

风储发电系统黑启动模型及仿真研究

风储联合发电系统不仅在运行时能够平滑风场出力 and 改善电能质量, 同时也能作为电网黑启动时的备用启动电源, 该研究方向是实现电网黑启动的新的途径。风储系统在黑启动过程中不同于其他可控启动电源, 存在着小系统稳定和出力波动的特点。依据风速、负荷大小及储能当前电量等数据给出风储系统实现黑启动的判据, 通过风储系统的控制策略进行孤岛稳定和含负荷系统的稳定性分析, 结合具体仿真算例, 对所提出的理论进行了校验。

孙峰¹ 朱钰¹ 王刚² 刘莉^{2/1}. 辽宁省电力有限公司电力科学研究院

2. 沈阳工程学院



孙峰/工程师

0 引言

近年来, 随着传统能源的日益枯竭, 风能、太阳能等新兴能源大规模接入电力系统的比例逐年增加。然而可再生能源的波动性和间歇性给现有电力系统运行带来了新的挑战, 需要额外的备用容量动态平衡可再生能源出力。在可再生能源侧配置储能设备是解决大规模可再生能源发电接入电网的一种有效技术, 主要作用包括平滑出力、跟踪调度计划、提高可再生能源发电的可预测性和经济性、实现削峰填谷、热备用和提高电能质量, 同时大容量的可再生能源与储能相配合使可再生能源作为黑启动电源有了实现的可能。

黑启动是指整个系统因故障停运后, 不依赖别的网络帮助, 通过系统中具有自启动能力机组启动, 带动无自启

动力机组, 逐渐扩大系统恢复范围, 最终实现整个系统的恢复。制定黑启动方案, 电网黑启动电源多集中在水电机组、燃气机组、外网接入电力以及一些小火电机组。根据作为黑启动电源的特点, 储能系统与风电系统组成的风储系统也同样具备黑启动机组的条件, 目前国内外对于新能源发电系统的黑启动能力大多是一种憧憬, 真正的研究工作没有实质性的开展。

文献 [1] 针对天津电网的具体情况, 对黑启动电源的选择路径进行了讨论, 论述了黑启动电源来源不同的处理情况, 介绍了黑启动子系统的划分, 以及天津电网黑启动的路径选择, 并分析了子系统之间的合环冲击对系统稳定的影响。

文献 [2] 结合浙江电网的实际情况确定了省、地两级电网的黑启动电源, 分析黑启动开始后自励磁、过电压和系统稳定等问题, 建立基于浙江电网实际情况的黑启动方案。

文献 [3] 研究河池电网黑启动方案, 对两种黑启动子方案进行分析比较, 确定黑启动实施方案, 分析研究了黑启动过程中应注意的问题, 对黑启动过程中涉及的相关校验以及逐步恢复系统负荷等方面进行了研究。

文献 [4] 和文献 [5] 分别研究了苏丹电网和意大利高压电网的黑启动方案; 文献 [6] 进行了专家系统分析电网黑启动的相关研究; 文献 [7] 详细介绍了电力系统全停后黑启动的有关原理及其理论分析。

综上所述, 国内外黑启动研究的主

关键词/Keywords

风储系统·
黑启动·
启动判据·
控制模型·

要方向侧重于启动电源的选取、启动路径的优化和相关稳定性等方向，而风储系统黑启动研究基本处于起步阶段。如果风储系统黑启动研究能够实现，将填补国内外这部分研究的空白，同时也为电网黑启动电源提供更丰富的选择。

本文的研究基于大规模全钒液流储能的风储新能源发电系统，探索通过该系统实现地区黑启动方案的技术可行性和工程可行性，内容主要包括风电储能发电系统的控制技术路线、风电储能系统的功率管理、制定储能系统控制策略及制定风储系统黑启动研究方案，为辽宁北部少水电地区的黑启动电源提供了一个新的方向。

1 风储发电系统黑启动的特点

1.1 风储发电系统的运行特点

风储系统能够平滑风场出力，根据风力值的变化和储能系统容量的限制，将利用储能系统平滑风机的有功出力，实现不弃风，以及使风场的输出功率相对稳定。

1.2 黑启动孤岛稳定

储能系统作为风储系统的启动电源启动后，还要使风机启动组成风储的联合发电系统。当风

机启动后形成了一个小的孤岛系统，此时系统的功率平衡功能需储能系统来完成。储能系统将风机发出多余的电力进行存储，此时启动风机总有功不应超过储能系统容量，风机与储能系统共同组成的风储系统需要能够保证孤岛系统的稳定运行。

1.3 含负荷冲击的孤岛系统稳定

风储发电系统在实现孤网运行后，系统在干扰下和负荷冲击下能否保持稳定运行，是风储系统能否作为黑启动电源实现黑启动的关键。

2 风储发电系统黑启动模型

2.1 风机模型

双馈风力发电系统可通过功率控制，使风力机系统能够在不同风速下，通过调节风叶桨距角，来实现最大风能捕捉^[6]。双馈风力发电机在结构上是类似一个带有滑环的绕线式感应电机，它的定子侧直接连接电网，转子侧通过一个背靠背的变流器系统（即转子侧变流器和网侧变流器）与电网相连接，背靠背变流器系统可实现电机的控制和转子侧功率的双向流动功率。

风机矢量控制如图1所示。

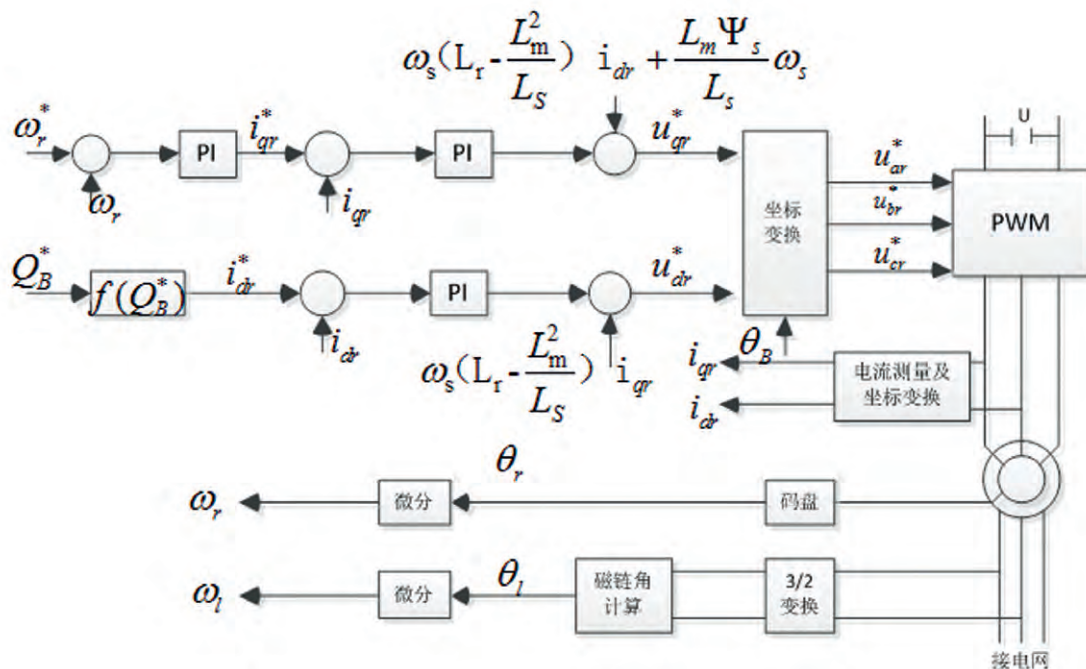


图1 风机矢量控制

2.2 全钒液流储能模型的建立

钒液流电池使用2个转动的液流泵不断地将储存于2个储液罐中的电解液输入电池堆中，放电后的电解液流出反应器，这样可以消除浓差极化。流动的电解液储罐不仅可增加电池储能容量，而且电解液可根据需要随时增加或更换。

钒液流电池的等效电路如图2所示。考虑到钒液流电池的物理特性和数学特性，电池模型如下： S_{SOC} 代表活性化学物质的数量，并且被等效成一个更新的动态变量；电池堆电势被等效成一个受控的电压源，根据 S_{SOC} 的变化而变化；泵损耗被等效成一个受控的电流源，通过泵损电流 I_{PUMP} 来控制， I_{PUMP} 的大小受电池组堆的电流 S_{SOC} 和 I_{PUMP} 的影响。

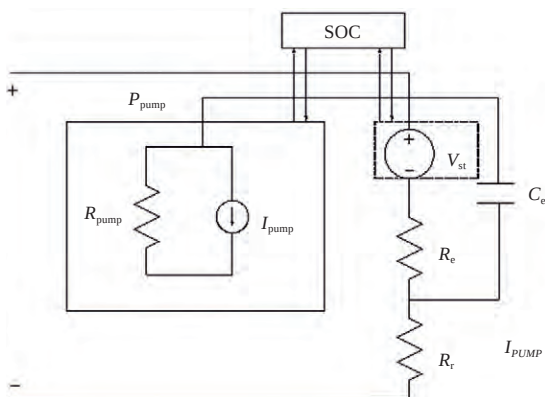


图2 钒液流电池等效电路模型

全钒液流电池仿真模块图如图3所示。

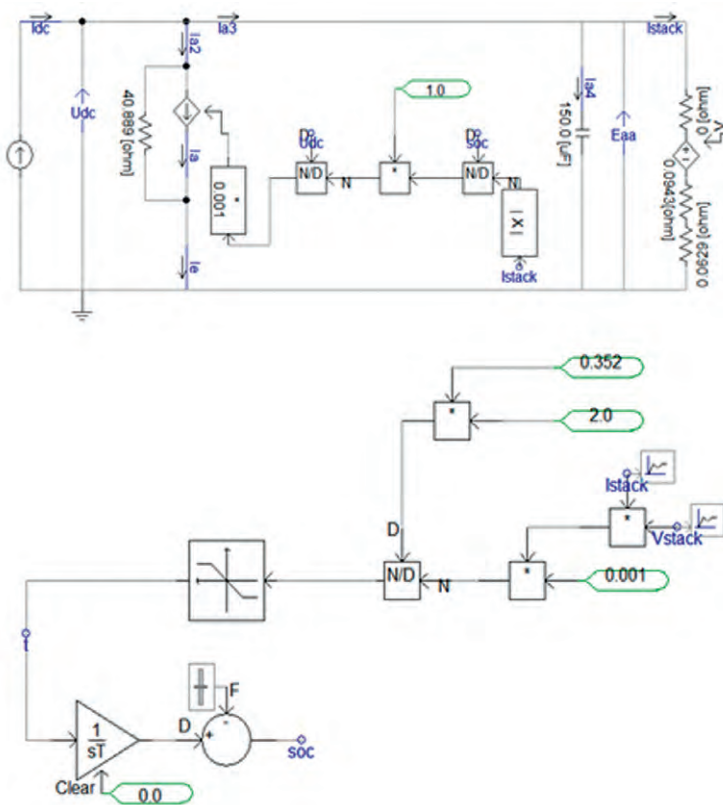


图3 在PSCAD中搭建的全钒液流电池仿真模块

2.3 储能逆变器模型的建立

本文是基于RXSV-T系列储能逆变器进行研究的RXSV-T系列储能逆变器采用电压源型两电平三相桥拓扑结构，其原理框图如图4所示。

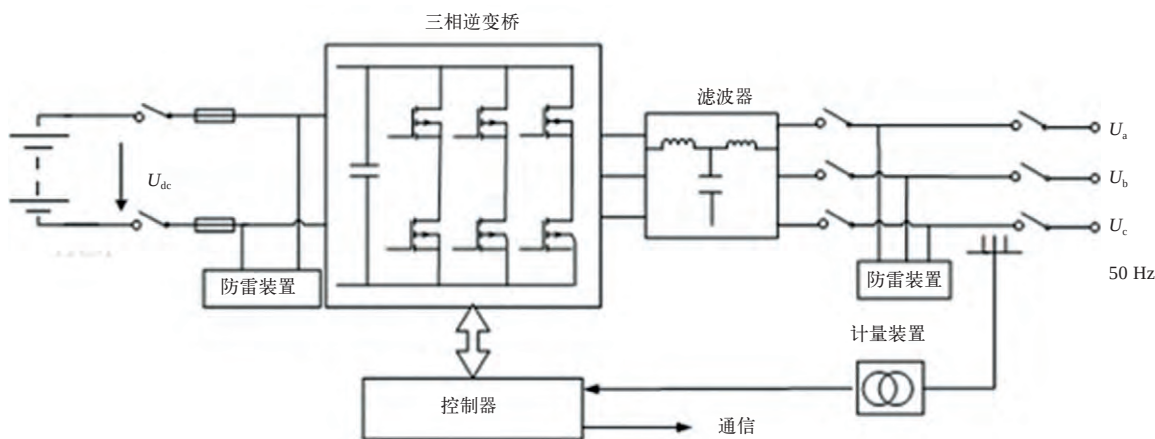


图4 储能逆变器原理图

逆变器工作时，首先交流断路器闭合，进行预充电，然后交流接触器闭合，控制器（DSP）发出触发脉冲，IGBT开始工作，调整直流母线电压。当直流母线电压等于储能电池电压时，直流

接触器闭合，DSP采集直流电压、直流电流、交流电压和交流电流等信号，进行矢量逻辑运算，根据系统指令信号，逆变器输出所需要的有功功率和无功功率。控制器同时还实时判断电网及电

池状态,当发现电网或电池故障时,及时停止工作,断开直流和交流接触器,实施保护。

2.4 风储系统模型的建立

交流侧并联储能结构如图5所示。

储能系统通过 DC-DC 变流器和 PWM 变流器,经变压器连接到 690 V 低压母线上。控制系统由两部分组成:DC-DC 双向变流器和 DC-AC 变流器。其内环控制策略与双馈异步电机定子侧变流器相同,仅给出以稳定电压和有功功率输出的控制目标,给出外环电的控制策略如图6所示。

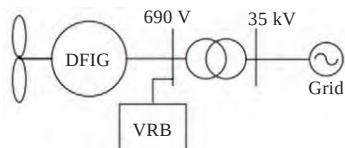


图5 交流侧并联储能结构图

液流电池储能系统输出的功率可表示为

$$\begin{cases} P_b = \frac{3}{2} u_{sd} i_{sd} = \frac{3}{2} U_s i_{sd} \\ Q_b = -\frac{3}{2} u_{sd} i_{sq} = -\frac{3}{2} U_s i_{sq} \end{cases} \quad (1)$$

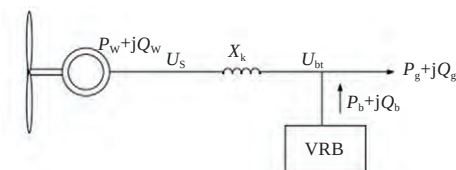


图6 储能接入风电系统等效图

储能系统双向 AC-DC 变流器及 DC-DC 变流器的控制框图如图7所示。

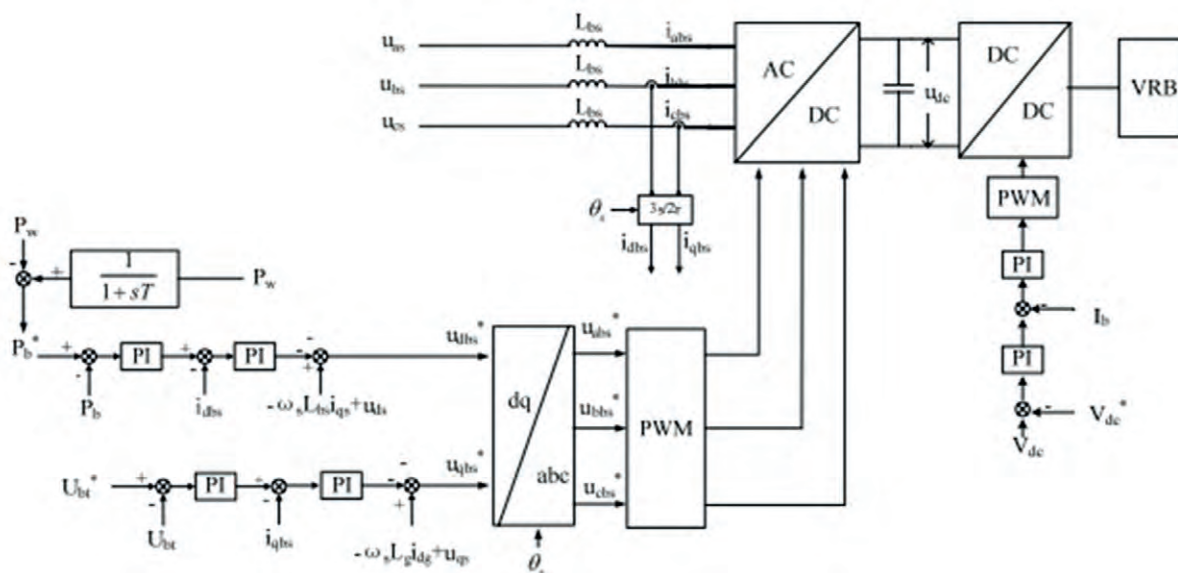


图7 储能系统双向 AC-DC 变流器及 DC-DC 变流器的控制框

3 风储系统实现黑启动的判据

3.1 实现黑启动的判据

在黑启动之初,首先由风机和储能构建稳定的孤岛系统,由于风速的实时变化,桨距角的变化有一定的响应时间,风机的输出功率并不稳定,风储系统很难平衡,根据仿真算例,提供两种解决方案。

3.1.1 黑启动方案一的判据

在风速波动较大的情况下,根据待启动负荷所需功率值 S_L 和沿线功率损耗 ΔS ,计算黑启动风场所需发的功率值 S_2 。通过判断储能容量 P_C 和储能缺额 P_{CL} 及和当前风速的风机总发电量 P_G ,限制风机出力为最小发电功率 P_{G0} (风速2 m/s),启动 n 台风机给储能充电。当风机发电量和储能容量之和达到负荷所需值时,开始给沿线线路和变压器充电,实现黑启动,无功功率由风场高压母线的SVC进行补偿,流程框图如图8所示。

$$\begin{cases} S_L + \Delta S = S_2 \\ P_L - P_C = P_G \\ P_G / P_{G0} \leq n \end{cases} \quad (2)$$

3.1.2 黑启动方案二的判据

在风速波动较小的情况下,风机出力波动较小,不用限制每台风机出力,通过在高压母线上添加卸载电阻 R 来与储能、风机构建稳定的孤岛系统,总的风机出力 P_G 按照卸载电阻经济性的要求

满足实现黑启动目标的最低要求即可。 R 的确定见式(3)，流程框图如图9所示。

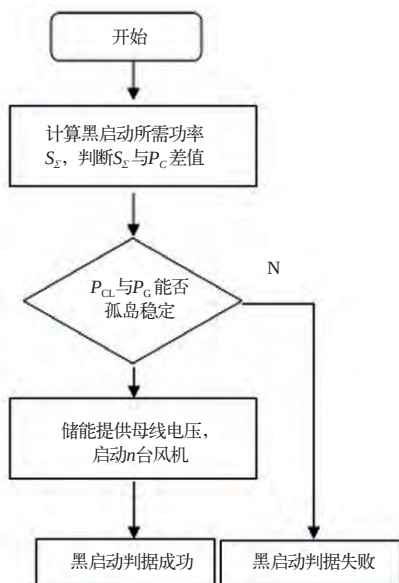


图8 黑启动判据（一）

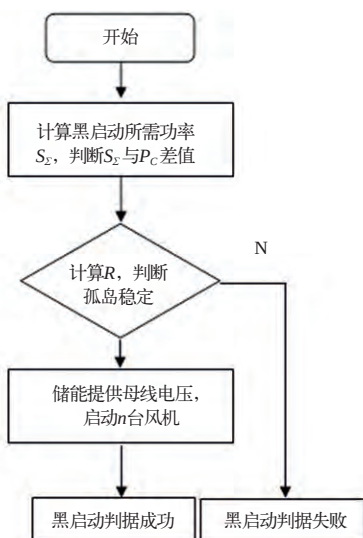


图9 黑启动判据（二）

$$\begin{cases} P_L - P_C = kP_G \\ k = (1.1 \sim 1.5) \\ P_G = P_{G1} + P_{G2} + \dots + P_{Gn} \\ R = \frac{U^2}{P_G - P_C} \end{cases} \quad (3)$$

3.2 冲击负荷的处理

风储系统黑启动判据成功后，仍需校验的是工频过电压、操作过电压、无功进相和冲击负荷等，尤其是负荷一般为待启动火电厂的各种泵，在非变频启动的条件下存在冲击电流。

黑启动机组远程启动火发电机组的戴维南等效电路如图10所示。

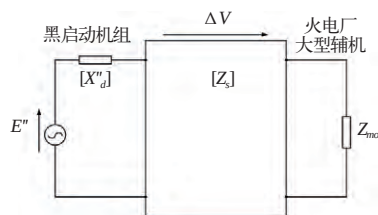


图10 黑启动机组远程启动火发电机组戴维南等效电路

根据图10所示等效电路，可得压降及发电机的输出功率为

$$\Delta V = 1 - \left| \frac{Z_{mot}}{Z_{mot} + Z_s + jX''_d} \right| \quad (4)$$

$$Pe(s) = \text{real} \left(\frac{\sqrt{3} E''}{Z_{mot} + Z_s + jX''_d} \right) \quad (5)$$

在启动感应电动机过程中，线路所消耗有功功率很小，感应电动机功率近似等于发电机的输出功率。感应电动机启动过程中的平均冲击功率 P_{el} 为

$$P_{el} = \frac{1}{1 - s_0} \int_1^{s_0} Pe(s) ds \quad (6)$$

式中， s_0 表示感应电动机在空载启动之后，带负荷运行之前的初始滑差。

3.3 黑启动方案的总体流程图

总体流程图如图11所示。

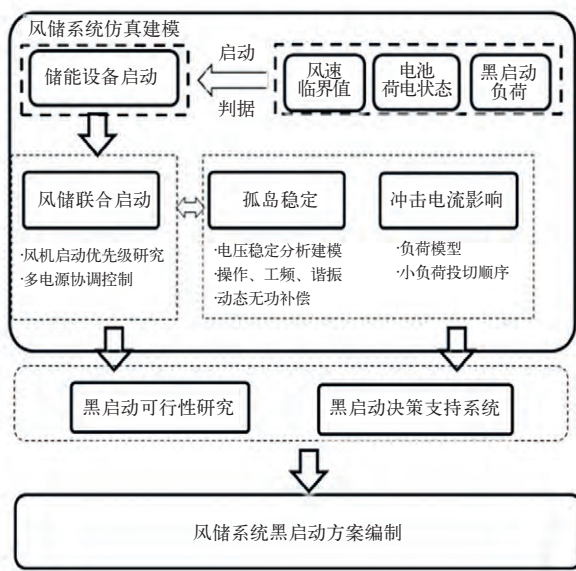


图11 黑启动方案的总体流程图

4 仿真算例

以辽宁卧牛石风电场(参数如表1所示)作为黑启动电源,待启动负荷为辽宁调兵山水电厂5 MW的

Figure 1 is a schematic diagram of the power supply system for the Shimen Mountain Pumping Station. It illustrates the power flow from the Wusheng Stone Wind Farm and Shengsheng Stone Voltage Transformer through the Longkang Wind Farm Voltage Transformer to the Shimen Mountain Pumping Station. The Shimen Mountain Pumping Station includes a main transformer (主变), a standby transformer (启备变), and a water pump (M). The Shimen Mountain Pumping Station is connected to the Shimen Mountain Power Plant (调兵山电厂) and the Water Pump (给水泵).

表1 风电场参数

设备名称	设备参数
风机	1.5 MW × 33
全钒液流电池	5 MW × 2 h、 具备无功补偿能力2.5 MVar
无功补偿装置SVC	电容器组容量6 000 kvar、 电抗器组容量6 012 kvar
风电场主变	2台SZ11-50000/66
龙康变	3台240 000 kV·A、 空载损耗120 kW、 负载损耗530 kW

表2 待启动电机参数

设备名称: YKS800-4给水泵电机	
额定功率/kW	5 200
额定电压/kV	6
额定电流/A	564
定子电阻/ Ω	0.032 4
定子电抗/ Ω	1.168
转子电阻/ Ω	0.034 2
转子电抗/ Ω	1.694
励磁电感/ Ω	50.3
定转子漏电感/ Ω	2.861 1

4.1 多风季节（风速变化较大）

此类典型条件占测风数据中较大比重55%。

表3 风储孤岛运行仿真结果 (一)

黑启动判据及启动方案		启动风机数量及容量
储能容量30%	成功 方案二	$n=5$ 4.5~7.5 MW
储能容量50%	成功 方案二	$n=4$ 3.5~5.5 MW
储能容量70%	成功 方案二	$n=2$ 2.5~3 MW

表4 风储孤岛运行仿真结果(二)

66KV母线上卸载 电阻值	无功补偿 /MV·A	各母线空载过电压 越限统计
1057~4279	-6.3	法库变母线越上限
987~4355	-5.79	火电厂高压母线越 上限
3214~4279	-7.04	法库变母线越上限

	储能充电时间/min	储能容量	无功补偿/MV·A	变频启动	非变频启动
储能容量30%	13	67%	10.3	成功	失败
储能容量50%	9	74%	9.78	成功	失败
储能容量70%	4	83%	9.04	成功	失败

4.2 多风季节（风速变化较小）

此类典型条件占测风数据中比重15%。

表6 风储孤岛运行仿真结果(一)

黑启动判断及启动方案		启动风机数量及容量
储能容量30%	成功 方案一	$n=10$ 3 MW
储能容量50%	成功 方案一	$n=7$ 2.1 MW
储能容量70%	成功 方案一	$n=4$ 1.2 MW

表7 风储孤岛运行仿真结果（二）

66 kV母线上卸载电阻值	无功补偿/MV·A	各母线空载过电压越限统计
未投入	-6.1	法库变母线越上限
未投入	-4.3	火电厂高压母线越上限
未投入	-5.17	火电厂高压母线越上限

表8 带启动电机仿真结果（多风季节，风速变化较小）

	储能充电时间/min	储能容量	无功补偿/MV·A	变频启动	非变频启动
储能容量30%	15	80%	10	成功	失败
储能容量50%	9	80%	9	成功	失败
储能容量70%	13	80%	9.74	成功	失败

4.3 少风季节

此类典型条件占测风数据中比重30%。

表9 风储孤岛运行仿真结果（少风季节）

黑启动判据及启动方案		原因
储能容量30%	不成功	
储能容量50%	不成功	充电时间过长,不满足2 h黑启动条件
储能容量70%	不成功	

5 结束语

全面分析了具有大容量全钒液流储能设备的风电厂作为全网黑启动电源的可能性，当在外界风力、储能充电量等条件具备时，风储联合发电系统具备黑启动能力。着重说明的是，当无卸载电阻时，孤岛系统中储能充电量太高会限制风机出力，不利于黑启动的快速实现，经过仿真计算，最优比例为黑启动起始时储能电量为50%~60%最优。当含卸载电阻时，储能电能越高，黑启动实现的越快，但对卸载电阻的要求也越高，经济性较差，不利于风储作为黑启动电源

的推广。

制定了完整的黑启动控制策略和启动方案，以辽宁电网真实数据为依托，搭建仿真模型，验证了本文提出的控制策略和启动方案的合理性，仿真数据证明风储联合发电系统在一定条件下，可以作为黑启动电源选择。本文的研究内容不仅有利于促进清洁能源技术及储能技术的发展和应

用，而且对于解决无水电地区的黑启动问题，提高电网抵御大面积停电都有着积极的现实意义。

参考文献

[1] 孟宪朋, 么莉, 林济铿, 等. 天津电网黑启动方案[J]. 电力自动化设备, 2010, 28(2): 108-101.

[2] 李继红, 倪秋龙, 金啸虎, 浙江电网黑启动方案编制研究[J]. 华东电力, 2010, 34(1): 26-29.

[3] 周晨, 廖一春, 探讨广西河池电网黑启动方案[J]. 广西电力, 2013, (2): 58-60.

[4] 王磊, 苏丹电网的黑启动[J]. 黑龙江电力, 2013, 27(6): 446-448.

[5] Delfmo B, Denegri G B, Invernizzi M, et al. Black-start and restoration of part of the Italian HV network: modeling and simulation of, field test[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2011, 11(3): 1391-1397.

[6] Kirschen D S, Volkmann T L. Guiding a power system restoration with an expert system[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2012, 6(2): 558—566.

[7] Ivan V. W. Hunt, etc. Diesel engine generators block start and supply emergencies[M]. Electrical Engineers Association Annual Conference. Auckland, 2012, 16 17.

[8] 杨淑英. 双馈风力发电变流器控制机策略研究[D]. 合肥: 合肥工业大学, 2007.

（收稿日期：2015-03-30）EA

作者简介

孙峰（1980-），男，硕士，工程师，主要研究方向为电力系统分析及仿真建模。

朱钰（1970-），男，博士，高级工程师，主要研究方向为电力系统分析、智能电网。