

基于多储能系统的风电黑启动方案设计

李翠萍^{1*}, 张世宁², 李军徽¹, 尤宏飞¹, 张昊¹, 齐军², 李鹤¹

(1. 东北电力大学现代电力系统仿真与控制及可再生能源技术教育部重点实验室, 吉林省 吉林市 132012;

2. 内蒙古电力(集团)有限责任公司, 内蒙古自治区 呼和浩特市 010020)

Black-start Scheme for Wind-power Generation Based on Multiple Energy Storage System

LI Cuiping^{1*}, ZHANG Shining², LI Junhui¹, YOU Hongfei¹, ZHANG Hao¹, QI Jun², LI He¹

(1. Key Laboratory of Modern Power System Simulation and Control & Renewable Energy Technology, Northeast Electric Power University, Jilin 132012, Jilin Province, China;

2. Inner Mongolia Power (Group) Co., Ltd., Hohhot 010020, Inner Mongolia Autonomous Region, China)

Abstract: The black-start capability of regional power grids ensures safe power-system operation. The proportion of wind and photovoltaic-cell-based power generation has significantly increased, especially in regions with high installed wind-power capacity but little or no hydropower generation. Thus, the prospect of wind-power combined with energy storage for subsequent use as a black-start power source has attracted increasing research attention. This paper presents a black-start scheme for wind farms and corresponding specifications based on a multi-energy storage system. Accordingly, the four main stages of the black-start process are proposed. The proportion of the black-start period that meets the black-start wind-power collection-area requirement can be calculated using the continuous effective output probability. Then, the probability of successful wind-power black-start in the given region can be evaluated. Finally, based on PSCAD (Power Systems Computer Aided Design), the black-start feasibility of the combined wind-power and energy-storage system can be verified considering the transient level obtained by simulating the processes of energy-storage self-start, commencement of wind-farm operation, and starting of the auxiliary thermal power unit.

Keywords: black-start; wind power; multi-energy storage system; scheme design

基金项目: 国家自然科学基金项目(U1766204); 中央引导地方科技发展资金省重点实验室基础研究专项(202002005JC); 内蒙古电力(集团)有限责任公司科技项目(0730-176032NM0177)。

National Natural Science Foundation of China (U1766204); Special Fundamental Research Project of Provincial Key Laboratory of the Central Leading Local Science and Technology Development Fund (202002005JC); Science and Technology Foundation of Inner Mongolia Electric Power (Group) Co., Ltd. (0730-176032NM0177).

摘要: 区域电网的黑启动能力是电力系统安全运行的重要保障之一。随着风电和光伏发电在系统中占比越来越高, 特别是对于风电装机占比高但水电少、甚至无水电的地区, 风电结合储能能否作为黑启动电源受到研究者关注。结合黑启动方案规范, 设计了基于多储能系统的风电场黑启动方案, 提出风-储联合系统黑启动过程的4个主要阶段, 并提出以持续有效出力概率计算风电汇集地区全年能满足黑启动的时段占比, 衡量地区风电黑启动成功概率。最后基于PSCAD对简化的风-储联合系统仿真储能自启动、风电场启动及火电机组辅机启动3个过程, 初步从暂态层面验证了风-储联合系统黑启动的可行性。

关键词: 黑启动; 风电; 多储能系统; 方案设计

0 引言

电能人类社会扮演越来越重要的角色, 大停电事故给经济和社会造成的损失也越来越严重^[1]。为减少损失, 需在大停电后快速恢复电网。黑启动是电力系统恢复的首要且关键的阶段, 而黑启动的关键是黑启动电源的启动^[2-3]。由于水力发电具有厂用电量较少、可快速启动等优点, 传统的黑启动电源(火电、核电、水电)优先考虑的是水电, 抽水蓄能机组承担黑启动的研究与应用已相当成熟^[4-5]。在缺少水电机组、且局部电网薄弱的中国北部很多地区, 用风电作为黑启动电源, 为风多水少地区的黑启动提供了可能方案^[6-7]。

由于风电出力具有随机性和波动性, 且风电机组不具备自启动能力, 通常需由储能辅助风电机组参与

黑启动。海内外已有不少关于风电-储能黑启动方案的研究。文献[8]提出了利用柴油发电机、蓄能电站与风电场形成独立系统,采用PQ、V/f及下垂控制,通过柴、风、储三者协同启动系统,为负荷供电。文献[9]针对内蒙古呼伦贝尔局域电网,提出了采用风-储联合系统作为黑启动电源的方案,研究了方案的可行性、储能容量的配置、风电-储能-火电协调优化控制策略以及黑启动过程中的过电压问题。文献[10]在高风电渗透率的电网中,利用风-储联合系统作为黑启动电源,提出了一种分层模型预测控制方法,由频率调节模式和备用恢复模式2种控制模式组成。文献[11]针对没有合适水电黑启动电源的风多水少地区,以保证黑启动电压频率稳定为基本约束条件,用PSCAD仿真软件对风-储联合系统进行建模,以电阻传感器为负载,分析了储能热电联产系统的自启动过程。文献[12]提出了一种利用核密度分析的能量存储系统分级方法,使风电场可以作为黑启动电源。

上述研究多针对单个风电场、单个储能电站作为黑启动电源。随着促进储能技术发展的政策频出^[13],大容量储能技术得到快速发展和应用,在甘肃、江苏、河南等地相继建成或开始建造多座储能电站,多储能态势已然形成^[14-15]。因此,在风多水少局部地区,开展以多储能系统为基础的风电黑启动研究已具备了现实条件和意义。本文“多储能系统”,是指由2个及以上同类型或者不同类型具有一定电气距离的储能电站。

由于风电的波动性和多储能系统技术特性,并非在任意时刻下的任意风电场、任意多储能系统均可作为黑启动电源。在风多水少且风电装机容量大的地区,为在电网全黑后快速恢复系统,本文提出并设计了以多储能和多风电场为启动电源的黑启动方案,并从黑启动能力和出力可信度2个方面验证方案可以大幅提高火电机组启动电力的可靠性。

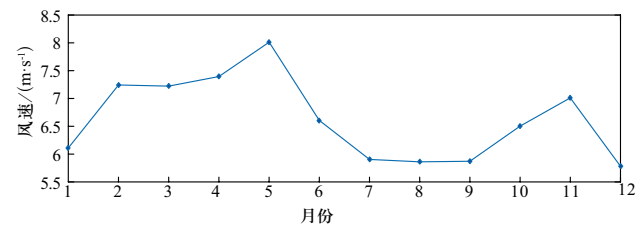
1 风-储联合系统黑启动方案研究背景

1.1 风电参与黑启动方案制定

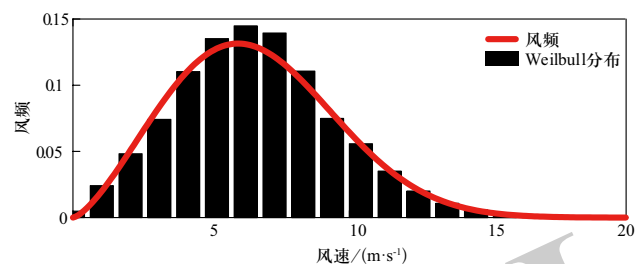
鉴于水电在风多水少地区作为黑启动电源的局限性,采用风电作为黑启动电源具有重要价值。内蒙古自治区风力发电量位列全国第一,其中包头是最大的工业城市^[16-17],该地区风电装机占比24%,水电装机占比仅为2%。同时,包头地区主配网联系不十分紧密,220 kV电力系统稳定能力较弱,110 kV电力系统

常规发电机组和水电机组分布在城外,与集中用电负荷距离较远。由于局域电网内部协调能力差,运行方式安排存在难度,存在大面积停电风险。因此,本文选择内蒙古包头局域电网为研究对象,将风-储联合系统作为黑启动电源的研究具有一定代表性,可为其他地区开展风电-储能黑启动提供参考。

内蒙古电网包二区全年盛行西北风,每年风速3 m/s以上超过330天,是包头风能储量最富足的地区之一。根据测风塔收集到的信息,由图1可以看出,风机轮毂高度年均风速为6.6 m/s,有效风速(3~25 m/s)时数为7843 h,约占全年的90%;风速主要分布在5~10 m/s之间,小时数约占全年的71%;年有效风功率密度为201.96 W/m²。该地区风能丰富,风-储联合系统作为黑启动电源具备可能性。



(a) 月平均风速



(b) 年风速概率密度分布

图1 包头地区典型年风速分布

Fig. 1 Typical annual wind speed distribution in Baotou

基于黑启动技术规范^[18],结合2004年11月内蒙古西部电网黑启动试验经验,选择包二火电厂(2台200 MW机组、3台300 MW机组)的300 MW机组作为预案中首先启动的火电机组,其主要辅机启动时序和参数如表1所示。

包二区具体黑启动技术方案为:由220 kV万胜变电站接入的华电巴音、中广核繁荣、华电红泥井、华固4个风电场及由500 kV春坤山变电站接入的金风达茂风电场作为黑启动备用电源,继而启动包二热电厂容量为300 MW的3号火电机组。具体黑启动路径如图2所示。

表 1 300 MW火电机组主要辅机启动时序和参数
Table 1 Startup Sequence and parameters of main auxiliary equipment of 300 MW thermal power unit

启动时间	名称	容量/kW	启动时间/s
0:00	电动给水泵	9500	6
0:15	循环水泵	3500	4
0:25	引风机	3700	3
0:35	送风机	1600	10
0:40	凝升泵 (凝结水泵)	2700	2
0:48	一次风机 (排粉机)	2400	7
0:55	磨煤机	1600	2

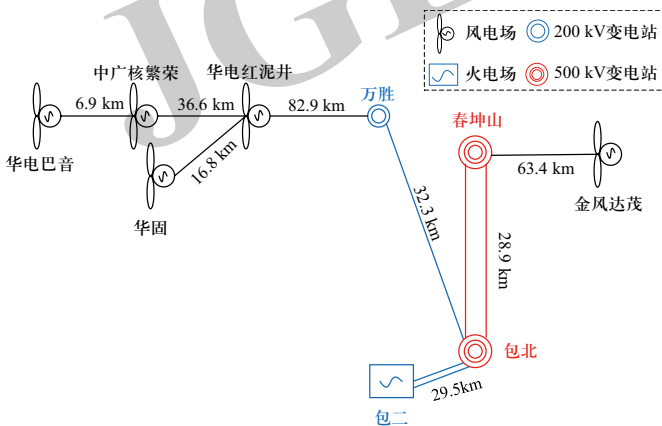


图 2 包头地区风-储联合系统黑启动方案路径示意图
Fig. 2 Schematic diagram of the black-start scheme of the wind-storage combined system in Baotou

1.2 风-储联合系统黑启动过程

利用风-储联合系统作为黑启动电源，电力系统停电后的恢复过程如图3所示。首先，确定风-储联合系统是否可以作为黑启动电源以及参与黑启动的风电场和储能电站；其次，储能系统自启动，建立稳定的厂用母线电压、频率等，并给风电场汇集系统供电，风电机组利用已建立的电压、频率参考信息启动并平稳运行；储能电站辅助风电场作为主力电源给输电线

路、变压器至火电厂的厂用电母线充电；火电厂辅机启动后再启动火电机组；逐步扩大供电范围，直至完成后续电网恢复。

2 黑启动方案可行性分析

作为黑启动电源的发电系统，在电网全黑状态下，必须具备自启动能力、功率调控灵活以及进相运行能力。因此，本文主要从自启动能力以及出力可信度2个方面来评估风电参与黑启动方案的可行性。

2.1 风-储联合系统黑启动能力分析

风电场的正常启动需要变电站带电后，给场内汇集输电线路送电，风电机组升压变压器带电后且电压和频率稳定时，风力发电机组即可启动，因此风电场黑启动时需由储能系统在风电场内先建立稳定的参考电源，且有一定带载能力。

由于风电场之间地理和电气距离较远，单个储能发电单元或电站建立的电源在经过不同变电站间多次电压变换后，可能会因线路和变电设备的损耗大或动态无功调节要求高，使得风电机组难以可靠启动，因此需分析储能选址。多储能系统协同风电系统作为黑启动电源参与黑启动，恢复供电。

1) 储能系统选型。

储能系统作为电网黑启动的“打火机”，具备启动速度快、设备布点灵活、调节能力佳、能够四象限运行等优点，可以有效缓解风电随机性、波动性对黑启动系统造成的不利影响，为后续电网恢复过程中电压和频率稳定奠定了基础。

储能技术按其电能转换方式的不同可以分为电化学储能、热储能、机械储能、电磁储能和化学储能等。目前，电化学储能规模占比最大，布点灵活，不受外界环境的限制，可以直接充放电，是未来的重点发展方向。目前比较成熟的电化学储能技术性能对比如表2所示。

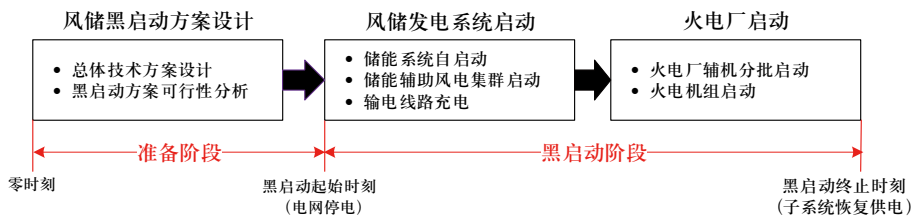


图 3 风-储联合系统黑启动过程示意图

Fig. 3 Schematic diagram of the black-start process of the wind-storage combined system

表2 各类电池储能技术特点对比表

Table 2 Comparison of various battery energy storage technology characteristics

储能方式	铅酸电池	钠硫电池	液流电池	锂电池
能量密度/(Wh·kg ⁻¹)	30~50	150~240	10~30 Wh/L	75~200
功率密度/(W·kg ⁻¹)	75~300	150~230	16~33 W/L	150~315
功率等级/MW	0~40	0~15	0~50	0~50
响应时间	<1 s	<1 s	s级	<1 s
充放电效率/%	60~70	70~80	75~85	80~90
循环寿命/a	5~15	10~15	5~10	8~20
循环次数	500~1000	2500	12 000+	1000~10 000+
发展阶段	成熟	商业	示范到商业	商业
是否具有黑启动能力	是	否	否	是

钠硫电池在使用过程中如发生断电,会导致电池报废,且启动和停止时间长、生产成本低、存在安全隐患,可能不适用黑启动这类薄弱电网的应用场景。液流电池储能系统运行需要额外的电泵等辅助设备,在电网薄弱的情况下难以可靠工作,不适合作为黑启动电源。铅酸电池建设成本较低,但寿命短、需要经常更换,且铅酸电池的使用存在金属污染,对社会环境造成影响。

综上,结合风电黑启动对储能的要求,选择目前

电网应用较成熟的锂电池作为辅助风电场参与黑启动的储能电池。

2) 储能系统选址。

储能系统可以接入电源侧、电网侧、配网侧、用户侧。目前电源侧储能主要用于调频及减少弃电^[19-20]。如图4所示,根据风电机组、风电场、风电场群、风电集群的电气汇集特点,以下分析比较3种风-储联合系统储能配置方案。

方案1: 风电集群并网节点配置大型储能电站。

在风电集群出口并网母线处建立大型储能电站,在日常运行中可以实现平滑出力、调频调峰、自动发电控制等功能^[21-23]。但黑启动时,从储能电站到风电机组自用电系统的供电需要经过多次电压变换(尤其是汇集站型接线方式),为启动风电场充放电的线路距离长、损耗大,且黑启动实施时需一步步进行倒闸带电等操作,效率较低。

方案2: 风电场群汇集母线处配置中型储能电站。

将风电场集群划分为若干部分,在风电场群并网母线处建立1个或多个中小型储能电站,既可以在电网正常运行时实现调峰、调频等功能,又可以在大停电后,以较快速度建立各风电场厂用母线电压、频率等参考信息。该配置方案不仅可以缩短储能系统启动风电机组的电气路径,而且可以发挥多个储能系统在整个黑启动过程中的联合效益。

方案3: 风电场汇集线母线处配置小型储能电站。

将储能系统配置在风电场汇集线母线处,虽然可以进一步缩短储能系统启动风电机组的电气路径,但各风电场都配置储能系统,利用率低,可行性和经济性较差。

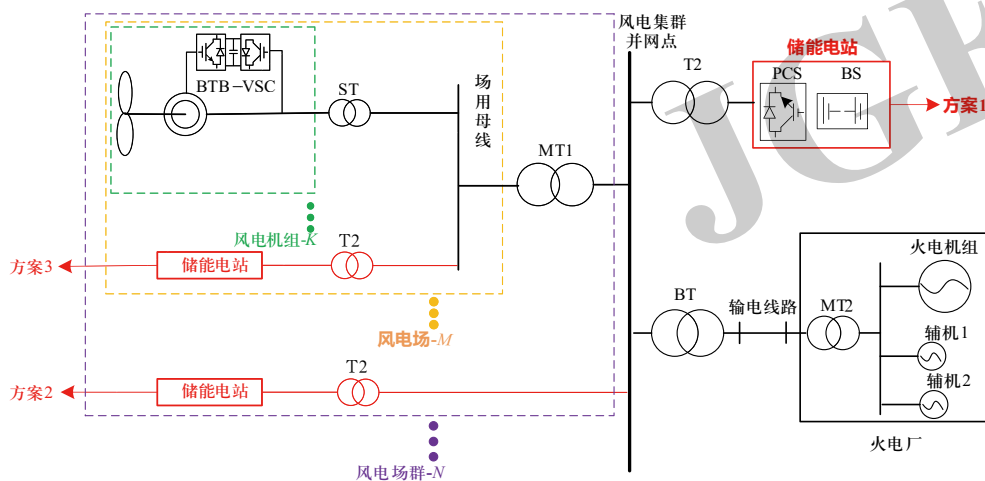


图4 风-储联合系统黑启动的储能选址方案示意图

Fig. 4 Schematic diagram of energy storage site selection scheme for black-start of wind-storage combined system

表3 风-储联合系统储能配置方案对比表

Table 3 Comparison of energy storage configuration schemes for wind-storage combined system

	方案1	方案2	方案3
电气位置	多风电场 汇集升压站	风电场汇集站	风电场内低压 侧汇集线母线
电压等级/kV	35/220	35/220	35
储能系统功率 /MW	0~100	0~20	0~100
启动风电机组 电气距离	较长	较短	最短
是否能经济地 兼顾储能系统 日常运行	否	是	是
综合可行性和 经济性	差	强	较差

针对本文研究的包头电网案例，根据待恢复电源具体情况，选择在华电巴音、中广核繁荣、华电红泥井和华固4个风电场的汇集处建立1座或2座储能电站，在金风达茂风电场汇集母线处建立1座储能电站，如图5所示。

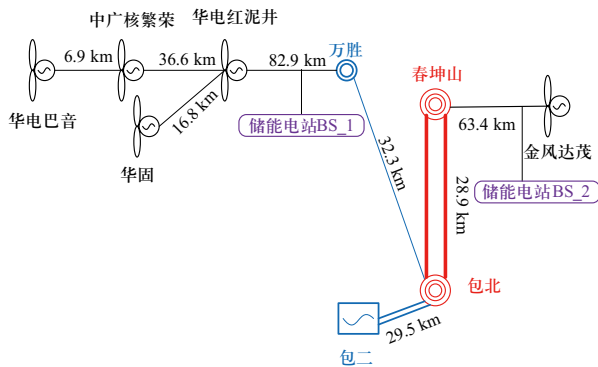


图5 多储能电站位置方案示意图

Fig. 5 Configuration diagram of multi-energy storage stations

3) 多储能电站协调控制。

多储能电站间的协调体现在各个储能电站出力如何分配。根据可充放电情况确定各储能电站的黑启动出力情况。

当系统要求储能电站充电时，根据下式求出各储能电站的参考功率值 $P_{bess,i}$ 。

$$E_{bess,i}^c = S_{OCmax} - S_{OCi} \quad (1)$$

$$P_{bess,i} = \frac{E_{bess,i}^c}{\sum_{i=1}^n E_{bess,i}^c} (P_L - P_w) \quad (2)$$

当系统要求储能放电时，根据下式求出各储能电站的参考功率值 $P_{bess,i}$ 。

$$E_{bess,i}^d = S_{OCi} - S_{OCmin} \quad (3)$$

$$P_{bess,i} = \frac{E_{bess,i}^d}{\sum_{i=1}^n E_{bess,i}^d} (P_L - P_w) \quad (4)$$

式中： P_L 为火电机组辅机功率； P_w 为风电输出功率； $E_{bess,i}^c$ 、 $E_{bess,i}^d$ 分别为第*i*个储能电站的可充、放电能力； S_{OCmax} 、 S_{OCmin} 分别为储能电站允许荷电状态的最大值和最小值。

2.2 风-储联合系统出力可信度分析

从图6可以看出，在黑启动最小出力需求约束下，该风电场黑启动可行时段（风电场输出功率大于待启动火电厂辅机功率）为5:00~20:30，黑启动不可行时段为0:00~5:00、20:30~24:00。

本文提出以下2项指标，以判断风电黑启动的出力可信度，确定所提方案的可行性。

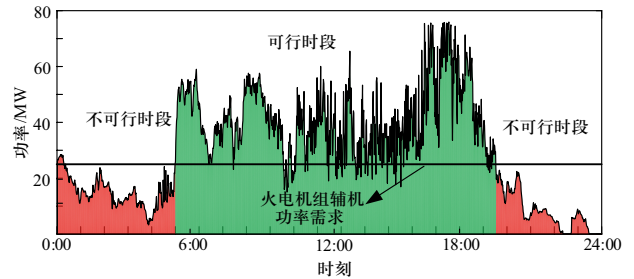


图6 某风电场某天典型出力曲线

Fig. 6 Typical output curve of a wind farm on a certain day

指标1：黑启动最小出力。风-储联合系统为黑启动电源，火电机组辅机及两者间输电设备为负载。不考虑动态过程，风-储联合系统出力应大于整个启动过程中负载最大功率，定义黑启动最小出力：

$$P_{ws_min} = (1 + \Delta P_{\%}) P_L + P_a \quad (5)$$

式中： P_L 为待启动火电厂辅机额定功率； P_a 为风电场厂用电及机组辅机自用电最大功率；系数 $\Delta P_{\%}$ 为线损率。考虑到火电机组在启动过程中，辅机电动机出力通常是额定功率的50%以下，且大部分辅机电动机都配有变频器，因此用额定功率计算最小出力有足够的裕度。

指标2：持续有效出力概率。分析风电黑启动的出力可信度，定义风-储联合系统黑启动的支持概率 p 。考虑一定时间裕度，参照表1，本文将60 min作为

一个连续时间段。概率 p 体现了黑启动时段内风电功率大于启动所需功率的概率,由各风电场黑启动支持概率叠加得到。

$$p_j = \int_{P_{ws_min}}^{P_{max}} f(x_j) dx_j \quad (6)$$

$$p = \sum p_j$$

式中: x_j 表示参与黑启动的第 j 个风电场的功率值; P_{max} 为参与黑启动的第 j 个风电场的最大功率值; $f(x_j)$ 为条件风速概率密度,即在某一条件风速约束下,相应数据点的集合在总数据中所占的比重; p_j 为参与黑启动的第 j 个风电场的黑启动支持概率。

基于蒙西电网包二区风电场实测数据,在黑启动最小出力约束下,按大小和时长2个维度分析风电出力可信度。

1) 风电场及待启动电厂基本信息。

目标负荷为待启动容量300 MW火电机组的启动辅机,总额定功率为25.5 MW。尽管黑启动过程中辅机不是全过程满负荷运行,但为保证足够的容量裕度,将该总额定功率假定为黑启动全过程所需功率。根据式(6)可得风-储联合系统作为黑启动电源的最小出力应为28.67 MW。风电场具体参数如表4所示。

表4 风电场参数

Table 4 Parameters of wind farm

风电场	编号	装机容量/MW	机组台数	单机容量/MW
华电巴音	FS_1	49.5	33	1.5
中广核繁荣	FS_2	49.5	33	1.5
华电红泥井	FS_3	99	66	1.5
华固	FS_4	199	133	1.5
金风达茂	FS_5	49.3	58	0.85

2) 风电出力特性分析。

包二区风资源优渥,由表5包二区全年风电出力累计概率可以看出,低于5%额定出力的概率仅为5%,全年中57%的风电出力超过额定出力的30%,全年风电出力超过黑启动最小出力的概率为77%。

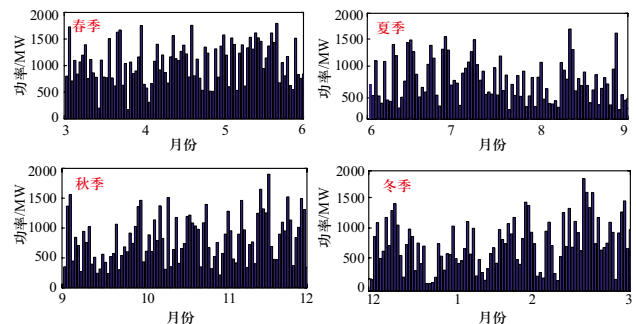
从图7包二风电出力特性曲线可以看出,春季风电平均发电量比其他季节较大;秋季次之,风力发电最大值出现在秋季;夏、冬季发电量偏少。由此印证了春、秋季节风电黑启动可行性较大,但并不绝对,表明风力发电复杂多变的特性。相较于季节变化,其日变化规律不太明显,夜晚发电相对较多,正午较

少。受自然风的影响,风电输出功率波动较大,具体表现为较大的日变化率和时令变化率。

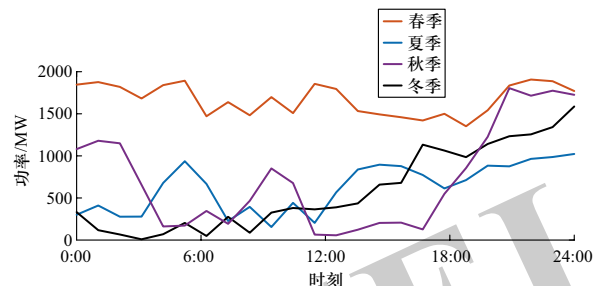
表5 全年风电出力累积概率

Table 5 Cumulative probability of annual wind power output

风电出力与额定出力之比/%	累积概率/%
90~100	12
70~90	24
50~70	34
30~50	57
10~30	78
5~10	95



(a) 风电季出力曲线



(b) 风电日出力曲线

图7 包二地区风电出力特性曲线

Fig. 7 Wind power output characteristic curve in Bao'er area

为评估多个风电场联合参与黑启动的优势,表6分析了1至5座风电场的风电持续出力有效概率。显然,随着参与风电场的增多,持续有效出力概率显著增加。当5个风电场全部启动时,风电黑启动持续有效出力概率最大,最高可达84.6%。

由表6可见,由于风资源的随机性,区域持续有效出力在各个季节均达不到100%。储能系统的加入进一步提高出力有效概率,将风电不足部分补足并可有效提高风电黑启动的控制力和友好性。

表 6 风电场持续有效概率评估

Table 6 Continuous effective probability of wind farms

启动风电场 编号	%				
	春季	夏季	秋季	冬季	全年
FS_1	22.32	10.41	13.14	11.69	14.68
FS_1~2	45.83	26.4	31.91	31.06	34.55
FS_1~3	70.33	51.22	55.17	54.73	58.55
FS_1~4	82.24	66.75	71.84	69.74	73.04
FS_1~5	84.6	71.51	75.82	73.91	76.74

3 风-储联合系统黑启动仿真分析

风-储联合系统黑启动过程主要有4个阶段：①储能单元自启动后使相关线路、变压器逐步带电到风电机组并网点；②风-储联合系统使相关线路、变压器逐步带电到火电机组厂用电母线；③各台辅机电机等负载按一定顺序按需并网，随着负荷增加需要逐台

启动多台风电机组；④上述过程期间如果因频率稳定或电压稳定能力不足，需要更多储能单元并网。风-储联合系统黑启动是极其复杂的动态过程，在风电出力波动、各类负载并网带来冲击等情况下，储能单元能否稳定频率和电压、能否稳定并列运行都是非常复杂的问题，特别是储能单元和风电机组的控制策略等问题有待后续深入研究。

如图8所示，在PSCAD中搭建风-储联合系统黑启动仿真简化模型，仅用于验证其可以实现线路充电、带阻性负载等功能，初步验证方案的可行性。风电场采用双馈风电机组聚合模型，容量为1 MW，采用常规PQ控制策略；储能系统采用V/f控制，作为黑启动系统的电压源，容量均为0.2 MW/0.3 MWh，初始负荷为0.3 MW。

算例条件：0 s时储能自启动，三相电源建立母线电压、频率；0.1 s时风电机组启动，带0.3 MW负荷；1.2 s时投入0.3 MW等效线路负荷，1.5 s时投入0.35 MW等效辅机负荷。假设黑启动期间风速为10 m/s不变。

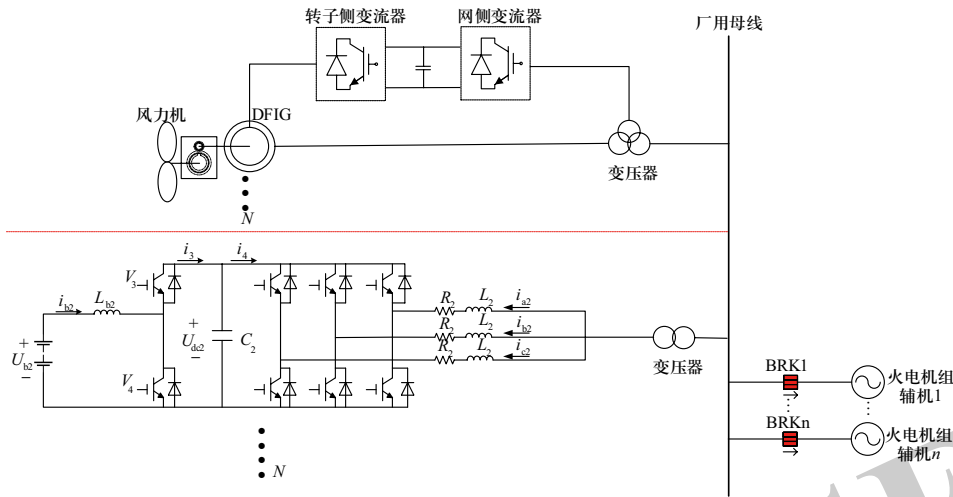


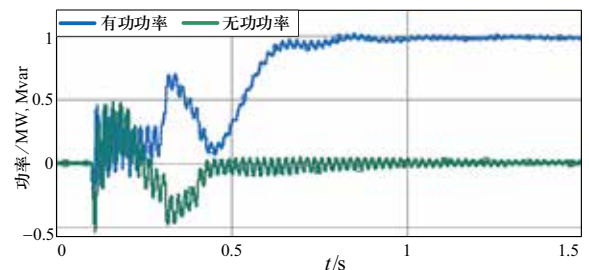
图 8 风-储联合系统主电路结构示意图

Fig. 8 Schematic diagram of main circuit structure of wind-storage combined system

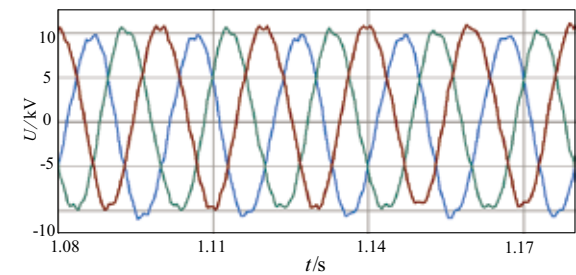
3.1 风电机组启动仿真分析

由图9 (a) 可知，风电机组0.1 s检测到母线电压频率信号后投入运行。由于启动时间较少，可认为风速不变 (10 m/s)。启动初期，转速略升高，存储动能，降低由于风机投入系统功率大范围波动导致的频率波动程度；随后转速降低直至稳定。经过一段时间的震荡，在0.7 s左右进入稳定发电状态。系统侧三相电压和三相电流波形呈现较好的正弦度。启动过程中厂用母线电压由10.2 kV跌落至9.7 kV，频率最大偏差为0.19 Hz，谐波畸变率最大为3.12%。由此可知，虽

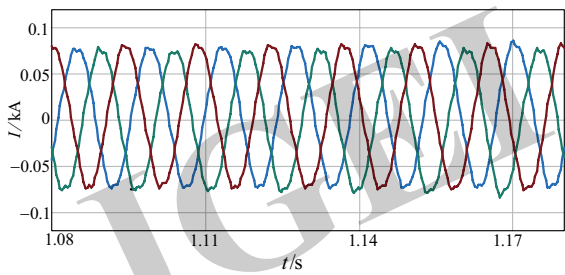
然风机启动对黑启动系统有短暂冲击，但经过储能快速调节使其恢复在规定范围之内，黑启动正常进行。



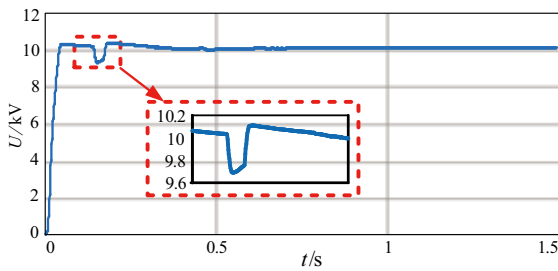
(a) 风电机组有功/无功功率变化



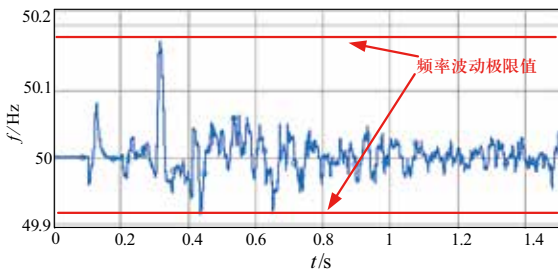
(b) 网侧三相电压变化波形



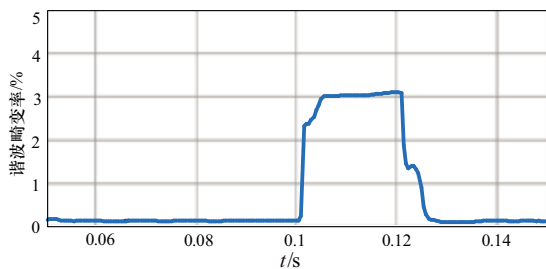
(c) 网侧三相电流变化波形



(d) 风机网侧厂用母线电压



(e) 风机网侧厂用母线频率



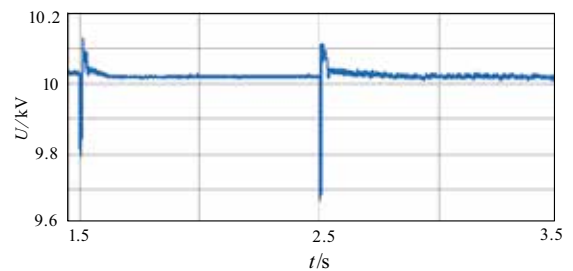
(f) 厂用母线电压谐波畸变率

图9 风电机组启动运行仿真图

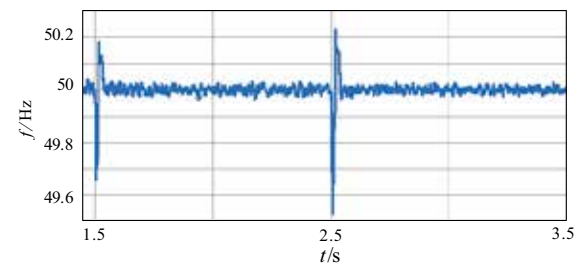
Fig. 9 Startup simulation results of wind turbine generator

3.2 火电机组辅机启动仿真分析

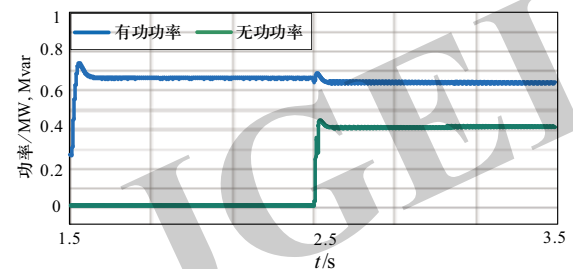
由图10(a)、(d)、(e)可知,风-储联合系统可根据外部负荷变化调整有功和无功功率的输出。根据图10(a)、(b),在0.35 MW、0.4 MVA负荷分别投入时,风电场用母线电压瞬时跌落,其中0.35 MW阻性负荷投入时,在1.5 s时刻风电场用母线电压跌落0.2 kV即0.015 pu,0.4 MVA容性负荷投入时,在2.5 s时刻电压跌落0.1 kV即0.027 pu,均满足风电机组机端电压波动要求。负载投入时母线频率波动在黑启动频率波动的允许范围内。同时,由图10(f)可知,各储能电站可根据自身充放电能力来确定参考功率。



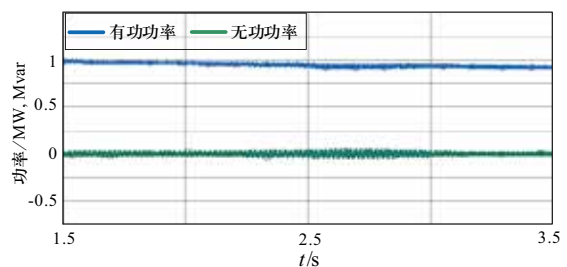
(a) 风电场用母线电压变化



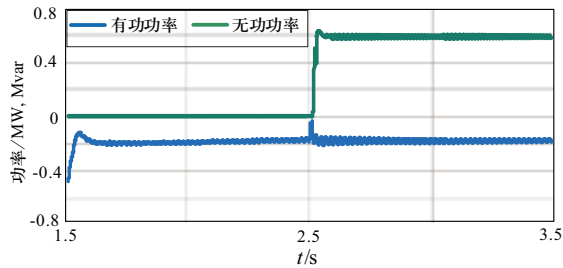
(b) 风电场用母线频率变化



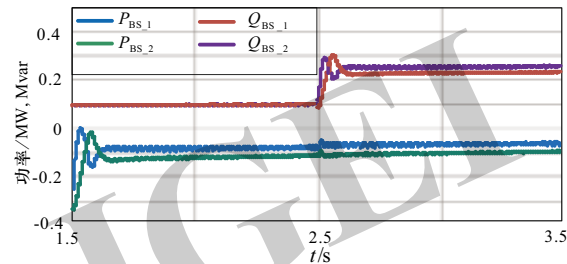
(c) 火电机组辅机功率变化



(d) 双馈风电机组输出功率变化



(e) 储能输出功率变化



(f) 各储能发电系统输出功率变化

图 10 火电机组辅机启动运行仿真图

Fig. 10 Startup simulation results of auxiliary equipment of thermal power unit

4 结论

本文针对少(无)水风多地区局部电网的黑启动问题,提出并设计了以多储能和多风电场为启动电源的黑启动方案,得出以下结论。

1) 结合黑启动技术规范,提出风电汇集地区可以配置电气位置合适的锂电池储能系统及相应的协调控制策略,通过风-储联合系统黑启动过程4个主要阶段,实现黑启动路径。

2) 提出持续有效出力概率,计算风电汇集地区全年能满足黑启动的时段占比,衡量地区风电黑启动成功概率。以包二区风电场群为例,满足风电黑启动全年时间概率最高可达84.6%,其余16.4%时间段可由更多储能系统出力补足。

3) 基于PSCAD仿真储能自启动、风电场启动及火电机组辅机启动3个过程,初步从暂态层面验证了风电-储能黑启动的可行性。

参考文献

[1] 刘玉田,王洪涛,叶华. 电力系统恢复理论与技术[M]. 北京:科学出版社,2014:15-16.
 [2] LENG Y J, LU Q, LIANG C Y. Black-start decision making based on collaborative filtering for power system restoration[J]. International Journal of Electrical Power & Energy Systems,

2018, 100: 279-286.

- [3] PATSAKIS G, RAJAN D, ARAVENA I, et al. Optimal black start allocation for power system restoration[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2018, 33(6): 6766-6776.
 [4] CAPIK M, OSMAN YILMAZ A, CAVUSOGLU İ. Hydropower for sustainable energy development in Turkey: The small hydropower case of the Eastern Black Sea Region[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2012, 16(8): 6160-6172.
 [5] 吴涛,郭嘉阳,李华伟. 华北电网利用十三陵抽水蓄能电厂水机组进行黑启动的试验研究[J]. 电网技术, 2001, 25(3): 56-58.
 WU Tao, GUO Jiayang, LI Huawei. Investigation of black start for North China power system by Shisanling hydroelectric generating sets[J]. Power System Technology, 2001, 25(3): 56-58(in Chinese).
 [6] 顾雪平,李新军,杨超,等. 考虑风电参与的黑启动方案[J]. 电力自动化设备, 2020, 40(1): 31-37.
 GU Xueping, LI Xinjun, YANG Chao, et al. Black start scheme considering wind power participation[J]. Electric Power Automation Equipment, 2020, 40(1): 31-37(in Chinese).
 [7] 叶茂,刘艳,顾雪平,等. 基于动态风电穿透功率极限的黑启动方案制定[J]. 中国电机工程学报, 2018, 38(3): 744-752.
 YE Mao, LIU Yan, GU Xueping, et al. Black start scheme formation considering dynamic wind power penetration limit[J]. Proceedings of the CSEE, 2018, 38(3): 744-752(in Chinese).
 [8] 张威. 风光柴蓄交流微电网的协调控制与黑启动策略研究[D]. 武汉:华中科技大学,2016.
 [9] 刘力卿. 储能型风电场作为电网黑启动电源的控制技术研究[D]. 北京:华北电力大学(北京),2017.
 [10] LIU W P, LIU Y T. Hierarchical model predictive control of wind farm with energy storage system for frequency regulation during black-start[J]. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 2020, 119: 105893.
 [11] WANG A H, GANG H, QIU P, et al. Self-starting analysis of new energy system with wind power and energy storage[C]//2018 37th Chinese Control Conference (CCC). July 25-27, 2018, Wuhan, China. IEEE, 2018: 7422-7427.
 [12] LIU W P, LIU Y T. Enabling wind farm to be black-start source by energy storage[J]. The Journal of Engineering, 2019, 2019(18): 5138-5141.
 [13] 胡静,李琼慧,黄碧斌,等. 适应中国应用场景需求和政策环境的电网侧储能商业模式研究[J]. 全球能源互联网, 2019, 2(4): 367-375.
 HU Jing, LI Qionghui, HUANG Bibin, et al. Business model research of energy storage on grid side adapted to application scenarios and policy environment in China[J]. Journal of Global Energy Interconnection, 2019, 2(4): 367-375(in Chinese).
 [14] 李建林,牛萌,王上行,等. 江苏电网侧百兆瓦级电池储

- 能电站运行与控制分析[J]. 电力系统自动化, 2020, 44(2): 28-38.
- LI Jianlin, NIU Meng, WANG Shangxing, et al. Operation and control analysis of 100 MW class battery energy storage station on grid side in Jiangsu power grid of China[J]. Automation of Electric Power Systems, 2020, 44(2): 28-38(in Chinese).
- [15] 孙偲, 陈来军, 邱欣杰, 等. 基于合作博弈的发电侧共享储能规划模型[J]. 全球能源互联网, 2019, 2(4): 360-366. SUN Cai, CHEN Laijun, QIU Xinjie, et al. A generation-side shared energy storage planning model based on cooperative game[J]. Journal of Global Energy Interconnection, 2019, 2(4): 360-366(in Chinese).
- [16] 尹瑞君, 郝文海. 调控一体化模式下的包头电网安全运行措施分析[J]. 内蒙古电力技术, 2012, 30(5): 101-104. YIN Ruijun, HAO Wenhai. Analysis of measures to Baotou power network safe operation under control integration mode[J]. Inner Mongolia Electric Power, 2012, 30(5): 101-104(in Chinese).
- [17] 李丹丹, 鲍海, 邓昆玲. 包头地区2010年网架结构优化及分析[J]. 内蒙古电力技术, 2009, 27(增刊1): 5-8. LI Dandan, BAO Hai, DENG Kunling. Analysis and optimization to power grid structure in Baotou district in 2010[J]. Inner Mongolia Electric Power, 2009, 27(Supplement 1): 5-8(in Chinese).
- [18] 国家电力调度通信中心. 电力系统黑启动方案编制和实施技术规范(试行)[S]. 北京: 2005.
- [19] 王彦虹. 风储联合系统中储能选址定容及控制策略研究[D]. 上海: 上海交通大学, 2017. WANG Yanhong. Research on the control strategy and optimal sizing of the battery storage in the wind-storage hybrid system[D]. Shanghai: Shanghai Jiaotong University, 2017(in Chinese).
- [20] 丁明, 方慧, 毕锐, 等. 基于集群划分的配电网分布式光伏与储能选址定容规划[J]. 中国电机工程学报, 2019, 39(8): 2187-2201. DING Ming, FANG Hui, BI Rui, et al. Optimal siting and sizing of distributed PV-storage in distribution network based on cluster partition[J]. Proceedings of the CSEE, 2019, 39(8): 2187-2201(in Chinese).
- [21] CHEN Q W, JIANG P, LI H F, et al. A new black-start path optimization algorithm for isolated grid[C]//2016 IEEE PES Asia-Pacific Power and Energy Engineering Conference (APPEEC). October 25-28, 2016, Xi'an, China. IEEE, 2016: 99-103.
- [22] LENG Y J, WANG D, ZHAO S P. Black-start decision making based on affinity propagation and TOPSIS[J]. Electric Power Components and Systems, 2019, 47(14/15): 1387-1397.
- [23] WANG D J, GU X P, ZHOU G Q, et al. Decision-making optimization of power system extended black-start coordinating unit restoration with load restoration[J]. International Transactions on Electrical Energy Systems, 2017, 27(9): e2367.

收稿日期: 2020-05-09; 修回日期: 2020-09-28。



李翠萍

作者简介:

李翠萍(1982), 女, 博士, 副教授, 研究方向为风力发电运行分析与控制、大规模储能在新能源发电中的应用。通信作者, E-mail: licuipingabc@163.com。

张世宁(1995), 女, 助理工程师, 研究方向为新能源参与黑启动的控制策略。

李军徽(1976), 男, 博士, 教授, 研究方向为风力发电运行分析与控制、大规模储能在新能源发电中的应用。

(责任编辑 张宇)