

大量风电引入电网时的频率控制特性

韩民晓¹, 崔军立¹, 姚蜀军¹, Lie XU²

(1. 华北电力大学电气与工程学院, 北京市 102206; 2. 英国贝尔法斯特女王大学, 英国)

摘要:大量风力发电引入电网时,会对电网的频率控制带来影响。在深入分析异步电动机频率特性的基础上,采用所开发的电力扰动装置对不同转矩特性的异步电动机的频率特性进行了测试。基于加权综合的思路建立了包含异步电动机的综合负荷的频率特性模型。同时分析了风力发电的出力特性。通过对一个包含风力发电的电网进行分析,论证了考虑负荷频率特性以后,在同样电网调频能力的情况下,频率波动的偏差会变小。

关键词:风力发电; 电能质量; 频率控制; 负荷特性

中图分类号: TM761; TM614

0 引言

近年来,随着各国对环境及能源安全问题的考虑和京都议定书^[1]的贯彻实施,电力领域备受关注的重要议题是基于可再生能源发电技术的发展与应用^[2]。风能作为蕴藏丰富、成本低廉的自然能,成为近年来应用最广、发展最快的可再生能源发电方式^[3]。中国风能资源比较丰富,随着各地经济的全面发展和能源矛盾的突出,风电将会在发电比例中占据更加重要的位置。

风能具有波动性和随机性,无法存储。因而无法像利用传统能源那样,在保持一次能源相对稳定的情况下,产生电能。这就要求将风力发电对电网的影响进行更为深入的探讨,提出相应的控制措施。发展风力发电对电网的影响包括多个方面,国内外学者对此进行了一系列研究,得出许多重要结论^[4-13]。然而,随着风电装机容量在电网中的比例不断提高,风电出力的波动性对电网频率控制的影响将成为重要议题。以中国北方某地区的风电发展规划为例,在未来 3 年,将发展 3 个 1 000 MW 的大型风力发电厂,该地区整个电网目前装机容量为 18 680 MW,计划到 2010 年总装机容量达到 22 000 MW,最大负荷水平预计为 12 000 MW。届时,风电的装机容量将占电网总装机容量的 15% 左右,地区风电穿透功率可达 25%。传统电力系统调频任务主要针对负荷的随机变化及联络线功率控制的需求设置,风电的随机性及波动性将给频率控制带来困难,这一困难随着风电比例的升高将变得更加严重。众所周知,频率作为电能质量的重要指标,

即使是很小的偏差(中国电能质量标准规定,正常情况下频率偏差不应超过 ± 0.2 Hz)也会造成用电设备出力降低、设备工作异常,甚至发电机组跳脱、系统频率崩溃等严重事故。因此,电网中包含大量风电机组时,必须对整个电网的频率控制特性进行系统的研究,提出相应的措施。目前有关这方面的研究相对还比较薄弱。相关研究工作^[14-15]重点讨论了风电机组的频率特性,对风电机组与电网相互作用研究得较少,也未考虑频率控制中负荷特性的影响。事实上,负荷特性在频率控制中起着重要作用,系统最终的频率特性由发电机组的频率调节特性和负荷的频率特性共同决定。鉴于此,本文针对电网引入大量风力发电的情况,通过对负荷频率特性的考虑,给出电网频率控制的行为与特性。

1 负荷频率特性分析

负荷特性是指当电力系统电压或频率发生变化时,负荷从系统取用的有功功率及无功功率的变化情况^[16]。负荷的频率特性可分为动态负荷频率特性和静态负荷频率特性 2 种描述方式。本文所研究的频率控制时间范围为 10 min~30 min,因此,负荷频率特性采用静态特性的描述方式,记为:

$$\begin{cases} P = P_0 \left(\frac{V}{V_0} \right)^\alpha (1 + K_{pf} \Delta f) \\ Q = Q_0 \left(\frac{V}{V_0} \right)^\beta (1 + K_{qf} \Delta f) \end{cases} \quad (1)$$

式中: α 和 β 为负荷的有功与无功的电压特性指数; K_{pf} 和 K_{qf} 为负荷的频率特性参数。

显然,当系统电压为额定值,只考虑频率变化时有:

$$\begin{cases} K_{pf} = \frac{1}{P_0} \frac{\partial P}{\partial \Delta f} \Big|_{V=V_0} \\ K_{qf} = \frac{1}{Q_0} \frac{\partial Q}{\partial \Delta f} \Big|_{V=V_0} \end{cases} \quad (2)$$

对一个具体电网而言,得到负荷的频率特性就是要确定式(2)中的 K_{pf} 与 K_{qf} 。对于电网频率控制主要是考虑有功功率的平衡,因此主要考虑 K_{pf} 的确定。确定这一系数的方法总体上可分总体测辨法和统计综合法2类。本文采用统计综合法确定描述负荷频率特性的系数。

2 异步电动机的功率特性

当电力系统频率变化在一定范围内、异步电动机仍可稳定运行时,传统的异步电动机机理分析用等效电路仍然适用。这时异步电机从电网取用的有功功率为驱动负载的功率与电机有功损耗之和。负载的功率通常用下式来描述:

$$P_m = nT_m = n\Gamma(n) \quad (3)$$

$$\text{或} \quad P_m = (1-s)n_0\Gamma((1-s)n_0) \quad (4)$$

式中: P_m , T_m 分别为机械功率和转矩; $\Gamma(n)$ 为负载的转矩特性; n 为机械转速; s 为滑差。

异步电机稳定运行时, s 通常很小,则有:

$$P_m \approx \frac{60f}{p} \Gamma\left(\frac{60f}{p}\right) \quad (5)$$

式中: f 为电网频率。

机械负载的转矩特性通常表现为定常、1次或2次比例关系,因此,机械功率与转速的关系通常表现为1次、2次或3次比例关系。即电力系统频率下降时,机械功率下降,对于泵与风机类负载,功率与频率的变化近似成3次方关系,功率会有很大幅度的下降。

系统频率发生变化时,异步电机的损耗变化分析可从铁损、铜损、通风损耗及机械损耗方面考虑。

铁损 W_{Fe} 可用下式表示:

$$W_{Fe} = k_1 f B_m^a + k_2 f^2 B_m^2 \quad (6)$$

式中: k_1, k_2, a 为常数; B_m 为最大磁通。

由定子绕组电动势与磁通的关系可知:

$$E_s = 4.44kf\Phi_g \quad (7)$$

可见,当系统电压保持不变, E_s 近似不变, f 下降, Φ_g 增大, B_m 相应增大,通常 a 值在1.5~2.5之间,因此,系统频率下降时,损耗有较小程度的增加。

铜损 W_{Cu} 的变化表示如下:

$$W_{Cu} = (I_2')^2 (R_1 + R_2) = \frac{E^2 (R_1 + R_2')}{\left(R_1 + \frac{R_2'}{s}\right)^2 + (X_1 + X_2')^2} \quad (8)$$

式中各变量的含义如图1等值电路所示。

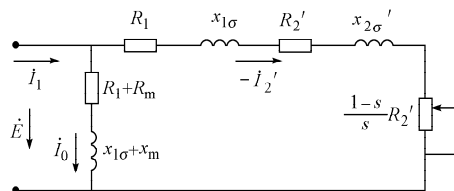


图1 异步电动机L型等效电路

Fig. 1 L-type equivalent circuit for the asynchronous motor

可见,当系统频率发生变化时,若电机稳定运行, s 基本保持不变,电抗值减小, I_2 增大,损耗有所增大。但在电力系统频率有限的变化范围内,电抗值变化不大,损耗的增大很有限。

通风损耗与机械损耗可用下式描述:

$$W_w \propto \left(\frac{f}{f_N}\right)^3 \quad (9)$$

$$W_m \propto \frac{f}{f_N} \quad (10)$$

式中: W_w, W_m 分别为通风损耗与机械损耗。

可见随着系统频率的降低,铁损和铜损会下降。

综上所述,频率发生变化时,损耗的不同构成有不同的变化趋势,铁损与铜损有所增加,但幅度很小,相对负载功率的变化可忽略不计,这一点可通过第3节的测试进一步说明。 W_w, W_m 由于与频率进而转速直接相关,可在负载功率中一并考虑。

3 负荷频率特性的测试

电力系统在正常运行过程中总是力图保证频率偏差在很小的范围内,较大的频率波动数据很难测到。通过人为电网频率扰动,进行负荷频率特性测试,风险很大,且随着电网规模的扩大,测试难度更大。为此,本文利用文献[16]提出的电力扰动发生装置完成不同转矩特性的异步电动机的负荷频率特性的测试。测试结果如下:恒转矩下,计算值与实测值分别为0.924和0.964;线性转矩下,计算值与实测值分别为1.824和1.864;平方转矩下,计算值与实测值分别为2.728和2.768。计算结果与实测结果之间存在的误差主要由有关参数的不确定性造成。

4 综合负荷频率特性的确定

通过现场调研或查阅规划数据,可以得到任一负荷节点下的负荷构成。对异步电动机类负荷,若额定频率及电压情况下负载的机械功率为:

$$\begin{cases} P_{m1} = P_{m01} \left[a_{01} + a_{11} \left(\frac{n}{n_0} \right) + a_{21} \left(\frac{n}{n_0} \right)^2 + a_{31} \left(\frac{n}{n_0} \right)^3 \right] \\ P_{m2} = P_{m02} \left[a_{02} + a_{12} \left(\frac{n}{n_0} \right) + a_{22} \left(\frac{n}{n_0} \right)^2 + a_{32} \left(\frac{n}{n_0} \right)^3 \right] \\ \vdots \\ P_{ml} = P_{m0l} \left[a_{0l} + a_{1l} \left(\frac{n}{n_0} \right) + a_{2l} \left(\frac{n}{n_0} \right)^2 + a_{3l} \left(\frac{n}{n_0} \right)^3 \right] \end{cases} \quad (11)$$

式中:负载机械功率考虑到 3 次方关系, $a_0 \sim a_3$ 为异步电动机机械功率中与转速呈 0 次方至 3 次方关系负载所占的比例,且 $a_0 + a_1 + a_2 + a_3 = 1$,速度已折算到极对数为 1 的情况。

对上述电动机群机械功率等效的原则是频率变化对应的有功变化相同,令

$$P_{m\Sigma} = \sum_{i=1}^l P_{m0i} \quad (12)$$

定义权重系数为:

$$\lambda_i = \frac{P_{m0i}}{P_{m\Sigma}} \quad i = 1, 2, \dots, l \quad (13)$$

则等值电动机机械负载功率特性为:

$$P_{m\Sigma} = P_{m0\Sigma} \left[a_{0\Sigma} + a_{1\Sigma} \left(\frac{n}{n_0} \right) + a_{2\Sigma} \left(\frac{n}{n_0} \right)^2 + a_{3\Sigma} \left(\frac{n}{n_0} \right)^3 \right] \quad (14)$$

式中: $a_{k\Sigma}$ 为转矩系数,

$$a_{k\Sigma} = \lambda_1 a_{k1} + \lambda_2 a_{k2} + \dots + \lambda_l a_{kl} \quad k = 0, 1, 2, 3 \quad (15)$$

采用上述方法,得到综合电动机负载功率机械特性后,很容易得到 K_{pf} 的数值。

由于整个电网静态频率变化的统一性,全网负荷的频率特性可通过对各个节点负荷频率特性加权求和得到。

上述方法主要用于对已有电网的负荷特性的综合,对于规划中的电网,如果负荷构成、性质基本一致,只是负荷水平的增加,也可以采用上述方法预估负荷特性。

5 风力发电机的出力特性

风力发电的出力与风力的速度、方向密切相关。风力所具有的能量与风速的 3 次方成正比。因此,风速的变化给风电机组的出力带来很大的影响。然而,由于风力的自然属性,其大幅度的随机波动在所难免。通过对大量风电场观察记录到的风电出力数据分析表明,风电出力可能在 0 到满出力之间变化。进一步分析表明:在电力系统负荷频率控制(LFC)对应的周期内(10 min~30 min),风电出力就可能会达到满出力。风电厂一旦建成后,为了充分利用风能以最大限度地发挥设备的效能、减少传统能源

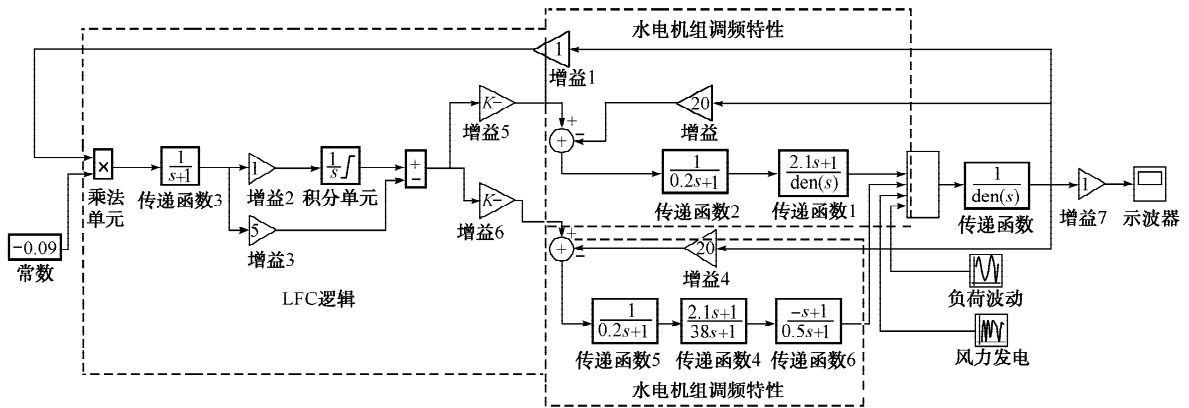
的消耗,总是最大限度地发挥风力机组的出力。因此,含有大量风力发电的电网 LFC 问题研究必须考虑风电的波动特性。

风力发电机组总体上可分为异步风力发电机组和变速恒频机组。异步风力发电机组通常为恒转差运行,当系统频率发生变化,如减小时,滑差增大,机组输出功率增大。由于风能不变,机组必然减速,滑差回落,机组输出回到原功率水平。变速恒频风力发电机组则通过励磁回路的调节,保持机组输出功率的稳定。由此可见,在研究静态频率控制时,风电机组的输出功率可看做只与风能变化有关,而与系统频率无关。

6 实例分析

本文采用引言中提到的中国北方某风力资源丰富的电网作为示例进行分析。该电网负荷构成主要为工业负荷,电力发展规划表明,工业负荷将达到 90%,其中电动机类负荷约 45%。现场调查与规划数据分析表明,该地区电动机负荷大多为泵与风机类负载。随着季节、气温和负荷水平的变化,所占比例在 75%~85%之间变化。其余电动机类负荷均按恒转矩负载考虑。

该地区煤炭资源较为丰富,水力资源相对匮乏,因此,火力发电约占 80%,水力发电占 5%,其余为风电。届时地区负荷最高水平为 9 000 MW,外送功率为 3 000 MW。作为以工业负荷为主的电网,负荷率较高,预计在 80%以上。因此,在这类电网中,风电出力变化成为影响 LFC 的重要因素。该电网目前采用的 LFC 为通过对系统频率偏差的检测和通过 PI 调节,将功率差额依据火电机组与水电机组的特性和容量按一定比例分配。承担调频任务的火电机组与水电机组再通过调速器环节对原动机出力进行调节。为研究问题的便利,电厂依据类别汇总成 3 类,图 2 所示为该电网采用的 LFC 结构图。图中,系统惯量模块中的 K_{pf} 由负荷特性决定。在不考虑负荷频率特性时, K_{pf} 为 0,实际电网的 K_{pf} 可通过上文方法得到,约在 1.15~1.46 间变化。对照考虑和不考虑负荷频率特性时的 LFC 情况,频率偏差的最大值仿真结果见表 1。仿真过程中,未考虑负荷本身波动,并忽略风电机组本身的频率特性。仿真时,风电出力在 10 min 内从 0 到 1.0(标么值)变化称为模式 1(M1),10 min 内从 1.0 降到 0 称为模式 2(M2)。可以看出,不考虑负荷特性时,频率偏差可能越限,随着 K_{pf} 增大,频率偏差减小。



传递函数: $10s+K_{pf}$; 传递函数1: $2.1s^2+7.3s+1$; $den(s)$ 表示 s 的多项式

图 2 系统 LFC 构成示意图

Fig. 2 Diagram of system load frequency control frame

表 1 考虑负荷频率特性时的频率偏差
Table 1 Frequency deviation considering load frequency characteristics

K_{pf}	Δf_{max}	
	M1	M2
0	0.25	0.21
1.15	0.20	0.17
1.46	0.19	0.16

7 结语

本文研究了电网大量引入风电时的频率控制相关问题。通过分析系统频率发生变化时不同负荷的变化规律,指出了直接驱动的电动机类负荷在频率发生变化时不同转矩特性负载及各种损耗的变化趋势。应用所开发的能对典型负荷进行频率特性测试的扰动发生装置测试了不同机械特性负荷的频率特性。

通过一个电网实例给出了电网大量引入风电时频率控制中负荷频率特性的考虑。仿真表明,不考虑负荷特性时,原 LFC 将导致部分时段的频率超限,这意味着必须增大系统的旋转备用及 LFC 的裕度,从而增加了投资,而且,处于旋转备用状态的火电机组的损耗使风能利用的优势大打折扣。准确地考虑负荷特性时,频率偏差可以控制在限值之内。

本文未对风电机组本身的频率特性进行深入分析。另外,对于负荷波动较大的地区,加上风电出力的波动,传统频率控制技术无法满足要求时,如何采取有效的频率控制手段及其控制策略需进一步研究。

参考文献

[1] The Kyoto Protocol. The united nations framework convention

on climate change[R/OL]. [2007-05-02]. <http://unfccc.int/resource/docs/convkp/kpeng.pdf>, 1997.

[2] Energy Information Administration. Renewable energy annual [EB/OL]. [2007-05-06]. <http://www.eia.doe.gov>, 2005.

[3] The European Wind Energy Association (EWEA). Wind energy-the facts; Vol 5, market development [EB/OL]. [2007-05-02]. <http://www.ewea.org>.

[4] KOBAYASHI H, TAKIGAW K, HAYASHIMOTO E, et al. Utility interconnection techniques for dispersed residential photovoltaic systems. IEEJ Trans on Power and Energy, 1993, 113(8): 129-134.

[5] RHO D, KITA H, NISHIYA K, et al. Voltage regulation methods based on an extended approach and neural networks for distribution systems. IEEJ Trans on Power and Energy, 1997, 117(3): 117-122.

[6] THIRINGER T. Integration of large sea-based wind parks — how much power electronic devices are needed in order to avoid power quality problems on the grid? IEEE Trans on Power Delivery, 2000, 15(6): 1277-1279.

[7] POURBEIK P, KOESSLER R J, DICKMANDER D L, et al. Integration of large wind farms into utility grids; Part 2 performance issues// Proceedings of IEEE Power Engineering Society General Meeting; Vol 3, Jul 13-17, 2003, Toronto, Canada; 1520-1525.

[8] RONSTEN G, THOR S E, GANANDER H, et al. Evaluation of loads, power quality, grid interaction, meteorological conditions and power performance of the first Swedish offshore wind farm at Bockstigen// Proceedings of Offshore Wind Energy in Mediterranean and Other European Seas, Apr 13-14, 2000, Syracuse, Italy.

[9] 雷亚洲. 与风电并网相关的研究课题. 电力系统自动化, 2003, 27(8): 84-89.

LEI Yazhou. Studies on wind farm integration into power system. Automation of Electric Power Systems, 2003, 27(8): 84-89.

[10] 王志群, 朱守真, 周双喜, 等. 分布式发电对配电网电压分布的影响. 电力系统自动化, 2004, 28(16): 56-60.

WANG Zhiquan, ZHU Shouzhen, ZHOU Shuangxi, et al.

- Impacts of distributed generation on distribution system voltage profile. *Automation of Electric Power Systems*, 2004, 28(16): 56-60.
- [11] 梁有伟,胡志坚,陈允平. 分布式发电及其在电力系统中的应用研究综述. *电网技术*, 2003, 27(12): 71-75, 88.
LIANG Youwei, HU Zhijian, CHEN Yunping. A survey of distributed generation and its application in power system. *Power System Technology*, 2003, 27(12): 71-75, 88.
- [12] 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. *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. *Automation of Electric Power Systems*, 2006, 30(15): 10-14.
- [13] LALOR G, MULLANE A, O' MALLEY M. Frequency control and wind turbine technologies. *IEEE Trans on Power Systems*, 2005, 20(4): 1905-1913.
- [14] MURAKAMI A, YOKOYAMA A, TADA Y. Basic study on battery capacity evaluation for load frequency control(LFC) in power system with a large penetration of wind power generation. *IEEJ Trans on Power and Energy*, 2006, 126(2): 236-241.
- [15] IEEE Task Force on Load Representation for Dynamic Performance. Load representation for dynamic performance analysis. *IEEE Trans on Power Systems*, 1993, 8(2): 472-482.
- [16] 韩民晓,金秀月,潘丽珠. VSI型电力扰动发生装置的实现. *电工技术杂志*, 2004, 96(10): 65-67.
HAN Minxiao, JIN Xiuyue, PAN Lizhu. Voltage source inverter based interruption generator. *Electrotechnical Journal*, 2004, 96(10): 65-67.

韩民晓(1963—),男,通信作者,教授,博士生导师,主要研究方向:电力系统分析与控制及电能质量。E-mail: hanminxiao@263.net

崔军立(1980—),男,硕士,主要研究方向:电力系统负荷建模。

姚蜀军(1973—)男,硕士,讲师,主要研究方向:电力系统 FACTS技术及柔性化供电技术。

Frequency Control Characteristics for a Power System with Large Amounts of Wind Power

HAN Minxiao¹, CUI Junli¹, YAO Shujun¹, Lie XU²

(1. North China Electric Power University, Beijing 102206, China; 2. Queen's University of Belfast, UK)

Abstract: Frequency controls of an electric power system must be carefully studied when large amounts of wind power is introduced. Based on the studies on the frequency characteristics of induction motors (IMs), a voltage sourced interruption generator is developed for IM frequency characteristics studies with different torque-speed characteristics. A generalized IM model is synthesized using the weighted summation technique and wind power generators frequency characteristics are analyzed. Studies on a power system demonstrate that the system frequency deviation is smaller when the wind farms frequency control characteristics are taken into account than not.

Key words: wind power; power quality; frequency control; load character