

含风-储联合系统的电网规划研究综述

风电的大量接入给电网的正常运行带来一系列的问题，而储能技术已成为改善风电特性的重要措施。由于传统的电网规划方法无法适用于含风-储联合系统的电网，迫切需要建立一套综合考虑风机和储能特性的电网规划方法。综述了含风-储联合系统电网规划的相关研究，对风-储联合系统的特性、规划模型、随机潮流算法与评价方案进行了归纳和总结，从而为未来的研究奠定基础。

苗璐 易杨 高海翔/广东电网有限责任公司电力调度控制中心

0 引言

近年来，全球范围内能源的使用不断增长，而化石能源却日趋枯竭，使风电的开发具有重大意义。由于风电机组具有随机、波动及反调峰等特性，大规模风电并网给电力系统的运行带来了一系列挑战^[1-2]。

在风电大量接入电网的趋势下，大规模储能设备的应用已成为未来电网发展的必然趋势。储能设备具有灵活的功率调节能力和“吞吐”能力，可以大幅度改善风电机组的接入特性^[3-4]。储能系统可以随时快速响应系统的指令，与风电机组互补出力，为大规模风电并网所带来的挑战提供了解决思路。近年来，利用储能系统提高风电机组运行特性的研究也日益增多，主要包括平抑风功率波动^[5]、增强风电机组低电压穿越能力^[6]等。然而，传统的电网规划方案已无法适用于含风电-储能联合系统的电网^[7]，因此迫切需要建立一套综合考虑风机和储能特性的电网规划方法。

目前，已有不少文献研究了含新能源的电网规划，但对于含风-储联合

系统的电网规划方法研究尚处于初级阶段。文献[8]综述了传统的规划方案在风电大规模接入背景下所面临的挑战，并提出电网要为风电场提供足够的备用容量以平抑平衡风电功率波动。文献[9]提出了一种含大规模风电并网的输电系统价值规划方法，该方法以收益最大为目标函数，综合考虑了风电不确定性因素对规划方法的影响。文献[10]提出了一种基于风电-抽水蓄能的联合系统电网运行规划方法，该方法的目标为系统经济最优化。文献[11]以抽水蓄能电站为研究目标，计算了风机-储能联合系统的能量转换效益，并通过评估模型评价了能量转换效益。这些文献虽对风-储联合系统的电网规划问题有所涉足，但对于风-储系统联合运行策略、优化储能的容量配置以及潮流计算方法等问题总结得还不够完善。

本文从规划角度出发，概述了风-储联合系统的规划模型与概率潮流计算方法，并介绍了风-储联合系统规划的评价方法，为含风-储联合系统的电力系统规划问题提供一定的思路。

1 风-储联合系统

1.1 风电的接入特性

与火电、水电等常规能源相比，风电由于其自身的特点，使传统的电网规划方法不再适用。其影响主要表现在以下三个方面：

1) 风电具有波动性、随机性及不可控性。风电功率主要依赖于风速，风电



苗璐/博士

关键词/Keywords

风电并网·
储能技术·
电网规划·
潮流算法·

功率随风速的变化而变化^[12]。因此,研究计及大规模风电机组接入电网时,风机的不确定性导致传统的电网规划模型不再适用。

2) 风电具有反调峰性。风电大量接入电网会导致电网调峰压力进一步增大,且调峰容量不足时会出现低负荷弃风现象,给电网调峰调频造成较大影响。因此,风电并网后,电网需要更充裕的系统备用容量^[13]。

3) 大型风电场并网使电网规划的评估工作复杂化。电网规划评价方法应具有可靠性、稳定性、经济性和持续性。而风电在电网规划中引入不确定性约束的情况下,系统的规划评估问题将会变得更加复杂^[14]。

1.2 储能在电力系统中的应用

大容量储能系统与风电机组协调运行已经成为了未来技术的发展趋势。根据储能元件的特性,储能装置可分为机械储能、电化学储能和电磁储能等。机械储能主要包括飞轮储能、抽水蓄能和压缩空气储能等;电化学储能主要指化学电池储能;电磁储能主要包括超导储能和超级电容储能。抽水蓄能、压缩空气储能等机械储能设备虽具有能量转换效率高等优点,但由于一次性投资费用较高,通常用于大规模能量需求的场合。电化学储能和电磁储能具备瞬时功率大、响应速度快等特点,较适用于与风电机组联合运行。其中,超导磁储能(Superconducting Magnetic Energy Storage, SMES)具有高效率及快速响应(毫秒级)特性^[15],适用于与大规模风电场联合运行。目前已有利用SMES解决风电并网问题的研究^[16],SMES结构如图1所示。

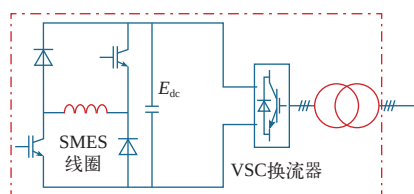


图1 SMES结构

1.3 风-储联合系统

配置储能为平抑风功率波动的有效途径。储

能装置通常有两种接入方式:一种是通过双向DC/DC变换器接入风机系统的直流侧;另一种是通过逆变器接入风机系统的交流侧。风-储联合系统在电网中的接入方式如图2所示^[17]。

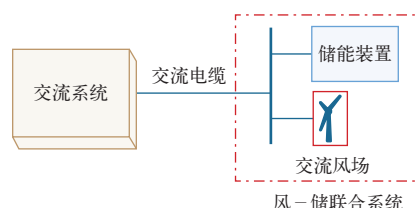


图2 风-储联合系统示意图

2 含风-储联合系统的电网规划模型

2.1 风电的不确定模型

通常采用概率模型描述风速变化的不确定性,如采用Normal、LogNormal、Rayleigh或Weibull模型等拟合风速概率分布。通过大量的数据证明,Weibull分布具有最好的适应性,能较为准确地模拟风速变化的情况,因此该种分布在研究中最常用。由Weibull分布特性及文献[18]推出风机风速 v 的概率密度函数 $f_v(v)$ 和概率分布函数 $F_v(v)$ 分别为

$$f_v(v) = \frac{s}{c} \left(\frac{v}{c} \right)^{s-1} \exp \left[- \left(\frac{v}{c} \right)^s \right] \quad (1)$$

$$F_v(v) = 1 - \exp \left[- \left(\frac{v}{c} \right)^s \right] \quad (2)$$

式中, s 为形状系数; c 为尺度参数。

因此,风电机组出力 P 与风速 v 间的关系可表示为

$$P = \begin{cases} 0 & v < v_{ci} \text{ 或 } v > v_{co} \\ k_1 v + k_2 & v_{ci} \leq v \leq v_{cr} \\ P_R & v_{cr} \leq v \leq v_{co} \end{cases} \quad (3)$$

式中, $k_1 = P_R / (v_{cr} - v_{ci})$; $k_2 = -v_{ci} P_R / (v_{cr} - v_{ci})$; v_{ci} 和 v_{co} 分别为切入和切出风速; v_{cr} 为额定风速; P_R 为风电机组的额定有功功率。

2.2 储能装置的控制策略

由于储能装置投资成本大且价格较高,频繁地充放电会大大降低其经济性。因此,在设计风

机与储能装置的协调运行策略时，不仅要考虑储能平抑风功率的效果，同时也要充分考虑储能装置的运行成本。文献[19]将风-储联合系统协调控制策略的设计原则设定为：根据风机的运行状态，优先考虑电力系统运行的安全稳定性，其次尽可能保证储能装置的经济性，利用储能协助系统保持良好的运行状态；允许风功率在给定的区间内波动。该原则已被大多数文献采纳，这既可保证电力系统的稳定运行，又可避免储能装置频繁起停，减少储能装置放电深度，从而降低成本。

2.3 含风-储联合系统的电网规划模型

在含风-储联合系统的电网规划模型中，要同时充分考虑电力系统的经济性、安全性和稳定性。文献[20]采用双层规划理论（BLP）搭建了火电-储能协调模型，上层规划主要考虑风功率预测和系统约束条件，下层规划在上层规划的基础上，考虑求解不同机组的出力计划和备用计划。文献[21]将年投资费最小作为目标函数，构建含风-储联合系统的电网规划模型。文献[22]采用系统分层协调的方法，将规划问题分解为投资主问题和运行子问题，建立以下两层规划模型

$$\begin{cases} \min F = F(W, v) \\ \text{s.t. } G(W) \geq 0 \\ \min v = f(H) \\ \text{s.t. } g(H) \geq 0 \end{cases} \quad (4)$$

式中， $F(W, v)$ 和 $f(H)$ 分别为上下层目标函数； $G(W)$ 和 $g(H)$ 分别为上下层的不等式约束； W 为新增线路集； H 为系统运行状态； v 为下层目标值。

为了保证储能系统的正常运行，使其在运行过程中电量不小于初始值，则储能的充放电约束为

$$M_{ct}^{\min} \leq M_{ct}(t) \leq M_{ct}^{\max} \quad (5)$$

$$M_{dt}^{\min} \leq M_{dt}(t) \leq M_{dt}^{\max} \quad (6)$$

$$E_i^{\min} \leq E_i(t) \leq E_i^{\max} \quad (7)$$

$$E_{i0} \leq E_{iT} \quad (8)$$

式中， $M_{ct}(t)$ 为储能装置在 t 时段的充电功率倍数， $M_{ct}^{\max}$ 和 $M_{ct}^{\min}$ 为其上下限值； $M_{dt}(t)$ 为储能装置在 t 时段的放电功率倍数， $M_{dt}^{\max}$ 和 $M_{dt}^{\min}$ 为其上下限值； $E_i(t)$ 为储能装置在 t 时段的电量， $E_i^{\max}$ 和 $E_i^{\min}$ 为其上下限值； E_{i0} 和 E_{iT} 分别为研究阶段始末储能系统 i 的电量。

3 概率潮流计算方法

由于含风-储联合系统的电网规划模型为不确定模型，而确定的潮流算法只能运用于确定工况下的系统运行状态，不能用于计算随机潮流，因此传统的潮流计算方法不适用于计及风-储联合系统的电网。在分析含风-储联合系统的规划问题时，应利用概率潮流方法作为计算工具。即求解含有两个随机参数的非线性方程

$$\begin{cases} Y = f_c(X_c) \\ Z_c = g_c(X_c) \end{cases} \quad (9)$$

式中， Y 为输入随机变量，是节点的有功功率及无功功率，其不确定性由风电场的波动导致； c 也为随机变量，是系统的网络结构； X 为电压幅值和相角； Z 为支路潮流。

自1974年学者Borkowska提出概率潮流的分析方法以来，许多研究学者提出了多种方法计算概率潮流。其主流的计算方法主要包括Monte Carlo模拟法、解析性方法和点估计方法。其中，Monte Carlo模拟法是最为常用的一种计算方法。其核心思想是根据输入随机变量的概率分布进行大量的采样，一般认为只要采样规模足够大，使用Monte Carlo模拟法就能得到准确度相当高的结果。

在计及风-储联合系统时，输入随机变量将具有较强的相关性，式(9)的求解则会变得十分复杂。对此，文献[23]提出了一种基于Nataf变换和拉丁超立方采样的方法，该方法是一种能够灵活地处理风电场出力、储能出力和负荷变化之间具有相关性的概率潮流计算方法，方法简单且不受随机变量类型的约束，可适用于含风-储联合系统电网规划。

4 含风-储联合系统的电网规划评估方法

4.1 评价方法的特性

规划评估是用于评价系统规划与运行的关键环节。使用适当的评估方法和评估指标对规划方案进行评价,有利于为电网规划提供依据。因此,更加全面、完善的电网评估体系一直是研究学者追求的目标。为定量分析含风-储联合系统的电网发展情况,需在原有电网评估方法的基础上,建立一套考虑风-储接入的评价体系。文献[24]讨论了含大型集群风电接入输电系统的规划,并将电网规划的评估工作总结为可靠性评估、经济性评估、稳定性评估和持续性评估。文献[25]提出了针对光伏发电并网的评价方法,用层次和信息熵的理论对电网进行评价,并得出最优的规划方案。随着风-储联合系统的容量不断增大,应不断更新电网规划评估的理念和方法,提升电网的稳定性和经济性。

4.2 评价指标

国内外已有很多针对传统的以及电力市场环境下面临更多不确定因素电网规划评估指标、评估方法方面的研究工作,而针对含风-储联合系统的电网规划评估指标的文献则较少。文献[26]在原有电网规划技术评价指标的基础上建立了考虑大规模新能源接入的新型电网规划评价指标,同时建立了新能源对供电中断期望值的贡献系数、新能源对切负荷概率的贡献系数、新能源容量可信度及母线电压分布指数四个评价指标。用序贯蒙特卡洛仿真法将风电场和光伏电站接入测试系统并进行仿真,同时对四个指标进行量化分析。文献[27]分析了风电并网对电网的影响,指出了电网规划评价指标体系的建立原则,接着将评价指标体系划分为充裕性、安全性、经济性及风电不确定性四个方面来进行评价。

5 结束语

大规模风电并网给电力系统的运行引入诸多挑战,因此利用储能来提高风电机组运行特性的

应用日益增多。由于风电的随机性、波动性等特性导致传统的电网规划方案已不再适用,储能的加入则使得规划方案更加复杂。目前,国内外对计及含风-储联合系统电网规划问题的研究仍然处于初级阶段,还需要进一步完善。基于此,本文根据风电与储能的特点,对现有文献进行了综述,并对控制策略、规划模型、潮流算法和评价方案等进行了探讨。

参考文献

- [1] 王志新, 吴杰, 徐烈, 等. 大型海上风电场并网 VSC-HVDC 变流器关键技术 [J]. 中国电机工程学报, 2013, 33 (19): 14-27.
- [2] 刘吉臻. 大规模新能源电力安全高效利用基础问题 [J]. 中国电机工程学报, 2013 (16): 1-8.
- [3] 陈娜娜, 李富生. 风电并网中储能技术应用的探讨 [J]. 机电工程技术, 2011, 40 (12): 49-51.
- [4] 张文亮, 丘明, 来小康. 储能技术在电力系统中的应用电网技术 [J]. 电网技术, 2008, 32 (7): 1-9.
- [5] Qu L, Qiao W. Constant power control of DFIG wind turbines with supercapacitor energy storage [J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2011, 47 (1): 359-367.
- [6] Ngamroo I, Karaipoom T. Improving low-voltage ride-through performance and alleviating power fluctuation of DFIG wind turbine in DC microgrid by optimal SMES with fault current limiting function [J]. IEEE Transactions on Applied Superconductivity, 2014, 24 (5): 1051-8223
- [7] 艾小猛, 文劲宇, 吴桐, 等. 基于点估计和 Gram-Charlier 展开的含风电电力系统概率潮流实用算法 [J]. 中国电机工程学报, 2013, 33 (16): 16-22.
- [8] 白建华, 辛颂旭, 贾德香, 等. 我国风电大规模开发面临的规划和运行问题分析 [J]. 电力技术经济, 2009, 21 (2): 7-11.
- [9] 张建平, 朱忠烈, 柳路, 等. 大规模风电接入的输电系统价值规划方法 [J]. 电力系统自动化, 2014, 38 (19): 47-51.

- [10] Bueno C, Carta J A. Technical-economic analysis of wind-powered pumped hydro-storage systems, part II: model application to the island of El Hierro [J]. Solar Energy, 2005, 78 (3) : 396-405.
- [11] 李强, 袁越, 李振杰, 等. 考虑峰谷电价的风电—抽水蓄能联合系统能量转化效益研究 [J]. 电网技术, 2009, 33 (6) : 13-17.
- [12] 肖创英, 汪宁渤, 等. 甘肃酒泉风电出力特性分析 [J]. 电力系统自动化, 2010, 34 (17) : 64-67.
- [13] 朱凌志, 陈宁, 韩华玲. 风电消纳关键问题及应对措施分析 [J]. 电力系统自动化, 2011, 35 (22) : 29-34.
- [14] 孙伟卿. 智能电网规划与运行控制的柔性评价及分析方法 [D]. 上海: 上海交通大学, 2013.
- [15] 方家琨, 文劲宇, 王少荣, 等. 移动式直接冷却高温超导磁储能系统试验研究 [J]. 中国电机工程学报, 2011, 31 (33) : 169-174.
- [16] Chen S S, Wang L, Lee W J, et al. Power flow control and damping enhancement of a large wind farm using a superconducting magnetic energy storage unit [J]. IET Renewable Power Generation, 2009, 3 (1) : 23-38.
- [17] 苗璐. 含风电及多端口直流—直流换流器的直流系统建模与控制 [D]. 武汉: 华中科技大学, 2016.
- [18] 肖建华, 卢道远, 等. 基于粒子群算法的含风电场电网规划优化研究 [J]. 广东电力, 2012, 25 (10) : 33-37.
- [19] 郑静. 考虑风电场的输电系统规划研究 [D]. 杭州: 浙江大学, 2013.
- [20] 赵书强, 王扬, 徐岩, 等. 考虑机会约束目标规划的高风电接入比例下大规模储能与火电协调调度 [J]. 中国电机工程学报, 2016, 36 (4) : 969-977.
- [21] 刘姝婷, 王尧, 郭洪梅. 考虑风储联合系统影响的输电网规划及效益分析 [J]. 陕西电力, 2013, 7 (10) : 26-30.
- [22] 郑静, 文福拴, 李力, 等. 计及风电场和储能系统联合运行的输电系统扩展规划 [J]. 电力系统自动化, 2013, 37 (1) : 135-142.
- [23] 陈雁, 文劲宇, 程时杰. 考虑输入变量相关性的概率潮流计算方法 [J]. 中国电机工程学报, 2011, 31 (22) : 80-87.
- [24] 田书欣, 程浩忠, 曾平良. 大型集群风电接入输电系统规划研究综述 [J]. 中国电机工程学报, 2014, 34 (10) : 1566-1574.
- [25] 王琬, 曾博, 刘宗岐, 等. 光伏发电并网规划综合评价模型及其应用 [J]. 现代电力, 2011, 28 (6) : 82-86.
- [26] 王灿. 考虑大规模新能源接入的电网规划评价指标研究 [D]. 北京: 华北电力大学, 2015.
- [27] 钱英. 计及不确定的大型风电场并网方案评价体系的研究 [D]. 北京: 华北电力大学, 2012.

(收稿日期: 2017-02-10) EA

|||||

欢迎订阅 欢迎投稿 欢迎刊登广告