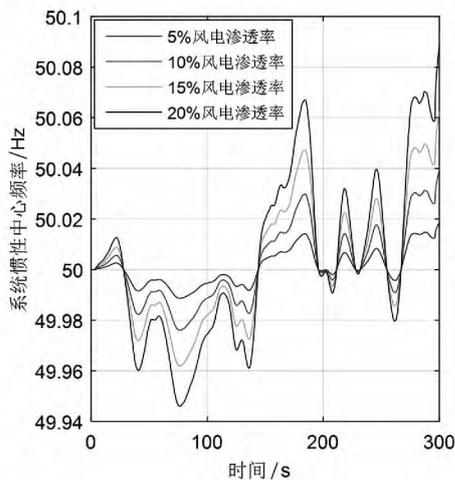


图8 风电波动引起的系统频率响应

为了能够更加准确地描述不同风电渗透率下风电波动对系统频率的影响,将模拟得到的5 435 min的秒级风电数据按照5 min等间隔划分,将每5 min风电波动数据输入到计及风电并网的SFR模型中,得到5 min内风电波动引起的系统最大绝对频率偏差的概率分布,如图9所示。由于风电波动造成的系统频率偏移量相对大型故障而言仍然较小,系统备用水平对其影响较弱,实际计算结果也支持这一观点,所展示的图表统一取系统备用为10%情况下的计算结果。

由图9可以看出随着风电渗透率从5%到20%

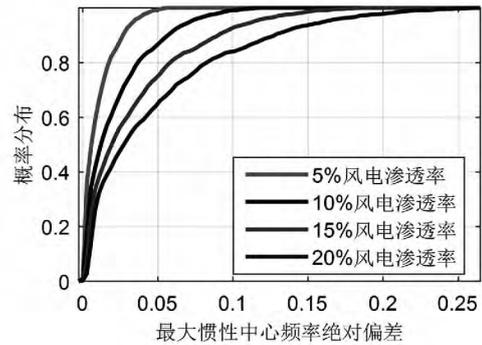


图9 风电波动引起的系统最大绝对频率偏差概率分布

不断增加,5 min内风电波动引起的系统最大绝对频率偏差取较大值的概率逐渐变大,风电随机波动对系统频率的影响越发明显。为了更清晰地评估不同风电渗透率下风电波动对系统频率影响的统计特性,表3分别给出了90%、95%、99%置信水平下5 min内风电功率随机波动引起的系统最大绝对频率偏差的范围。从表3中可以看出,在相同置信水平下,风电渗透率越高,最大频率绝对偏差取值范围越大,在风电渗透率为20%情况下,99%置信水平下系统的最大绝对频率偏差达到了0.22 Hz,已经超出国家对电力系统正常运行条件下频率偏差的限制^[14]。

表3 系统最大绝对频率偏差置信区间/Hz

置信度	渗透率			
	5%	10%	15%	20%
90%	[0, 0.027]	[0, 0.057]	[0, 0.090]	[0, 0.128]
95%	[0, 0.034]	[0, 0.072]	[0, 0.114]	[0, 0.161]
99%	[0, 0.046]	[0, 0.098]	[0, 0.155]	[0, 0.220]

如果设定该区域电网频率合格率^[14]必须达到99%以上,那么可以按照所提分析方法计算出相应的风电最大渗透率为17.5%。在实际应用中,基于网内风电波动特性、实际作用的调频控制、机组参数和频率合格率要求等信息,采用所提方法可以进行考虑风电波动引起系统频率偏移的特高压交直流混连系统最大风电渗透率的计算。

3 结论

提出了考虑系统频率响应的特高压交直流混连系统最大风电渗透率计算方法,分别从大扰动后系统频率响应和风电自身波动造成的频率偏移两个方面展开了分析性的研究,所提方法在电网典型数据及实际风电场波动特性的基础上进行了算例分析。

结果显示在风电场没有提供辅助调频服务的情况下,风电渗透率的增加使得系统在大扰动和风电波动两种情形下的频率偏移幅度均逐渐变大,在算例中网内最大可承受风电渗透率约为17.5%,而且这一数值其实涵盖了系统中所有通过电力电子并网的具有波动性的新能源机组。

为了进一步提升风电并网量,且保证系统频率有较高的安全裕度和合格率,风电场需要提供基于风机或者储能装置的辅助调频服务。另外,为了更有效地平抑风电在运行时间尺度内的波动,进而提升特高压交直流混连系统风电渗透水平,高精度的超短期风电功率预测和连续时间的调度控制一体化显得至关重要。

参考文献

[1] Global Wind Energy Council. Global Wind 2013 Report [R]. Brussels, Belgium, 2013.

[2] 周孝信,鲁宗相,刘应梅,等. 中国未来电网的发展模式和关键技术[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(29): 4999 - 5008.

[3] 李春曦,王佳,叶学民,等. 我国新能源发展现状及前景[J]. 电力科学与工程, 2012, 28(4): 1 - 8.

[4] 孙涛,许梁,徐箭,等. 风电经特高压线路并网时湖北电网调峰方案[J]. 电网技术, 2014, 38(10): 2721 - 2728.

[5] 吴耀文,马溪原,方华亮,等. 大规模风电特高压专用通道落点优选方法[J]. 中国电机工程学报, 2012, 32(1): 9 - 16.

[6] 朱艺颖,董鹏,谢国平,等. 适应大规模风电外送的特高压直流协调控制实时仿真研究[J]. 电网技术, 2013, 37(7): 1814 - 1819.

[7] 张丽英,叶廷路,辛耀中,等. 大规模风电接入电网的相关问题及措施[J]. 中国电机工程学报, 2010, 30(25): 1 - 9.

[8] 李再华,白晓民,丁剑,等. 西欧大停电事故分析[J]. 电力系统自动化, 2007, 31(1): 1 - 3.

[9] 向异,孙晓强,张小奇,等. 2·24甘肃酒泉大规模风电脱网事故暴露的问题及解决措施[J]. 华北电力技术, 2011(9): 1 - 7.

[10] Anderson P M, Mirheydar M. A Low - order System Frequency Response Model [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 1990, 5(3): 720 - 729.

[11] 刘克天,王晓茹,薄其滨. 基于广域量测的电力系统扰动后最低频率预测[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(13): 2188 - 2195.

[12] DL/T 428 - 2010, 电力系统自动低频减负荷技术规范[S].

[13] 刘燕华,田茹,张东英,等. 风电出力平滑效应的分析与应用[J]. 电网技术, 2013, 37(4): 987 - 991.

[14] GB/T 15945 - 2008, 电能质量电力系统频率偏差[S].

(收稿日期:2016 - 09 - 30)

(上接第13页)

[5] T. Athay, R. Podmore, S. Virmani. A Practical Method for the Direct Analysis of Transient Stability [J]. IEEE Trans. on Power Apparatus and Systems, 1979, 36(11): 1423 - 1429.

[6] A. R. Bergen, D. J. Hill. A Structure Preserving Method for Power System Stability Analysis [J]. IEEE Trans. on Power Apparatus and Systems, 1981, 100(1): 25 - 35.

[7] A. N. Micheal, A. A. Fouad, V. Vittal. Power System Transient Stability Using Individual Machine Energy Functions [J]. IEEE Trans. on Circuits and Systems, 1983, CAS - 30(5): 266 - 276.

[8] Y. Xue, T. Van Cutsem, M. R. Ribbens - Pavella. A Simple Direct Method for Fast Transient Stability Assessment of Large Power Systems [J]. IEEE Trans. on Power Systems, 1988, 3(2): 400 - 412.

[9] 刘群英,刘俊勇,刘起方. 基于支路势能信息的电网脆弱性评估[J]. 电力系统自动化, 2008, 32(10): 6

- 11.

[10] 刘群英,刘俊勇,刘起方. 节点势能架构下的电压脆弱性评估[J]. 中国电机工程学报, 2008, 28(25): 30 - 37.

[11] 刘友波,刘俊勇,王民昆,等. 计及动能注入介数的线路暂态脆弱性快速评估[J]. 中国电机工程学报, 2011, 31(13): 40 - 47.

[12] 苟竞,刘俊勇,魏震波,等. 一种基于发电机对相对能量的电力系统临界机群快速辨识方法[J]. 中国电机工程学报, 2015, 35(24): 6322 - 6330.

[13] 苟竞,刘俊勇,刘友波,等. 基于能量熵测度的电力系统连锁故障风险辨识[J]. 电网技术, 2013, 37(10): 2754 - 2761.

[14] S. M. Pincus. Approximate Entropy as A Measure of System Complexity [J]. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 1991, 88(6): 2297 - 2301.

(收稿日期:2016 - 11 - 02)