

风电场并网技术规定比较及其综合控制系统初探

王伟胜, 范高峰, 赵海翔

(中国电力科学研究院, 北京市 海淀区 100085)

Comparison of Technical Regulations for Connecting Wind Farm to Power Grid and Preliminary Research on Its Integrated Control System

WANG Wei-sheng, FAN Gao-feng, ZHAO Hai-xiang

(China Electric Power Research Institute, Haidian District, Beijing 100085, China)

ABSTRACT: A comparative research on technical regulations for connecting wind farm to grid in Germany, Denmark, UK and Australia are conducted. The similarities and differences of these regulations in the aspects of controls of active power, reactive power and voltage as well as frequency are compared; the reason causing the differences among these regulations are analyzed. The authors point out that the different characteristics of power grids, ratios of wind power to total capacity of power grids in each country and different connection mode of wind farm are the main reasons. To meet the need of technical regulation for connecting wind farm to power grid and reduce the detrimental effect of wind farm on power grid, a concept of integrated control of wind farm is proposed, a framework for this integrated control is designed, and some tentative ideas for implementing the integrated control are put forward.

KEY WORDS: wind farm; grid connection; technical regulation; integrated control

摘要: 比较了德国、丹麦、英国和澳大利亚等国的风电场并网技术规定。主要分析比较了各国技术规定对有功功率控制、无功电压控制及频率控制等方面的异同。分析了并网规定产生差异的原因,指出了各国电网特点不同、风电所占比例不同、风电接入方式不同是造成差异的主要原因。为满足风电场并网技术规定的要求,减小风电场对电力系统的不利影响,提出了风电场综合控制的概念,设计了风电场综合控制系统的框架,提出了实现控制目标的一些设想。

关键词: 风电场; 并网; 技术规定; 综合控制

0 引言

20 世纪 80 年代以后,风力发电开始快速发展,电网面临越来越多的风电接入。大规模风电并入电网对电网的规划建设、运行调度、分析控制、经济运行和电能质量均产生了一定的影响^[1-9]。为促进风

电场的开发和保证电力系统的安全稳定运行,欧洲、北美及澳大利亚的一些电力协会或电网公司都制定了风电场并网的技术导则。1998 年,丹麦电力研究院(research institute of Danish electric utilities, DEFU)提出了风电机组接入中低压电网的技术规定^[10]。针对风电场接入输电系统的情况,Eltra 输电公司颁布了新的并网规定^[11],用于规范风电场接入 110kV 及以上等级的电网。2002 年,爱尔兰电力供应局(Irish electricity supply board, ESB)下属的国家电网公司(national grid, NG)制定了风电场接入电网技术规定^[12]。2002 年苏格兰输配电公司(Scottish power transmission and distribution)和苏格兰水电公司(Scottish hydro electric)联合提出了风电场接入电力系统技术规定^[13]。德国风电装机最多的 E.ON 电力公司,在 2003 年颁布了风电场并网技术规定^[14]。我国也在 2006 年颁布了有关的国家标准和国家电网公司风电场接入电力系统技术规定^[15-16]。制定风电场接入电网技术规定的目的是保证风电场和电力系统的安全稳定运行;明确电网公司和风电场开发商的责任和义务,适应风电场建设和运行的需要。本文对几个并网技术规定进行比较,以便更好地理解不同并网导则之间的异同,加深对相关问题的认识,减少各方对有关条款认识的分歧,有助于风电机组制造商开发更先进的控制系统^[17-19]。

针对各国的风电场并网技术规定涉及到的一些共性问题,如功率控制、无功电压问题等,各并网技术规定都提出了一些要求^[20],但没有提出解决这些问题的方法。要实现并网规定的有关要求,让风电场参与系统的功率平衡、无功/电压控制就要设计并实现风电场的综合控制。本文设计了风电场综合

控制系统的框架，提出了实现控制目标的一些设想。

1 风电场并网技术规定比较

1.1 有功功率控制

电力系统每时每刻都要保持发电与用电的基本平衡，保持系统频率的稳定。风电场输出功率的波动对系统的功率平衡、电能质量带来一定的影响。各国风电场并网技术规定都对风电场的有功功率变化提出了要求。Eltra 和 Eltra&Elkraft 要求 1min 的功率变化小于等于风电场最大功率的 5%。E.ON 和 ESBNG 要求风电场输出功率在任何时间内都小于它的注册容量。苏格兰并网技术规定要求风电场输出功率在合理的时间内可以超出额定功率。

Eltra 要求风电场能够通过控制系统保证在 2 s 内降到额定功率的 20% 以下，Eltra&Elkraft 要求风电场每分钟的功率变化率在 10%~100% 内可调。E.ON 要求每分钟功率降低最少要占额定容量的 10%。

ESBNG 要求 15 min 功率变化与风电场的规模有关，小于 100 MW 的风电场每分钟功率变化小于 5%，小于 200 MW 的风电场每分钟功率变化小于额定容量的 4%，大于 200 MW 的风电场每分钟功率变化小于额定容量的 2%。国家电网公司规定了风电场 1 min 和 10 min 的功率变化率，变化率与风电场的装机容量有关，如小于 30 MW 的风电场 10 min 最大变化量为 20 MW，1 min 最大变化量为 6 MW。

Scottish、Eltra 和 E.ON 都要求风电场起停要满足电压质量的要求。Scottish 还要求风电场起停满足最大功率变化的要求。Scottish 要求不多于 25% 的额定容量可以跳开，并在 30 min 内分阶段逐步退出。

可以看出，国内外的风电场并网技术规定都提到了风电场的有功功率控制。要求风电场连续运行和起停过程必须具有控制有功功率的能力，一方面控制功率变化率；另一方面根据电网需要限制风电场输出功率。限制风电场出力的主要目的是减小风电场对电网的不利影响。因为电网输电能力、调峰能力及电压水平等不同，电网所能承受的扰动能力也不同，因此对风电场功率限制应充分考虑这些因素，不能简单按装机容量大小区分，这些问题需要深入研究。实现风电场的有功功率控制需要额外的控制系统，这不但会增加风电场投资，而且会造成一定的发电损失。

1.2 无功/电压控制

电力系统一般通过调节电网的无功设备来调

节系统的电压来避免较大的电压偏差及电压失稳问题。风电场作为系统的一种电源也要参与系统的无功调整及电压控制。对风电场无功功率的要求是通过风电场的功率因数范围来规定的，见表 1。

表 1 各并网导则对风电场功率因数的要求
Tab.1 Grid requirement for power factor

并网导则	Eltra	Eltra&Elkraft	Scotland	ESBNG
功率因数	功率因数 1.0, 对电容器组 补偿 $\pm 10\%P$	功率因数 1.0, 对电容器组补 偿的 $Q\pm 10\%P$	进相 0.95、 迟相 0.85	额定功率：进相 0.93，迟相 0.85；35% 功率：进相 0.7，迟 相 0.4
并网导则	E.ON	国家电网公司	NECA	
功率因数	进相 0.975, 迟相 0.975	进相 0.95, 迟相 0.95	迟相 0.98(400kV), 迟相 0.96(250~400kV), 迟相 0.95(50~250kV), 进相 0.9、迟相 0.9(50kV)	

从表 1 中可以看出，各并网导则对风电场的功率因数的要求有一定的差异。Eltra 和 Eltra&Elkraft 要求功率因数为 1.0；Scotland 规定了功率因数范围；ESBNG 根据风电场出力水平规定了功率因数；NECA 根据接入点的电压水平规定功率因数。

根据工程经验，要使风电场正常运行，首先要保证电压在合理范围内，其次功率因数也要合理。有些情况下，因为风电场送出线路充电功率过大，导致风电场电压过高，为维持风电场挂网运行甚至需要在风电场中安装补偿电抗器，此时并网点功率因数较低。因此风电场的无功补偿与风电场的容量大小、风电场的出力水平及接入电网的状况有关，需要具体问题具体分析。技术规定制定中要充分考虑这些因素，保证技术规定在各种情况下具有普遍的指导意义，避免不适宜情况的出现。

1.3 变压器分接头调整

E.ON 推荐风电场装备带分接头调整的变压器，通过调节变压器变比来调节并网点的电压。Scotland 规定容量大于 100 MW 的变压器装备手动调节分接头以利于电网控制风电场的无功功率。大于 5 MW 小于 100 MW 的风电场，如果有独立的升压变，可以用这种方法调压，或用其它方式控制风电场的无功功率满足电网的要求。ESBN 要求每个风电场升压变压器都带有载调压分接头。分接头调整不能引起高压母线电压变化过大，对于 110 kV 母线电压变化率不超过 2.5%，对于 220 kV~400 kV 母线不超过 1.6%。国家电网公司规定风电场升压变压器宜采用有载调压变压器，分接头切换可手动或自动控制，根据电网调度部门的指令进行调整。

1.4 频率控制

电力系统通过一次调频和二次调频来维持系统的功率平衡和频率稳定。一般情况下，系统频率在很小的范围内波动，而风电场输出功率在较大范围内波动，因此大量风电的接入会给系统频率调整带来一定的影响。而系统频率的变化又会给风电机组的运行带来影响，各并网导则都要求风电机组能够在一定的频率范围内正常运行。当频率超过一定范围后，限制出力运行或延迟一定时间后退出运行可以维护系统频率的稳定。各并网导则对频率的要求见图 1，图中给出了在不同频率下风电机组的运行状态及风电机组退出运行的时限。因为各国电网特性不一样，风电所占比例也不同，因此对风电机组频率的要求也有差异。从图 1 中可以看出，国家电网公司要求较低，主要因为我国目前风电机组设备制造能力较低，过高要求不利于民族产业发展。风电机组的惯量很小，很难像常规火电机组那样参与系统的一次调频。可是 ESBNG 要求风电场通过控制输出功率的 3%~5% 来进行系统的频率调整。其它并网导则也要求风电场参与系统的二次调频。当系统频率过高时，可通过控制系统使部分风电机组停机或通过控制桨距角来减少风电场的输出功率。在正常情况下限制风电场的出力可以参与系统二次调频。

1.5 低电压穿越

电网发生故障时，风电场为保护自身往往主动

跳开。但对于大型风电场，风电的退出会导致系统更大的功率缺额，不利于系统的稳定，因此并网导则对风电场穿越故障的能力提出了一些要求。国内外有关技术规定对风电机组的低电压穿越能力要求如表 2 所示。表 2 给出了在一定电压下，各并网导则要求风电机组能够并网运行的时间。

可以看出，国外的技术规定都要求风电场具有低电压穿越(low voltage ride through, LVRT)能力，尽可能避免电网故障引起风电场解列。其中澳大利亚的并网导则要求最高，要求电压跌到 0% 的情况下，风电机组挂网运行 0.175 s。风电机组挂网运行固然对电网有好处，但这会增加风电机组的成本，影响风电机组的寿命。因此过高要求会提高风电场的投资。

考虑到我国风电在电网中所占比例较低，以及我国风电机组制造业正处在发展阶段，我国的风电场并网技术规定没有对低电压穿越能力提出统一要求。但是当某一地区的风电装机比较集中时，如果风电场不具有低电压穿越能力，则在电网发生故障时可能出现大量风电场退出运行的情况，这相当于系统再次承受冲击。为避免这种情况发生应该对风电机组提出低电压穿越能力的要求。

1.6 风电机组模型

风电场与电力系统相互作用一般通过计算机仿真来分析，这要求能对风电场正确建模。Scotland

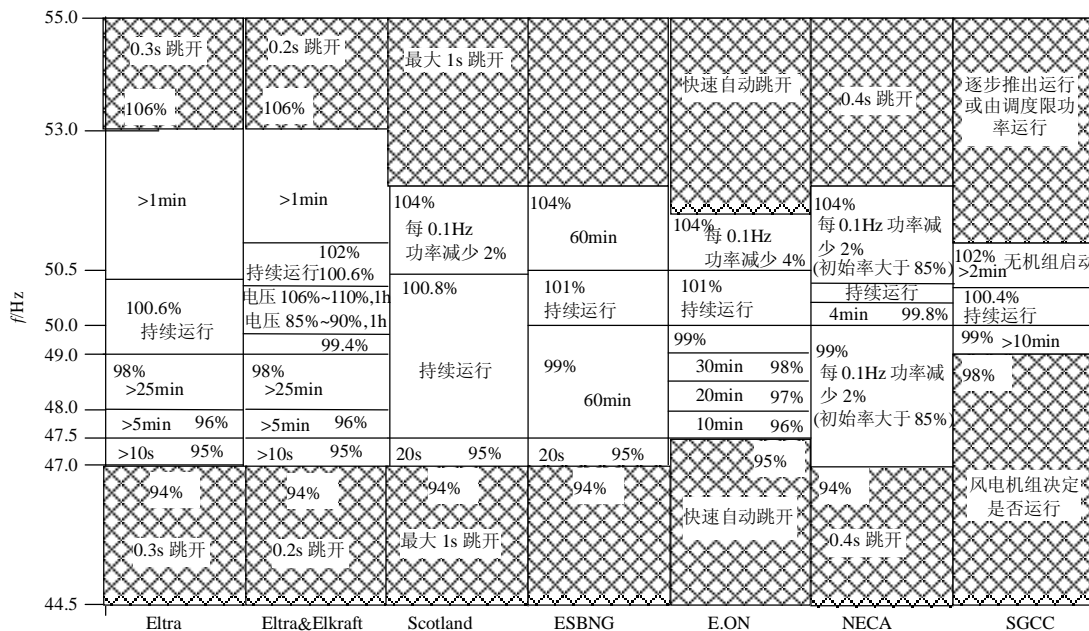


图 1 各并网导则对频率的要求
Fig.1 Grid requirements for frequency

表 2 各并网导则对低电压穿越能力的要求

Tab.2 Grid requirements for LVRT		
公司	并网导则(低电压穿越能力)	
	电压/额定电压	时间
Eltra	0%	100 ms
	25%	0.1s
	85%~110%	60 min
	90%	10 s~60 s
	106%	60 s
	110%	200 ms
ESBNG	120%	0.1 s
	15%	625 ms
Scotland	90%	3 s
	0~15% (132 kV)	140 ms
	0~15% (275 kV)	100 ms
	90 %	500 ms
E.ON	115% (275 kV)	250 ms
	120% (132 kV)	250 ms
	0%	150 ms
NECA	80%	3~5 s
	110%	≤100 ms
	0%	≤0.175s
国家电网公司	80%~110%	10 s
	90%~110%	3 min

国家电网公司 根据具体项目的研究结论而确定。

和 Eltra 要求风电机组的模型与原型机测试结果一致。Eltra 还要求如果一个风电场包含多种机组类型,对每种机组都要有详细的模型。Scotland 和 Eltra 要求风电场安装故障录波装置。Eltra 要求录波信号包括并网点电压、有功功率、无功功率、频率和电流,还有风电机组的有功功率、无功功率和转速。Scotland 要求记录三相电压、三相电流和风速。Eltra&Elkraft 和 E.ON 都没有提出有关模型的问题。澳大利亚 NEMMCO(national electricity market management company limited)对风电场的模型提出了指导标准,对模型的框图、参数等提出了要求,规定了模型的仿真结果与实测结果的误差范围^[21]。国家电网公司也规定风电开发商应提供风力发电机组、电力汇集及控制系统的模型及参数。

风电机组的模型已有大量的文献进行了研究^[22-25],但模型标准化还需要做很多工作。

2 风电场综合控制系统的功能和结构

2.1 风电场综合控制的概念

为控制风电场的有功功率、无功功率,减小风电场对系统的不利影响,有必要设计风电场的综合控制系统。风电场综合控制系统是根据调度的指令和风电场并网点的信号,调节风电场的无功补偿设备及风电机组本身的控制系统,实现整个风电场优化控制。

2.2 风电场综合控制系统的结构

风电场综合控制系统的输入信号有调度的指令、风速、并网点的有功功率、无功功率、电压等,控制目标为保持风电场的有功、无功、电压等在合理范围内变化。系统的总体结构如图 2 所示。在正常情况下,电网根据风电场的输出功率,对某些调频电厂的自动发电控制装置进行调整,保持系统的功率平衡。紧急情况下,调度中心根据电网的运行状况向风电场下达指令,对风电场的有功功率和无功功率提出要求。风电场根据风速、电压等信息确定风电场的功率输出,并向各风电机组下达指令。对于变速风电机组可以通过桨距角调节风电机组输出的有功功率,对于定速风电机组只能通过起停的方式调节风电场输出功率。如果风电机组具有无功调节能力,风电机组也可以参与系统电压调整;否则只能通过调节风电场的无功补偿装置及升压变压器分接头调节风电场无功功率。

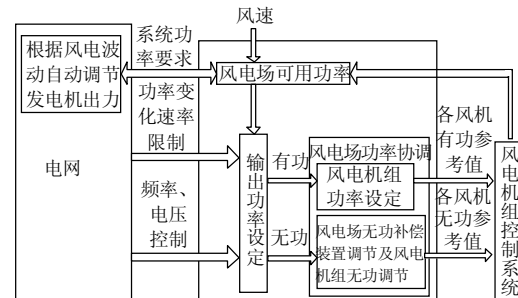


图 2 风电场综合控制系统示意图

Fig.2 Sketch diagram of wind farm integrated control system

2.3 风电场控制与风电机组控制的协调问题

如果风电场中各台风电机组型号相同,并且处于相同的运行状态,则整个风电场的特性就与单机特性基本一致,各台机组可以采用相同的控制策略。如果风电场机组类型不一致,或风电场分布范围较广,那么各台风电机组将处于不同的运行状态。在这种情况下可以采用机群控制的方法,具体而言就是根据风电场中风电机组排列位置和风速状况,把风电机组划分为若干群,同一机群可以采用相同的控制策略。

3 结束语

随着风电在电力系统所占比例不断增加,风电对电力系统的影响在增强,因此需要加强对风电机组及风电场的分析研究,在跟踪国外风电场并网技术标准的同时,根据我国具体情况对风电场并网技术标准适时进行修订和完善。

为实现风电场并网技术规定中提出的风电场功率和电压控制等方面的要求,研究开发风电场综合控制系统势在必行。另外,新型风电机组及控制系统的技术进步也为实现风电场综合控制功能提供了条件。

参考文献

- [1] 王海超, 鲁宗相, 周双喜. 风电场发电容量可信度研究[J]. 中国电机工程学报, 2005, 25(10): 103-106.
Wang Haichao, Lu Zongxiang, Zhou Shuangxi. Research on the capacity credit of wind energy resources[J]. Proceedings of the CSEE, 2005, 25(10): 103-106(in Chinese).
- [2] 陈金富, 陈海焱, 段献忠. 含大型风电场的电力系统多时段动态优化潮流[J]. 中国电机工程学报, 2006, 26(3): 31-35.
Chen Jinfu, Chen Haiyan, Duan Xianzhong. Multi-period dynamic optimal power flow in wind power integrated system[J]. Proceedings of the CSEE, 2006, 26(3): 31-35(in Chinese).
- [3] 王海超, 周双喜, 鲁宗相, 等. 含风电场的电力系统潮流计算的联合迭代方法及应用[J]. 电网技术, 2005, 29(18): 59-62.
Wang Haichao, Zhou shuangxi, Lu Zongxiang, et al. A joint iteration method for load flow calculation of power system containing unified wind farm and its application[J]. Power System Technology, 2005, 29(18): 59-62(in Chinese).
- [4] 曹娜, 赵海翔, 戴慧珠. 常用风电机组并网运行时的无功与电压分析[J]. 电网技术, 2006, 30(22): 91-94.
Cao na, Zhao Haixiang, Dai hui zhu. Analysis on reactive power and voltage of commonly used wind turbine interconnected to power grid[J]. Power System Technology, 2006, 30(22): 91-94(in Chinese).
- [5] 吴义纯, 丁明, 张立军. 含风电场的电力系统潮流计算[J]. 中国电机工程学报, 2005, 25(4): 36-39.
Wu Yichun, Ding ming, Zhang Lijun. Power flow analysis in electrical power networks including wind farms[J]. Proceedings of the CSEE, 2005, 25(4): 36-39(in Chinese).
- [6] 陈树勇, 申洪, 张洋, 等. 基于遗传算法的风电场无功补偿容量及控制方法的研究[J]. 中国电机工程学报, 2005, 25(8): 1-6.
Cheng Shuyong, Shen Hong, Zhang Yang, et al. Researches on the compensation and control of reactive power for wind farms based on genetic algorithm[J]. Proceedings of the CSEE, 2005, 25(8): 1-6(in Chinese).
- [7] 孙涛, 王伟胜, 戴慧珠, 等. 风力发电引起的电压波动和闪变[J]. 电网技术, 2003, 27(12): 63-70.
Sun Tao, Wang Weisheng, Dai Huizhu, et al. Voltage fluctuation and flicker caused by wind power generation[J]. Power System Technology, 2003, 27(12): 63-70(in Chinese).
- [8] Sorensen P, Hansen A, Janosi L, et al. Simulation of Interaction between wind farm and power system[R]. Risoe National Laboratory, 2001.
- [9] Sorensen P, Anca D H, Thomsen K, et al. Operation and control of large wind turbines and wind farms - Final report[R]. Risoe National Laboratory, 2005.
- [10] Research Institute of Danish Electric Utilities. Connection of wind turbines to low and medium voltage networks[Z]. Denmark, 1998.
- [11] Eltra. Specifications for connecting wind farms to the transmission networks Second edition[Z]. Denmark, 2002.
- [12] ESB National Grid. Wind farm power station grid code provisions [Z]. Ireland, 2002.
- [13] Scottish Hydro Electric Issue. Guidance note for the connection of wind farms[Z]. Scotland, 2002.
- [14] E.ON Netz GmbH. Grid code, high and extra high voltage [Z]. Germany, 2003.
- [15] GB/Z19963-2005. 风电场接入电力系统技术规定[S]. 北京: 中国标准出版社, 2006.
- [16] 国家电网公司. 风电场接入电网技术规定[Z]. 中国: 北京, 2006.
- [17] Matevosyan J, Ackermann T, Bolik S. International review of grid connection requirements for wind turbines[C]. Chalmers University of Technology, 2004.
- [18] Jauch C, Sorensen P, Bak-Jensen B. International review of grid connection requirements for wind turbines [C]. Nordic Wind Power Conference, Chalmers University of Technology, 2004.
- [19] Sigrid M B. Grid requirements challenges for wind turbines [C]. 4th. International Workshop on Large Scale Integration Wind Power, Transmission Networks, Offshore Wind Farms, Billund Denmark, 2003.
- [20] 雷亚洲, Lightbody G. 国外风力发电导则及动态模型简介[J]. 电网技术, 2005, 25(12): 27-32.
Lei Yazhou, Lightbody G. An introduction on wind power grid code and dynamic simulation[J]. Power System Technology, 2005, 25(12): 27-32(in Chinese).
- [21] National Electricity Market Management Company Limited. Wind farm model guidelines and checklist-memmo[Z]. Australia, 2006.
- [22] 李东东, 陈陈. 风力发电机组动态模型研究[J]. 中国电机工程学报, 2005, 25(3): 115-119.
Li Dongdong, Chen chen. A study on dynamic model of wind turbine generator sets[J]. Proceedings of the CSEE, 2005, 25(3): 115-119(in Chinese).
- [23] 李晶, 宋家骅, 王胜伟. 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. Modelling and dynamic simulation of variable wind turbine with large capacity[J]. Proceedings of the CSEE, 2004, 24(6): 100-105(in Chinese).
- [24] 孙建锋, 焦连伟, 吴俊玲, 等. 风电场发电机动态等值问题的研究[J]. 电网技术, 2004, 28(7): 58-61.
Sun Jianfeng, Jiao Lianwei, Wu Junling, et al. Research on multi-machine dynamic aggregation in wind farm[J]. Power System Technology, 2004, 28(7): 58-61(in Chinese).
- [25] 王琦, 陈小虎, 纪延超, 等. 基于双同步坐标的无刷双馈风力发电系统的最大风能追踪控制[J]. 电网技术, 2007, 31(3): 82-87.
Wang qi, Chen Xiaohu, Ji Yanchao, et al. Maximal wind energy tracing control for brushless doubly-fed wind turbine based on dual synchronous coordinates[J]. Power System Technology, 2007, 31(3): 82-87(in Chinese).

收稿日期: 2007-03-20。

作者简介:

王伟胜(1968—), 男, 博士, 教授级高工, 从事电力系统分析与风力发电领域的科研与教学工作;

范高锋(1977—), 男, 博士研究生, 研究方向为电力系统分析与风力发电技术, E-mail: fangao Feng@epri.ac.cn;

赵海翔(1969—), 男, 博士, 从事电力系统分析与风力发电等领域的科研与咨询工作。

(实习编辑 王晔)