

考虑经济约束的西部山区风电接纳能力研究

刘文霞,李盈枝,李鹤,赵天阳,张建华

(华北电力大学 新能源与电力系统国家重点实验室,北京 102206)

摘要: 定量分析了风电并网引起的风电场和电网的成本效益和环境效益。以经济性最优为目标,计及盈利能力约束和电网安全运行约束,建立了风电最佳接纳能力优化模型,并采用微分进化算法对模型进行了求解。在 RTS79 算例中,采用所提规划方法和传统考虑技术因素的风电并网规划方法进行了对比分析,结果表明采用所提方法求得的风电接纳能力较小,经济性较好,证明了所提方法的有效性和实用性。

关键词: 风电; 成本-效益分析; 环境效益; 风电接纳能力; 微分进化算法; 优化; 模型; 经济分析

中图分类号: TM 614

文献标识码: A

DOI: 10.3969/j.issn.1006-6047.2014.08.004

0 引言

随着能源安全问题和环境问题的日益凸显,我国加大了对可再生能源发电的开发力度,其中风电的发展最快^[1-2]。风电虽然具有优良的减排效益,但由于其出力的随机性、波动性,风电并网必然给电网的安全稳定性带来挑战^[3-5],这也使得其发电经济性低于常规火力发电。我国可再生能源法规定电网必须全额接纳风电,这一政策要求电网必须为此提供配套的并网建设、增加运行备用和调峰代价,这给电网企业带来了一定的经济负担,使得电网企业接纳风电的积极性不高,造成风电装机容量过剩、利用率低等问题。因此,考虑经济性因素的电网风电接纳能力成为关注的焦点。

影响风电接纳能力的因素可以分为电网和风力发电自身 2 个方面。其中电网方面包括系统负荷备用率、系统负荷水平、负荷特性、电源结构、调峰能力及风电送出电网规划;风电自身因素主要包括风电波动性、低电压穿越能力、风电场动态无功补偿和风电功率预测精度^[6-9]。目前,国内外对风电接纳能力的研究主要集中于考虑输电能力约束和电网调峰能力约束的技术层面。文献[6]提出了一套基于电源结构、负荷特性和调峰能力的电网接纳能力评估体系。根据发电可靠性指标计算出备用容量,然后考虑低谷常规机组调峰能力评估电网接纳风电能力。文献[7]提出了综合考虑调峰约束和电网输送能力约束的风电电量消纳预测方法,根据各输送断面的可传输容量和电网调峰裕度来计算风力发电量和限电量。文献[9]引入月不均衡系数,以平均调峰裕度代替最大调峰裕度,使得所得的风电接纳能力更准确。Magni P Pálsson 和 Trond Toftevaag 提出了一种图形方法求解系统可接纳风电的能力。该方法为每一

个接入点建立了一个容量表,结合电压极限、电压稳定和容量限制等因素定义了拟接入点的可接纳容量^[10]。

我国西南部属整体风资源缺乏地区,然而部分山区风资源丰富,由于山区地理环境复杂和灾害频发(冰灾)导致风电开发投资较大,利用率受限;而且风电多在末端结构薄弱电网多点接入,给电网电压带来较大影响。因此,研究该地区风电并网接纳能力不能单纯考虑安全和技术问题,必须计及风险和经济效益。目前,相关研究均未涉及企业(风电场、电网企业和常规电厂)的经济效益,导致实际运行中影响了风电的消纳。本文的研究目标是:在技术和盈亏能力双重约束下,以风电场和电网两者联合经济效益(含环境效益)最大为目标,探究区域电网风电多点并网的最佳接纳能力,为西部山区风电建设决策提供技术支撑。

1 各主体成本-效益分析

1.1 风电场成本-效益

风电场成本-效益模型如图 1 所示。风电投资成本主要来自于 2 个方面:一是风电项目初期建设成本,二是风电项目运行维护费用^[11]。风电场建设包括

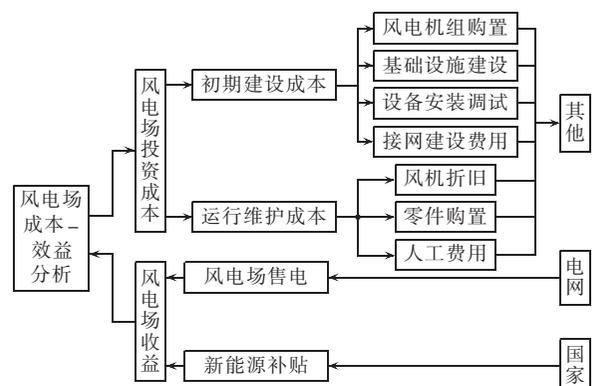


图 1 风电场成本-效益

Fig.1 Cost-benefit of wind farm

收稿日期:2013-08-15;修回日期:2014-07-07

基金项目:国家科技支撑计划项目(2013BAA02B02)

Project supported by the National Science and Technology Support Program(2013BAA02B02)

风电机组设备的购置、基础设施建设、风电机组安装调试、风电接网建设等工作。风电机组的运行维护费用一般取决于风电机组的性能、寿命及零配件的价格。风电场的收益来源于上网发电和国家给予的新能源补贴。

综上所述,单个风电场的年净收益为:

$$V_w = I_{w,s} + I_{w,co} - \frac{C_{w,c}\eta}{1 - (1+\eta)^{-T_w}} - C_{w,op} \quad (1)$$

其中, V_w 为风电场年净收益; $I_{w,s}$ 为风电场年售电收益; $I_{w,co}$ 为风电场的年补偿收益; $C_{w,c}$ 为风电场初期建设成本; $C_{w,op}$ 为年运行维护成本; η 为银行利率, T_w 为风电场的寿命年限, $\eta/[1-(1+\eta)^{-T_w}]$ 为等效年值系数。

1.2 电网接纳风电的成本-效益

电网成本-效益模型如图 2 所示。风电出力具有随机性和波动性,它的接入必定会给电网带来包括差额电价、配套设备、备用容量等^[12-13]经济损失,所以电网在接纳风电之前应该充分考虑风电所带来的经济效益。

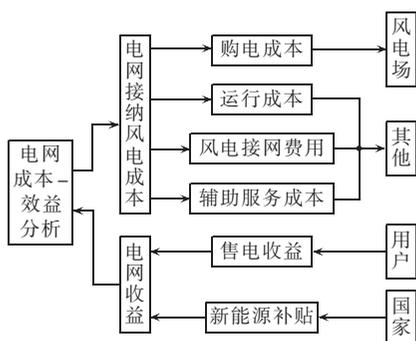


图 2 电网成本-效益模型

Fig.2 Cost-benefit model of grid

电网接纳风电净收益模型可以表示为:

$$V_g = I_{g,s} + I_{g,co} - I_{w,s} - \frac{C_{g,tr}\eta}{1 - (1+\eta)^{-T_1}} - C_{g,an} - C_{g,op} \quad (2)$$

其中, $I_{g,s}$ 为电网的年售电收益; $I_{g,co}$ 为电网年补偿收益; $C_{g,tr}$ 为接网费用,此处表示为接纳风电新建的接网线路费用; T_1 为新建线路的运行年限; $C_{g,an}$ 为电网年辅助服务成本; $C_{g,op}$ 为电网年运行成本,此处仅考虑网损成本^[14]。

1.2.1 输电成本

风电并网有 2 种形式:直接接入变电站和经升压站升压后接入变电站。对于第一种并网形式,根据规定,风电场和变电站之间的输电线路费用由电网企业承担;对于第二种并网方式,则升压站至变电站之间的输电线路由电网承担。风电并网引起的电网输电成本主要是指上述输电线路的建设成本。输电线路总成本可看作是长度的线性函数。

1.2.2 辅助服务成本

辅助服务是指为维护电力系统的安全稳定运

行,保证电能质量,除正常电能生产、输送、使用外,由并网发电厂提供的服务。由风电并网引起的辅助服务包括调峰、旋转备用、无功调压、调频和黑启动^[15]。因为本文的研究是在风电接入大电网时展开的,风电并网不会引起频率的大幅波动,可忽略调频成本;同时也不需为风电的接入而单独设置黑启动机组,因此黑启动成本也不予以考虑,而备用成本模型作为本文研究的重点之一将在第 2 节中进行探讨。

1.2.2.1 深度调峰成本

深度调峰是指为适应负荷的变化,调整机组出力使其运行超越了基本调峰的范围,达到了一定的调峰深度。当常规机组进行深度调峰来保证电网安全稳定时,就产生了系统深度调峰成本:

$$C_{g,d} = W_{G,d} p_{dl} \quad (3)$$

其中, $C_{g,d}$ 为深度调峰成本; p_{dl} 为单位调峰成本; $W_{G,d}$ 为常规电源参与深度调峰减少的发电量,即机组出力超出基本调峰的那部分发电量,如式(4)所示。

$$W_{G,d} = \int_{K_B P_{GN} \geq P_{G,actual}} (K_B P_{GN} - P_{G,actual}) \quad (4)$$

其中, K_B 为深度调峰系数,一般取 50%~60%; P_{GN} 为调峰机组额定容量; $P_{G,actual}$ 为机组实际有功出力。

1.2.2.2 调压成本分析

由于风电出力的波动性,风电场的电压水平波动范围较大,风电汇集的变电站的调压压力增大。为了稳定风电场出口处的电压水平,常需要在风电汇集的变电站处增加动态无功补偿装置,如静止无功补偿器,这就会增加电力系统的调压成本。

1.3 环境效益

在全球环境日益恶化和节能减排的背景下,环境效益已经成为风电最突出的优势,因此本文将把环境效益加入到目标函数中,作为风电并网引起的系统收益的一个子项,而对社会效益的其他方面暂未考虑。风电的污染物排放减少主要由风电代替常规能源发电所引起污染物排放减少和降低系统网损所避免的污染排放组成:

$$\Delta H_{emi,k} = \int_0^T \Delta P_{loss}(t) \varepsilon_k dt + \int_0^T \varepsilon_k P_{w,t} dt \quad (5)$$

其中, $\Delta H_{emi,k}$ 为风力发电引起的第 k 种污染物减少量; T 为减排时间; ΔP_{loss} 为风力发电引起的网损减少量; ε_k 为常规能源发电的污染排放特性; $P_{w,t}$ 为 t 时刻的风电功率。因此,可以得到风电的环境效益为:

$$I_{emi} = \sum_{k=1}^K \Delta H_{emi,k} \lambda_k \quad (6)$$

其中, I_{emi} 为风电的环境效益; K 为污染物排放的种类; λ_k 为第 k 种污染排放物的环境价值。

表 1 是火电的几种重要污染物的环境价值。

表 1 主要污染物的环境价值

Tab.1 Environmental values of main pollutants 元/kg

污染物	环境价值	污染物	环境价值
NO _x	8	CO ₂	0.023
CO	1	SO ₂	6

2 备用成本

充足有效的备用是电力系统应对各种不确定性因素、实现安全可靠运行的保障。含大规模风电的电力系统中,除机组故障和系统负荷预测误差等因素,风电的随机性、间歇性也会使风电功率预测存在较大误差,系统随机性增大。因此,需要研究新的备用容量设置方法来弥补因风电波动性造成的系统供电和负荷的不平衡。目前含大规模风电的电力系统备用决策方法主要有标准差法、可靠性方法、成本效益法和基于风险价值的方法。本文采用备用容量满足系统安全运行要求的概率作为系统可靠性指标^[16]来研究备用容量设置。满足置信度水平 $\alpha \in (0,1)$ 的风险备用需求可表示为:

$$D_{Res} = \max \left\{ \varepsilon \in \mathbf{R} : \int_{D_{Res}(y) \leq \varepsilon} p(y) dy \leq \alpha \right\} \quad (7)$$

其中, α 为备用容量满足系统运行的置信度水平; D_{Res} 为风险备用需求; ε 为一个设定值; y 为一个随机变量; $p(y)$ 为 y 的概率密度函数。从物理意义上讲, $1-\alpha$ 可看作系统失负荷概率所允许的上限值。

2.1 风电预测误差

风电出力预测方法按数学模型分为持续预测方法、ARMA 模型法、卡尔曼滤波法和智能方法等。本文采用基于风速预测的风功率预测方法,抽取 8760 h 风速数据,由风电功率曲线得到 8760 个风功率预测值,进而计算每小时预测误差大小。

文献^[17]中指出风电功率预测偏差服从正态分布。基于此结论,本文将对每 24 个抽样点,即一天的风功率预测误差数据利用矩估计法做一次正态分布拟合,并调整一次备用容量大小。

2.2 风电备用模型

本文仅考虑大规模风电接入引起的新能源备用,可认为风电出力预测误差对备用的需求量同样为概率密度函数,且和预测误差服从同一正态分布。根据式(7)可以得到风电的最小备用容量如下:

$$\int_{-\infty}^{D_{Res}} \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_{wind,d}} \exp \left[-\frac{(\xi - \mu_{wind,d})^2}{2\sigma_{wind,d}^2} \right] d\xi = \alpha \quad (8)$$

其中, D_{Res} 为系统为接纳风电所需新增日备用容量; $\mu_{wind,d}$ 和 $\sigma_{wind,d}^2$ 分别为预测误差的均值和方差。

所有提供备用容量的常规机组都会得到相应的容量补偿,这部分补偿就是电网为接纳风电产生的备用成本:

$$C_{res} = \sum_{d=1}^{365} (D_{Res,d} p_{res}) \quad (9)$$

其中, C_{res} 为年风电备用成本; p_{res} 为单位备用容量成本。

3 风电最佳接纳能力优化模型

3.1 目标函数

传统的风电接纳能力研究集中在技术约束上,主要是线路传输容量约束和调峰约束,研究的结果是整个电网的风电最大接纳能力。相对于最大接纳能力,最佳接纳能力是指在保证电力系统安全、稳定运行的前提下,经济性达到最优时的风电装机容量,其突破了技术层面的束缚,把安全性、环境效益和经济性有机地结合在一起,顺应企业的长期发展。本文以风电场和电网联合系统为主体(含环境效益)、以经济效益最大化为目标建立目标函数:

$$\begin{aligned} \max V = & \sum_{j=1}^N (I_{w,co,j} + I_{g,s,j} + I_{g,co,j} + I_{emi,j}) - \\ & \sum_{j=1}^N \left[C_{w,c,j} \frac{\eta}{1-(1+\eta)^{-T_w}} + C_{g,tr,j} \frac{\eta}{1-(1+\eta)^{-T_g}} + \right. \\ & \left. C_{w,op,j} + C_{g,op,j} + C_{g,an,j} \right] \end{aligned} \quad (10)$$

其中, V 为联合系统净收益; N 为风电机组数量。式中各项成本或收益均指年值。

3.2 约束条件

a. 盈利能力约束:

$$V > 0 \quad (11)$$

风电场和电网联合系统净收益表现为综合收益与成本的差值。盈亏平衡点 BEP(Break Even Point)是指全部销售收入等于全部成本时的产量。本文引用经济学中盈亏平衡的概念作为模型的约束条件之一,认为只有联合主体净收益大于零的方案才是可以接受的。

b. 系统有功平衡约束:

$$\sum_{i=1}^M P_{G,i,h} + \sum_{j=1}^N P_{w,j,h} = P_{Load,h} + \Delta P_{Loss,h} \quad (12)$$

其中, M 为常规发电机组的台数; $P_{G,i,h}$ 为常规机组有功出力; $P_{w,j,h}$ 为风电机组有功出力; $P_{Load,h}$ 为有功负荷大小; $\Delta P_{Loss,h}$ 为有功网损。

c. 常规机组出力约束:

$$P_{G,i,h,\min} \leq P_{G,i,h} \leq P_{G,i,h,\max} \quad (13)$$

其中, $P_{G,i,h,\min}$ 和 $P_{G,i,h,\max}$ 分别为常规机组的技术最小出力和最大出力,一般 $P_{G,i,h,\max}$ 取发电设备的额定有功功率, $P_{G,i,h,\min}$ 因发电设备类型而异。

d. 线路潮流约束:

$$\begin{cases} P_{line,\min} \leq P_{line} \leq P_{line,\max} \\ Q_{line,\min} \leq Q_{line} \leq Q_{line,\max} \end{cases} \quad (14)$$

其中, P_{line} 、 Q_{line} 分别为线路有功功率和无功功率; $P_{line,\min}$ 、

据,现对模型参数进行如下设定:风电场建设成本为 9000 元/kW;省内平均销售电价为 0.48 元/(kW·h);为接纳 2 个风电场并网新增线路 2 条,规格为 LGJ-185,总长度为 15 km,单位价格为 130 万元/km;风电场和电网的补偿收益分别为 0.12 元/(kW·h)和 0.1 元/(kW·h);调峰系数 K_B 取 55%;单位备用成本和单位调峰成本分别取 0.013 元/(kW·h)和 0.1 元/(kW·h);等效年值系数取 0.08。

5.1 算例结果分析

图 4 中显示了 100 次迭代后的所有可行方案的末代种群个体位置。

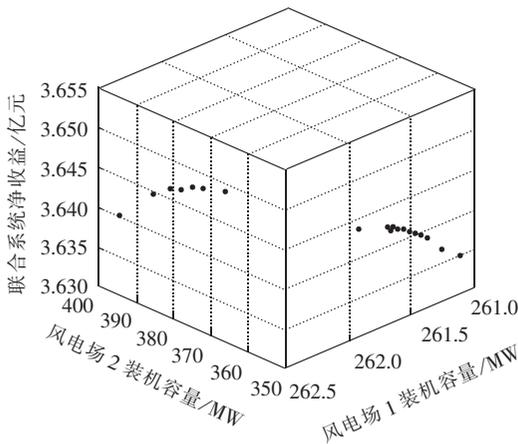


图 4 末代种群个体位置图

Fig.4 Stock locations of last generation

图中有 19 个点,小于种群个数 36,这是因为迭代结果中有不可行方案和重复方案。由图中可以看出,经过迭代,各个种群的优化结果相差不大,风电场 1 的装机容量在 [261, 262.5] MW 范围内,风电场 2 装机容量在 [354, 394.5] MW 范围内,迭代结果相差不大,这说明程序中选择的最大迭代次数 100 次是合理的。为了更清楚地分析各项成本(效益)所占比重,表 3 中得到了最优方案结果。

表 3 最优方案

Tab.3 Optimal scheme

参数	取值
风电场 1 装机容量/MW	262.5
风电场 2 装机容量/MW	366
联合系统净收益/亿元	3.647
网损成本/亿元	-0.0533
备用成本/亿元	1.36
调峰成本/亿元	5.75
环境效益/亿元	2.42

结果表明,联合净收益最大的点对应的装机容量分别为 262.5 MW 和 366 MW,即所求电网最佳风电接纳能力,此时联合系统的净收益为 3.647 亿元。最优方案中可以看出风电接入减小了网络损耗成本,但是这一结论是否具有普遍意义还有待研究,是否会减少网损成本和风电装机容量、网架结构等都

有直接的关系;风电接入也引起了一定的新能源备用成本,尤其大幅增加了调峰成本,这一结论也反过来说明了电网调峰充裕性问题是影响大规模风电并网的最主要因素之一^[19]。另外,风电并网必然给社会带来巨大的环境效益,这也是风电等新能源能迅速发展的重要原因。

5.2 传统接纳能力

文献[9]定义了平均调峰裕度并据此得出风电接纳能力。取风电场等效容量 $\beta=0.6$,月不均衡系数 $\varphi=0.8$,可以得到传统方法风电接纳能力见表 4。

表 4 传统风电接纳能力计算

Tab.4 Wind power accommodation capability calculated by traditional method

参数	取值
火电机组装机容量/MW	3405
系统最小负荷/MW	1596
平均调峰裕度/MW	595.8
风电接纳能力/MW	993

由计算结果可知,用传统接纳能力方法得到的风电接纳能力为 993 MW,远大于本文模型所求得的总装机容量 628.5 MW,表 5 给出了保证总装机容量为 993 MW,2 个风电场分别取总装机容量以及取总装机容量的 1/2 和 1/3 时的联合系统净收益情况。

表 5 传统接纳能力方案

Tab.5 Schemes for wind power accommodation capability calculated by traditional method

装机容量/MW		净收益/亿元
风电场 1	风电场 2	
993.0	0	—
0	993.0	—
496.5	496.5	-5.46
331.0	662.0	-1.89
662.0	331.0	-4.33

结果显示,当总装机容量取 993 MW 时,若全部 993 MW 的风电装机容量设置在同—个风电场时,不满足电网安全约束条件;装机容量的其他几种分配方式也都会使联合系统亏损。这表明,用传统方法所得的风电接纳能力太大,而经济性较差,若按此接纳能力进行风电场并网规划必然造成装机容量过大、容量浪费的问题,因此并不能真正意义上指导风电场规划。而本文中所建模型既能真实反映风电接纳能力,又能保证各主体利益,可以为风电场建设决策提供参考,有重要的现实意义。

6 结语

本文详细分析了风电并网过程中风电场和电网 2 个主体的成本-效益,并分别给出了计算模型,进而以联合系统为主体建立了风电最佳消纳能力评估模型,通过 RTS79 算例的求解并与传统接纳能力评估进行对比可知,传统方法是不考虑网架结构,单

纯从电源调峰能力和电网输电能力等技术角度进行风电接纳能力评估,评估结果往往使电网风电接纳能力很大,但是经济性较差,若按此接纳能力进行规划必然导致企业亏损,不适应企业长期发展。而采用本文最佳接纳能力模型可以求解电网多点风电接纳能力问题,不仅考虑了电网安全约束,还保证了所求方案的盈利性。

参考文献:

- [1] 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.
ZHANG Liying, YE Tinglu, XIN Yaozhong, et al. Problems and measures of power grid accommodating large scale wind power [J]. Proceedings of the CSEE, 2010, 30(25): 1-9.
- [2] 孙惠娟,彭春华,易洪京. 大规模风电接入电网多目标随机优化调度[J]. 电力自动化设备,2012,32(5):123-128.
SUN Huijuan, PENG Chunhua, YI Hongjing. Multi-objective stochastic optimal dispatch of power system with wind farms [J]. Electric Power Automation Equipment, 2012, 32(5): 123-128.
- [3] KARKI R, HU P, BILLITON R. A simplified wind power generation model for reliability evaluation [J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2006, 21(2): 533-540.
- [4] 徐乾耀,康重庆,张宁,等. 海上风电出力特性及其消纳问题探讨[J]. 电力系统自动化,2011,35(22):54-59.
XU Qianyao, KANG Chongqing, ZHANG Ning, et al. A discussion on offshore wind power output characteristics and its accommodation [J]. Automation of Electric Power Systems, 2011, 35(22): 54-59.
- [5] DOHERTY R, O'MALLEY M. A new approach to quantify reserve demand in systems with significant installed wind capacity [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2005, 20(2): 587-595.
- [6] 孙荣富,张涛,梁吉. 电网接纳风电能力的评估及应用[J]. 电力系统自动化,2011,35(4):70-76.
SUN Rongfu, ZHANG Tao, LIANG Ji. Grid capacity of wind-power algorithm analysis [J]. Automation of Electric Power Systems, 2011, 35(4): 70-76.
- [7] 刘德伟,黄越辉,王伟胜,等. 考虑调峰和电网输电约束的省级系统风电消纳能力分析[J]. 电力系统自动化,2011,35(22):77-81.
LIU Dewei, HUANG Yuehui, WANG Weisheng, et al. Analysis on provincial system available capability of accommodating wind power considering peak load dispatch and transmission constraints [J]. Automation of Electric Power Systems, 2011, 35(22): 77-81.
- [8] 高赐威,吴天婴,何叶,等. 考虑风电接入的电源电网协调规划[J]. 电力系统自动化,2012,36(22):30-35.
GAO Ciwei, WU Tianying, HE Ye, et al. Generation and transmission coordinated planning considering wind power integration [J]. Automation of Electric Power Systems, 2012, 36(22): 30-35.
- [9] 刘勇,田晓军,夏保安,等. 电网风电消纳能力计算方法分析[J]. 河北电力技术,2012,31(2):21-22.
LIU Yong, TIAN Xiaojun, XIA Baoan, et al. Grid capacity of wind power algorithm analysis [J]. Hebei Electric Power, 2012, 31(2): 21-22.
- [10] 李凤婷,晁勤,童菲,等. 风电系统容量的优化配置探讨[J]. 电力自动化设备,2007,27(6):36-38.
LI Fengting, CHAO Qin, TONG Fei, et al. Discussion on configuration optimization of wind power capacity [J]. Electric Power Automation Equipment, 2007, 27(6): 36-38.
- [11] 王正明,路正南. 风电成本构成与运行价值的技术经济分析[J]. 科学管理研究,2009,27(2):51-54.
WANG Zhengming, LU Zhengnan. Techno-economic analysis on cost structure and operation value of the wind power project [J]. Scientific Management Research, 2009, 27(2): 51-54.
- [12] 张燕,周明. 考虑备用成本的含风电场短期经济调度[J]. 电力科学与工程,2011,27(4):6-12.
ZHANG Yan, ZHOU Ming. Short-term economic dispatch considering spinning reserve costs for wind power integrated systems [J]. Electric Power Science and Engineering, 2011, 27(4): 6-12.
- [13] 余民,杨旻宸,蒋传文,等. 风电并网后电力系统可靠性评估和备用优化研究[J]. 电力系统保护与控制,2012,40(12):100-104.
YU Min, YANG Minchen, JIANG Chuanwen, et al. Study on power system reliability and reserve optimization with wind power integration [J]. Power System Protection and Control, 2012, 40(12): 100-104.
- [14] JIN Y X, CHENG H Z, YAN J, et al. New discrete method for particle swarm optimization and its application in transmission network expansion planning [J]. Electric Power Systems Research, 2007, 77(3): 227-233.
- [15] 谢国辉,李琼慧. 风电辅助服务成本测算模型和实证研究[J]. 中国电力,2011,44(12):82-85.
XIE Guohui, LI Qionghui. Research on calculating model and empirical analysis of wind power ancillary service cost [J]. Electric Power, 2011, 44(12): 82-85.
- [16] 王丹平,陈之栩,涂孟夫,等. 考虑大规模风电接入的备用容量计算[J]. 电力系统自动化,2012,36(21):24-28.
WANG Danping, CHEN Zhixu, TU Mengfu, et al. Reserve capacity calculation considering large-scale wind power integration [J]. Automation of Electric Power Systems, 2012, 36(21): 24-28.
- [17] 陈宁,沙倩,汤奕,等. 基于交叉熵理论的风电功率组合预测方法[J]. 中国电机工程学报,2012,32(4):29-34.
CHEN Ning, SHA Qian, TANG Yi, et al. A combination method for wind power prediction based on cross entropy theory [J]. Proceedings of the CSEE, 2012, 32(4): 29-34.
- [18] 邱威,张建华,刘念. 微分进化算法在电力系统中的应用[J]. 现代电力,2009,26(5):11-17.
QIU Wei, ZHANG Jianhua, LIU Nian. Application of differential evolution to power systems [J]. Modern Electric Power, 2009, 26(5): 11-17.
- [19] 张志锋,徐箭,闫秉科,等. 考虑特高压送风电的湖北电网调峰方案[J]. 电力自动化设备,2013,33(4):6-11.
ZHANG Zhifeng, XU Jian, YAN Bingke, et al. Hubei Power Grid peak load regulation considering wind power transmitted by UHV network [J]. Electric Power Automation Equipment, 2013, 33(4): 6-11.

作者简介:



刘文霞

刘文霞(1967-),女,吉林长春人,副教授,研究方向为电力系统规划、电力系统风险评估、电力系统通信(E-mail:liuwenxia001@163.com);

李盈枝(1988-),女,辽宁朝阳人,硕士研究生,研究方向为电力系统运行经济性、风电并网等(E-mail:wlxzd13717675425@126.com);

李鹤(1989-),男,四川自贡人,硕士研究生,研究方向为电力系统优化运行、输电网规划等。

(下转第30页 continued on page 30)

- with active crowbar under symmetry voltage fault condition[J]. Electric Machines and Control,2009,13(1):99-103.
- [15] ZHANG Wei,ZHOU Peng,HE Yikang. Analysis of the by-pass resistance of an active crowbar for doubly-fed induction generator based wind turbines under grid faults[J]. International Conference on Electrical Machines and Systems,ICEMS. Wuhan, China:[s.n.],2008:2316-2321.
- [16] 马祎炜,俞俊杰,吴国祥,等. 双馈风力发电系统最大功率点跟踪控制策略[J]. 电工技术学报,2009,24(4):202-208.
- MA Yiwei,YU Junjie,WU Guoxiang,et al. MPPT control strategy for doubly-fed wind power generation[J]. Transactions of China Electrotechnical Society,2009,24(4):202-208.
- [17] LING Yu,CAI Xu. Rotor current dynamics of doubly fed induction generators during grid voltage dip and rise[J]. International Journal of Electrical Power and Energy System,2013,44(1):17-24.
- [18] MORREN J,de HAAN S W H. Short-circuit current of wind turbines with doubly fed induction generator[J]. IEEE Tran-

sactions on Energy Conversion,2007,22(1):174-180.

- [19] 贺益康,周鹏. 变速恒频双馈异步风力发电系统低电压穿越技术综述[J]. 电工技术学报,2009,24(9):140-146.
- HE Yikang,ZHOU Peng. Overview of the low voltage ride-through technology for variable speed constant frequency doubly fed wind power generation systems[J]. Transactions of China Electrotechnical Society,2009,24(9):140-146.

作者简介:



凌 禹

凌 禹(1975-),男,山西阳高人,讲师,博士,主要从事电力电子及其在电力系统中的应用、电机及其控制和风力发电等方面的研究(E-mail:pleasurably@126.com);

蔡 旭(1964-),男,江苏徐州人,教授,博士研究生导师,研究方向为风力发电。

Fault ride-through of DFIG wind turbine with rotor series resistor

LING Yu^{1,2},CAI Xu²

(1. Department of Electrical Engineering, Shanxi Datong University, Datong 037003, China;

2. WPRC, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China)

Abstract: Aiming at the out-of-control problem of the crowbar protection method for DFIG (Doubly-Fed Induction Generator) wind turbines, an FRT (Fault Ride-Through) scheme combining RSDR (Rotor Series Damping Resistor) and DC-side chopper is proposed, which meets the requirements of grid for FRT while suppresses the quick increase of generator speed to improve the speed stability and transient behaviors of unit. The theoretical basis of RSDR is analyzed, the influence of RSDR on system transient performance is discussed, and the optimal resistance is determined. The operating principle of the proposed scheme is analyzed and its effectiveness is verified by PSCAD/EMTDC simulation software. The simulative results show that, the proposed scheme ensures the DFIG wind turbine a successful low-voltage FRT with better speed stability and transient performance.

Key words: doubly-fed induction generator; fault ride-through; wind power; rotor series resistor; DC-side chopper; control

(上接第 24 页 continued from page 24)

Wind power accommodation capability considering economic constraints for western mountain areas

LIU Wenxia, LI Yingzhi, LI He, ZHAO Tianyang, ZHANG Jianhua

(State Key Laboratory of Alternate Electrical Power System with Renewable Energy Sources, North China Electric Power University, Beijing 102206, China)

Abstract: The cost benefits of both wind farm and grid caused by the integration of wind power into grid, as well as the environmental benefit, are quantitatively analyzed, and an optimization model of wind power accommodation is built, which takes the economical efficiency as its objective and considers the constraints of profitability and operational security. The differential evolution algorithm is adopted to solve the model. With RTS79 as an example, the proposed wind power planning method is compared to the traditional one, which considers only the technical factors, and analysis indicates that, the proposed method has smaller wind power accommodation capability but better economy, verifying its effectiveness and practicability.

Key words: wind power; cost-benefit analysis; environmental benefits; wind power accommodation capability; differential evolution algorithm; optimization; models; economic analysis