

DOI: 10.3969/j.issn.1006-4729.2015.05.019

我国电网接纳风电的最大容量及相应的对策研究

王龙辉¹, 李永光¹, 周 侣², 马昕霞¹, 张丽华¹

(1. 上海电力学院, 上海 200090; 2. 国网杭州供电公司, 浙江 杭州 310009)

摘 要:以我国电网为研究对象,综合考虑全网中火电、水电以及核电对风电调峰的影响,运用电网中的供需平衡关系和发电机组调峰能力来计算我国电网在现有负荷下能够接纳的最大风电容量.该方法既满足电网的负荷平衡,又不会有过剩电网出力,计算结果具有很高的可信度.依据该方法计算出2013年我国电网容纳风电容量为 2.03×10^8 kW,考虑电网的安全性后缩减为 1.29×10^8 kW,大于现有的风电并网容量 7.72×10^7 kW,由此可见,我国风电有很大的发展空间.

关键词:风电并网; 接纳能力; 调峰; 经济补偿

中图分类号: TK89; TM76

文献标志码: A

文章编号: 1006-4729(2015)05-0487-05

Research on Maximum Wind Power Capacity Integrated Into Power Grids and Corresponding Countermeasures in China

WANG Longhui¹, LI Yongguang¹, ZHOU Lü², MA Xinxia¹, ZHANG Lihua¹

(1. Shanghai University of Electric Power, Shanghai 200090, China;

2. State Grid Hangzhou Power Supply Company, Hangzhou 310009, China)

Abstract: A method based on the supply-demand balance and peak load regulation of power grid impacted by thermal power, hydropower and nuclear power, is used to calculate the maximum wind power capacity that the power system can accept in working condition. The result is reliable for its method that both guarantees the balance of power grid load and avoids excessive power output. The wind power capacity that can be integrated into power grids is 2.03×10^8 kW in 2013, which is reduced to 1.29×10^8 kW considering the safety of power grid, still larger than the existing wind power capacity 7.72×10^7 kW, indicating that China's wind power development has a large potential.

Key words: wind power integration; capacity; peak load regulation; economic compensation

我国风能资源丰富,根据2009年中国气象局开展的风能资源勘查与评价分析结果,我国风能开发潜力逾 2.5×10^9 kW.^[1]根据国家能源局公布的数据,截止到2013年底,我国风电装机容量为

1.37×10^8 kW,装机容量仅占可开发风能的5.48%,发展潜力巨大.并网容量为 0.77×10^8 kW,年发电量为 1.349×10^{11} kW,全国弃风量为 1.6231×10^{10} kW,平均弃风率为11%.由上述数据

收稿日期: 2015-04-28

通讯作者简介:李永光(1957-),男,博士,教授,湖南长沙人.主要研究方向为风能的利用. E-mail: liyongguang@shiep.edu.cn.

基金项目:上海市科学技术委员会资助地方能力建设项目(12250501000).

可知,目前电网中存在弃风限电问题,这制约了我国风电产业的发展.

要解决电网弃风限电问题,必须了解电网中产生弃风的原因.我国风电场主要建设在“三北”地区,这些地区风力资源丰富,但是电网薄弱,负荷较小.^[2]因此,风电并网需要考虑两种形式:一是将风电并入风电场所在地区的电网;二是将风电远距离输送到其他电网.由于电网接纳风电的能力与电网负荷成正比,^[3]在风电场所在地区用电负荷小,电网消纳风电的能力有限,如果风电全部用在这些地区会造成严重的弃风现象.在远距离输送过程中,联络线输送能力的不足也是造成弃风现象的原因.

由此可知,在全国电网互联的情况下,解决弃风问题就是要增强电网接纳风电的能力,而电网接纳风电最大容量是电网接纳风电能力的一个重要指标.

国内外对于风电并网容量的计算有很多研究,主要方法有以下3种.一是动态仿真法,^[4-6]该方法是在确定的电网中接入假设的风电容量来验证电网是否稳定,再进行校验得到电网中容纳风电的容量.由于受计算量的限制,该方法无法全面考虑系统的各种运行方式、扰动情况和风况条件,只能用几种典型的运行方式求取风电场最大容量.二是数学优化法,^[7-8]该方法可以考虑多种约束条件,建立目标函数求得风电并网容量,然后运用仿真系统对计算结果及优化做出验证.但该方法没有考虑风电并网的动态约束,而且只能计算出电网在某种特定运行方式下的风电并网容量.三是频率约束法,^[9]在电网系统较小的情况下,风电的随机波动性和不稳定性对电网频率的影响较大,这时限制风电穿透功率的主要因素是频率波动和稳定性.该方法考虑到风电的不稳定性,同时考虑整个电网的安全性和经济性,这种分析与电网结构没有关系,只与电网的负荷水平、电源性质及组成有关.

本文根据供需平衡关系^[10]和发电机组调峰能力^[3,11-12]建立优化模型,计算我国电网接纳的最大风电容量.该方法从电网负荷的角度出发,用电网调峰能力来计算电网的风电接纳容量,不仅简化了求解模型,而且具有很高的可信度.计算的结果可用于指导我国风电场建设规模以及是否增加风电并网容量,使资源得到有效的利用.

1 电网中接纳风电能力的计算

1.1 电网中供需平衡关系

为了保证电力系统运行过程中的电能质量,电网需要满足在额定频率下系统有功功率平衡的要求,即所有发电机可用的有功功率之和至少等于系统负荷在额定频率下所吸收的全部有功功率、全部网络损耗和全部厂用电的总和.^[10]除了满足有功功率平衡的要求外,在系统中还要有适当的备用容量.备用容量包括负荷备用容量、事故备用容量、检修备用容量和国民经济备用容量.因此,在电网中发电机的有功功率应大于电网中最大负荷、线路损耗和总有功功率备用容量之和,其关系式为:

$$\sum_{i=1}^m P_{\text{G}Ni} - P_{\text{Lmax}} - \Delta P_{\text{max}} - P_{\text{R}} \geq 0 \quad (1)$$

式中: $P_{\text{G}Ni}$ ——发电机 i ($i=1,2,3,\dots,m$) 的可用有功功率,kW;

m ——系统中发电机的总数;

P_{Lmax} ——全系统总的最大负荷,kW;

ΔP_{max} ——全系统的最大有功功率损耗和厂用电,kW;

P_{R} ——全系统总有功功率备用容量,kW.

1.2 接入风电的电网接纳能力计算

在研究电网的接纳风电量中,本文主要根据电网的调峰能力来计算电网接纳风电的能力.风电并网后的调峰示意图如图1所示.

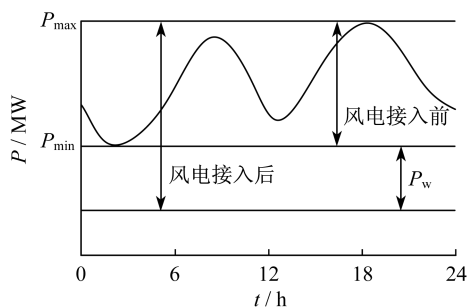


图1 风电并网后的电网调峰示意

由图1可知,风电并网后,由于风力发电的不稳定性和不可预测性,需要有一定量的备用设备为其调峰.

在风电并网后,除了常规发电机组外,风电在

电网中也成为了供电电源的一部分,随着风电场的规模越来越大,装机容量越来越多,并网风电在电网中逐渐成为主要的电源.在电网有功功率平衡关系式中要考虑风电因素,由于风力发电在电网中符合负调峰特性,^[11]则式(1)变化为:

$$\sum_{i=1}^m P'_{\text{GNi}} - \sum_{j=1}^n P_{\text{Wj}} - P_{\text{Lmax}} - \Delta P_{\text{max}} - P_{\text{R}} \geq 0 \quad (2)$$

式中: P'_{GNi} ——风电加入后常规机组的输出功率, kW;

P_{Wj} ——电网中接入风电的出力, kW.

由于风力发电的随机波动性会对电网产生一定影响,要想在负荷一定的情况下,使电网中的发电量和负荷供求平衡,则需要对常规机组进行调峰.设 k 为常规机组的调峰系数,则调峰系数 k 的表达式为:^[3]

$$k = 1 - \frac{P_{\text{机组最小出力}}}{P_{\text{机组额定出力}}} \quad (3)$$

则式(2)可以改写为:

$$\sum_{j=1}^n P_{\text{Wj}} \leq P_{\text{Lmax}} + \Delta P_{\text{max}} + P_{\text{R}} - (1-k) \sum_{i=1}^m P'_{\text{GNi}} \quad (4)$$

式(4)就是电网中接纳风电能力的公式.在电网中风电发生变化后,常规机组就开始调峰,风电的出力变化要在常规机组的调峰能力以内,电网才能正常工作.

2 全国电网中接纳风电容量的计算

2.1 调峰系数 k 的确定及调峰容量的计算

在关于全国电网接纳风电容量的计算中,采用中国电力企业联合会公布的数据(2013年全国全年用电量和装机容量)来计算,全年全社会用电量为 5.32×10^{12} kWh.表1为2013年我国发电装机容量和设备平均利用小时数.

表1 2013年我国装机容量和利用小时数

类 别	装机容量/ $\times 10^8$ kW	设备利用小时数/h
火 电	7.900 0	5 128
水 电	2.600 0	2 151
风 电	0.754 8	2 080
太阳能发电	0.147 9	588
核能发电	0.146 1	7 893

机组调峰系数 k 是表征电网火电机组后夜降出力、参与电网调峰能力的参数.电网中火电机组的调峰能力与接纳风电量直接相关,小于等于100 MW

的机组调峰系数为0.1,150 MW和200 MW机组调峰系数为0.4,大于等于300 MW的机组调峰系数为0.5.^[3]设水电的调峰系数为1,且全部用于调峰.表2为电网中发电机组调峰能力.

表2 火电发电机组调峰能力

机组容量/MW	机组所占比例/%	调峰系数	机组容量 调峰容量	
			10^8 kW	
≤ 100	5.77	0.10	0.56	0.06
200	10.82	0.40	1.05	0.42
≥ 300	83.41	0.50	8.10	4.05

由表2可知,不同的机组容量其调峰系数也不一样,加权平均后调峰系数 $k=0.466$.2013年底全国总装机容量为 12.5×10^8 kW,发电设备利用小时数为4 511 h,调峰总容量为全国总装机容量与调峰系数的乘积,即 $P_z = 5.83 \times 10^8$ kW.

2.2 系统中最大负荷的确定

在计算全网负荷时,以全年12个月的负荷最小值作为全国电网负荷,得出电网中容纳风电的容量,表3为2013年每个月的平均用电量.

表3 2013年每月平均用电量 10^8 kWh

月份	全社会用电	月份	全社会用电
1~2月平均	3 946	8月	5 102
3月	4 247	9月	4 449
4月	4 164	10月	4 373
5月	4 270	11月	4 485
6月	4 388	12月	5 190
7月	4 940		

由表3可知,我国总用电量在全国范围内1~2月份平均用电量最低为 3.946×10^{11} kWh,平均负荷为月平均用电量除以时间,则1~2月份平均负荷为 $P_{\text{Lmax}} = 5.83 \times 10^8$ kW.

2.3 有功功率的备用容量和线路损耗的计算

在电厂装机容量中包含备用容量,负荷备用容量一般取负荷的2%~5%,事故备用容量取系统最大负荷的5%~10%.^[11]取电厂的备用容量的最大值,即负荷备用容量取负荷的 $R_1 = 5\%$,事故备用容量取系统最大负荷的 $R_2 = 10\%$.则总的备用容量为:

$$P_{\text{R}} = (R_1 + R_2) P_{\text{Lmax}} = (5\% + 10\%) \times 5.48 \times 10^8 = 8.22 \times 10^7 \text{ kW} \quad (5)$$

厂用电和线路损耗中,输电网络的总有功功率损耗主要是线路和变压器中的功率损耗,在系统最大负荷期间约占总有功负荷的 6% ~ 10%。取线路损耗的最大值 $\eta = 10\%$ 。厂用电中,火电厂约为 5% ~ 8%,水电厂约为 0.1% ~ 1%,核电厂约为 4% ~ 5%,则分别取厂用电的最大值。则厂用电和线路损耗的功率为:

$$\Delta P_{\max} = P_{L\max} \times 10\% + P_m \times 8\% + P_s \times 1\% + P_h \times 5\% \quad (6)$$

式中: P_m ——全网火电发电量;

P_s ——全网水电发电量;

P_h ——全网核电发电量。

在 2013 年 1 ~ 2 月份中火电发电量为 6.34×10^{11} kWh,水电发电量为 8.2×10^{10} kWh,核电发电量为 1.55×10^{10} kWh,将发电量除以每月时间得到的平均厂用电和线路消耗功率,带入式(6)得:

$$\Delta P_{\max} = 0.91 \times 10^8 \text{ kW}$$

2.4 接纳风电容量的计算

由表 2 可得,参与调峰的机组总容量 $\sum_{i=1}^m P'_{\text{GNI}}$ 为 9.70×10^8 kW,将上面计算出来的 $\Delta P_{\max}$ 和 P_R 的数值代入式(4)得出:

$$\sum_{j=1}^n P_{\text{Wj}} \leq 2.03 \times 10^8 \text{ kW} \quad (7)$$

由式(7)结果可知,在不考虑电网线路限制和经济调度的条件下,依据电网调峰来求得接纳风电的能力,求出的值约为 2.03×10^8 kW,是我国现有并网容量 7.72×10^7 kW 的 2.63 倍。

3 风电接入电网后的影响分析

为了使风电场并入电网后能正常运行,人们关心的主要问题是电力系统的某个节点能接纳风电场的最大容量,以及已有电网中允许接入的最大风电装机比例。电力系统某节点容纳风电的容量主要取决于该点的电压强度,而衡量某节点电压强度的指标是短路容量。^[13] 短路电流用 I 表示,线电压用 U 表示,则短路容量为:

$$S_{\text{sc}} = \sqrt{3} UI \quad (8)$$

在电力系统稳定性分析中,主要有静态负荷模型和动态负荷模型两种。本文采用静态负荷模型来进行电网中容纳风电容量的验证。静态负荷

主要由恒阻抗、恒电流、恒功率 3 部分组成,考虑负荷的频率调节效应,^[14] 则表达式为:

$$P = P_0 \left[a_1 \left(\frac{U}{U_0} \right)^2 + a_2 \frac{U}{U_0} + a_3 \right] (1 + \Delta f L_P) \quad (9)$$

$$Q = Q_0 \left[a_4 \left(\frac{U}{U_0} \right)^2 + a_5 \frac{U}{U_0} + a_6 \right] (1 + \Delta f L_Q) \quad (10)$$

式中: P_0, Q_0, U_0 ——额定有功功率、无功功率和电压;

P, Q, U ——给定运行条件下实际有功功率、无功功率和电压;

$a_1 \sim a_6$ ——负荷随电压变化的系数;

L_P, L_Q ——频率变化 1% 时有功和无功负荷变化百分数。

依据《风电场接入电力系统技术规定》第 10.1 条和 11.1 条,电压偏差范围为风电场并入电网点的电压正、负偏差绝对值之和不超过标称电压的 10%。在正常运行方式下,其电压偏差应在标称电压的 -3% ~ +7%。风电场的闪变值满足 GB/T12326 的规定,谐波值满足 GB/T14549 的规定,三相电压不平衡度满足 GB/T15543 的规定。

风电场接入电网后,风电场应在电力系统频率范围内按规定运行,如表 4 所示。^[15]

表 4 风电场在不同频率范围内的运行规定

电力系统频率 范围/Hz	要 求
<48	根据风电场内机组允许运行的最低频率而定
48 ~ 49.5	每次频率低于 49.5 Hz 时,要求风电场具有至少运行 30 min 的能力
49.5 ~ 50.2	连续运行
>50.2	每次频率高于 50.2 Hz 时,要求风电场具有至少运行 5 min 的能力,并执行电力系统调度机构下达的降出力或高频率切机策略,不允许停机状态的风电机组并网

自然功率又称为波阻抗负荷,是表示输电线路输电特性的一个特征参量,用以估计超高压线路的运行特性。特高压线路和高压线路的自然功率相差很大。1100 kV 线路的自然功率约为 5280 MW,500 kV 线路的自然功率约为 920 MW,220 kV 线路的自然功率约为 175 MW。^[15]

未来我国电网朝着特高压电网发展,“三华”地区是我国电力负荷中心,将构建“三华”特高压

同步电网.在这个电网中有显著的错峰、降低峰谷差,以及充分利用水电调节的能力,有利于提高风电的消纳能力.预计2020年在“三华”地区特高压电网消纳风电的能力约为 1.03×10^8 kW.^[1]我国2013年电厂总装机容量为 1.25×10^9 kW,按照我国电网消纳风电比例,求出容纳风电能力约为 1.29×10^8 kW,是现有风电并网容量的1.67倍.在不考虑电网稳定性的情况下,依据电网中的供需平衡和发电机组调峰能力计算出电网容纳风电能力为 2.03×10^8 kW,考虑电网稳定性后,对计算结果进行修正,最终得到电网容纳风电能力为 1.29×10^8 kW,减少了 7.40×10^7 kW的容量.

4 限制风电并网容量的因素分析及建议

根据现有的研究结果可知,限制风电并网容量的因素主要有发电机组的调峰能力和用电负荷,以及风电场的接入点和经济调度等.

由式(4)可知,增加电网中的用电负荷可以增加风电接入电网的容量.我国风电场主要集中在偏远地区,该地区电网负荷量小,这将限制风电的并网容量.风电的远距离输送是我国风力发电的主要现状,为提高风电并入电网容量,可以使风电在接入电网的局部地区就地消纳,消纳不了的电量通过电网中的联络线外送其他地区电网,这样就等同于风电场接入电网的负荷在增加,提高了风电的并网容量.并入电网的风电场呈分散式也将提高电网容纳风电的容量,其优势在于就地消纳性高,这将为建设风电场和风电并网提供很好的借鉴作用.

在电网中,由于不同类型和不同容量的发电设备有不同的调峰能力,大容量机组调峰能力优于小容量机组,水力发电厂发电启停方便,可快速参与电网调峰,且调峰能力大于一般火电厂,因此应大量建设调峰能力强的调峰机组,提高电网的调峰能力来满足调峰需求.在研究电网调峰分配问题上,一些研究者用风力发电量的多少来指导大规模风电并网后电力系统的经济调度.^[16-17]

采取有效的调度方式,对增大电网中风电容量至关重要.在市场机制作用下,参与调峰的发电企业的经济效益将不能最大化,应该制定相应的调峰权和调峰权交易规则,^[18]使参与调峰电厂能够在不满发的情况下得到一定的政府补助,实现风电并

入电网的最大化.在解决上述问题后,我国电网接纳风电能力将大大提高,新能源的利用比例也将增大,可适当缓解能源危机,改善环境问题.

5 结 论

(1) 根据我国2013年供电数据,考虑电网中供需平衡关系和发电机组调峰能力,计算出我国现有电网中可以容纳风电容量为 1.29×10^8 kW,仍可增加67.19%的风电并网容量,风电发展仍有很大潜力.

(2) 提高电网接纳风电能力的措施有:在电网中建设调峰能力强的发电机组,并对参与调峰的机组进行合理调度;增加电网中的用电负荷和加强联络线的通电能力建设,将偏远地区风电输送到负荷大的地区;将风电场分散接入电网,有助于提高电网消纳风电的能力.

(3) 在风电并网中,大规模发电机组参与调峰势必带来不合理的经济调度问题,由于不能使发电企业亏损,因此要对各个发电企业的调峰合理分配,并给予适当的经济补偿.

参考文献:

- [1] 刘振亚.中国电力与能源[M].北京:中国电力出版社,2012:104-180.
- [2] 董丹丹,赵黛青,廖翠萍.我国的风电技术和风电发展[J].可再生能源,2007,25(3):72-75.
- [3] 徐也童.大规模风电并网稳定性研究及调度方案设计[D].北京:华北电力大学,2012.
- [4] 吴俊玲,周双喜,孙建锋,等.并网风力发电场的最大注入功率分析[J].电网技术,2004,28(2):28-32.
- [5] MORREN J, HAAN De S W H. Maximum penetration level of distributed generation without violating voltage limits[J]. Smart Grids for Distribution, 2008. IET-CIRED. CIRED Seminar, 2008(23-24):1-4.
- [6] 申洪,梁军,戴慧珠.基于电力系统暂态稳定分析的风电场穿透功率极限计算[J].电网技术,2002,26(8):8-11.
- [7] 郑国强,鲍海,陈树勇.基于近似线性规划的风电场穿透功率极限优化的改进算法[J].中国电机工程学报,2004(10):70-73.
- [8] 雷亚洲,王伟胜,印永华.一种静态安全约束下确定电力系统风电准入功率极限的优化方法[J].中国电机工程学报,2001,21(6):25-28.
- [9] 宋联庆,何进武,闫广新,等.并网风电场穿透功率极限确定方法探讨[J].可再生能源,2009(3):36-39.
- [10] 夏道止.电力系统分析[M].北京:中国电力出版社,2010:119-121.