

充放储一体化电站的黑启动方案

孙俊博¹, 解大¹, 娄宇成¹, 杨敏霞¹, 张宇²

(1. 上海交通大学电子信息与电气工程学院电气工程系, 上海 200240;

2. 上海市电力公司电力科学研究院, 上海 200122)

摘要: 停电事故后电力系统恢复过程主要包括网架修复和负荷恢复, 合理的黑启动方案对加快电力系统的恢复有重要作用。当电网由于故障全停之后, 孤岛运行的电动汽车充放储一体化电站作为电网中的一种分布式电源可以参与黑启动。介绍了一体化电站的结构和功率特性, 分析了一体化电站作为黑启动电源与传统黑启动方式相比的优越性。基于黑启动的基本原理, 建立了一体化电站满足潮流约束和系统安全约束的黑启动模型, 制定了一体化电站参与黑启动的具体方案。将建立的模型应用于含有16座一体化电站的区域电网, 采用遍历算法对问题进行求解, 得到了区域电网的恢复过程, 验证了所提出一体化电站黑启动方案的可行性。

关键词: 电动汽车; 一体化电站; 黑启动; 无缝连接; 恢复方案

Black-start scheme for charging-discharging-storage integrated station

SUN Junbo¹, XIE Da¹, LOU Yucheng¹, YANG Minxia¹, ZHANG Yu²

(1. School of Electronic Information and Electrical Engineering, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240,

China; 2. Shanghai Power Supply Company Electric Power Research Institute, Shanghai 200122, China)

Abstract: The restoration of a power system after a black-out mainly includes network reconfiguration and load restoration. Reasonable black-start schemes play a major role to the fast restoration of power system after black-out. As a distributed power, charging-discharging-storage integrated station in islanding can participate in black-start when the grid falls in a full stop after failure. Basic configuration and power characteristics of the integrated station are presented firstly. This paper also analyses the advantages of integrated station as black-start source over the traditional black-start method. Then in accordance with the general principles of black-start, a black-start model and specific scheme for integrated station are developed, which meets power flow and system safety constraints. At last, the developed model is applied to a regional power system containing 16 integrated stations and the problem is solved with traversal algorithm. Black-start process for the regional power system is got and the feasibility of the proposed black-start scheme for the integrated station is verified.

This work is supported by National High-tech R & D program of China (863 program) (No.2011AA05A108).

Key words: electric vehicle; integrated station; black-start; seamless connection; recovery project

中图分类号: TM76

文献标识码: A

文章编号: 1674-3415(2015)05-0043-08

0 引言

随着电网规模不断扩大, 潜在的大电网全停电事故发生的危险性也在增加。2003年8月14日, 北美发生美加大停电事故, 随后英国伦敦、意大利等也出现了大面积停电事故^[1]。在发生大停电事故后, 制定有效可靠的恢复方案, 快速地恢复系统供电, 对

电网来说有重要的意义^[2]。

电力系统发生停电事故后, 整个网络就会解列为很多停电的小系统, 此时个别孤立的系统可能仍在运行。电网通过内部具有自启动能力的发电机组带动无自启动能力的机组发电, 最终实现整个系统电力恢复的过程, 即为电力系统的黑启动^[3]。

大部分电网所制订的恢复计划基本都是利用水轮机和燃气轮机作为黑启动电源^[4]。主要是因为: 火电厂没有厂用电时无法启动, 而水轮机和燃气轮机对厂用电的要求较低, 容易启动。但水电站通常

基金项目: 国家高技术研究发展计划(863计划)(2011AA05A108)

位于距离城市电网较远的边远地区，并且水电机组调速系统反应较慢，这些缺点在一定程度上限制了其作为黑启动电源的能力^[5]；燃气轮机在启动初期时需要外部动力把机组带至一定的转速才能点火升速，国外大都采用柴油机作为起动机，国内主要采用电动机^[6]。

目前大多数的研究都是以传统的黑启动电源为研究对象的，或者在传统黑启动电源的基础上，对恢复方法进行改进。文献[7]研究了现有发变组保护的类别、出口方式、保护连锁逻辑等，提出了为实现FCB功能对发变组保护相关逻辑进行的改造措施。文献[8]提出一种计及节点恢复成功率的黑启动分区方案优化策略，综合考虑电网中输电线路投运的不确定性和网架结构的灵活性因素，采用交叉粒子群优化算法实现分区恢复优化问题的求解。随着分布式发电技术的发展，微电网的相关研究也越来越多，微电网的黑启动功能^[9]也引起了人们的关注，文献[10]从改进微源下垂特性入手，提出一种基于微源的黑启动控制方法，使得微源在具有下垂特性的同时，兼具黑启动功能。文献[11]分析了以微型燃气轮机作为备用电源用来启动大型机组的方法，通过仿真表明微型燃机系统不仅能够限制励磁涌流，还能够控制负荷波动对微型燃机的影响。

作为给电动汽车提供能量的电动汽车充放电一体化电站，可以视作配电网中的分布式电源。当主电网发生故障或进行检修、维护时，具有独立控制系统的一体化电站要离网独立运行，并在电网恢复正常之后可以随时并网。在主电网发生崩溃全黑以后，一体化电站进入孤岛运行状态^[12]，孤岛运行的一体化电站可以运行在电压源模式，相当于一台发电机。此时，一体化电站可以作为一种黑启动电源，参与电网的黑启动。

本文根据电动汽车充放电一体化电站的运行特点，提出了一种以其作为黑启动电源的控制方法，并制定了具体的黑启动方案，通过实例验证了一体化电站黑启动的可行性。

1 充放电一体化电站原理

1.1 一体化电站简介

为电动汽车提供充电服务的充放电一体化电站主要由四部分构成：调度中心、多用途变流装置、充放电储电池更换系统和梯次电池储能系统^[13]，如图1所示。

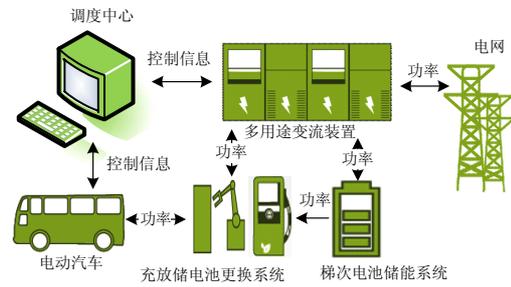


图1 充放电一体化电站

Fig. 1 Charging-discharging-storage integrated station

充放电一体化电站综合了电动汽车充电站、电池更换站与电池储能电站的功能，完成与电网、电动汽车的信息交互，实现有序能量管理，既可以作为区域电网中的用电负荷，也可以作为分布式电源向电网供电。

一体化电站可等效为四象限变流装置控制的电流源或电压源，其电压源控制算法通过 SVPWM 控制，使一体化电站作为电压和相角可调的受控电压源来运行，即电压源运行模式。如果将输出电抗器作为内部等值电抗，一体化电站就可以等值于同步发电机，等值电路如图2所示。

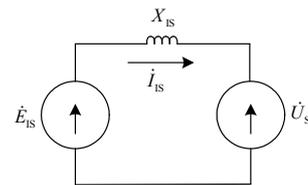


图2 一体化电站等值电路

Fig. 2 VSC circuit of integrated station

图2中， \dot{U}_s 为系统电压矢量， i_{is} 为某一运行状态下一体化电站的输出电流， \dot{E}_{is} 为一体化电站等效电压源的内电压，其中 X_{is} 为内部等值电抗。

1.2 一体化电站功率特性

1.2.1 一体化电站有功功率——频率响应特性

当接有充放电一体化电站的系统进入紧急状态时，一体化电站转入保护运行模式。记 $P_{is,i}$ 为第 i 个一体化电站进行紧急支持控制时的最大充/放电功率，则 $\Sigma P_{is,i}$ 为本区域全体一体化电站参与紧急支持控制时的最大充/放电功率。将全体一体化电站作为发电机组考虑，从以最大功率充电切换至以最大功率放电，其吞吐容量为 $2 \cdot \Sigma P_{is,i}$ 。

图3中，曲线A为配有调速系统的发电机组的功率-频率特性，其斜率为发电机组调差系数 R_G ；B为一体化电站的功率-频率特性，由于一体化电站的

功率输出能力不受系统频率的影响, 是一种无差调节, 因此 B 的斜率为零, 取值范围为 $[0, 2 \cdot \Sigma P_{IS_i}]$ 。电力系统正常运行在 a 点, 频率为 f_N , 一体化电站正常运行的充电功率为 $\Sigma P_{IS_{i0}}$ 。当系统负荷增加时, 如一体化电站不调整运行方案, 发电机组发出的功率由 P_{G1} 增加至 P_{G2} 时, 运行点将移至 b 点, 此时系统频率为 f_1 , 频率偏差为 Δf 。

$$\Delta f = R_G \cdot (P_{G2} - P_{G1}) \quad (1)$$

如一体化电站采用全部容量进行紧急支持控制, 将使发电机组调差特性曲线由 A 平移至 C , 紧急支持后的运行点为 c , 频率偏差最小可以达到 $\Delta f'_{min}$ 。

$$\Delta f'_{min} = R_G \cdot (P_{G2} - P_{G1} - 2 \cdot \Sigma P_{IS_i} + \Sigma P_{IS_{i0}}) \quad (2)$$

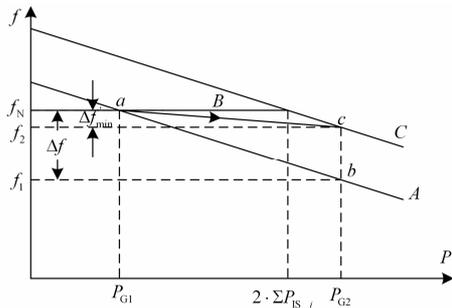


图3 一体化电站紧急支持控制对系统频率的影响

Fig. 3 Influence of integrated station emergency support control

1.2.2 一体化电站的无功补偿功能

一体化电站中 PWM 控制方式的多用途变流器是一个四象限的变换器, 拥有储能装置充放储一体化电站的电气特性具有负荷和电源的双重特性。由于电网中容性负荷很少, 且一体化电站的接入点位于低压配电网, 因此一体化电站多作为容性无功电源来使用, 其无功功率控制流程如图 4 所示。

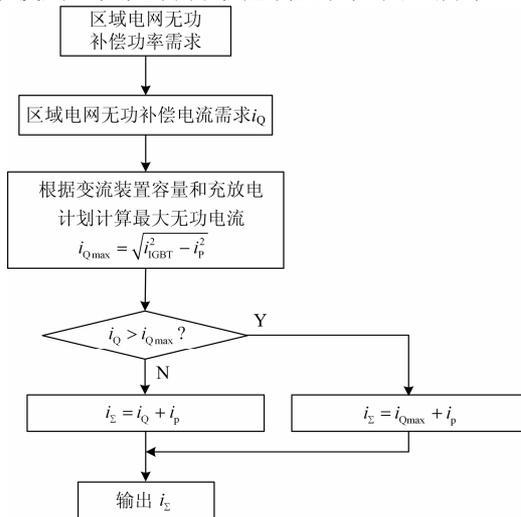


图4 一体化电站无功补偿控制流程

Fig. 4 Var compensation flow of integrated station

在一体化电站发出容性无功时, 可以将一体化电站视为静止无功发生器 SVG, 其主要功能是就地无功功率补偿。图 4 中, 一体化电站根据电网负荷特性和站内能量水平制定了充放电计划, 对应有功电流 i_p ; 一体化电站多用变流装置允许通过的额定电流为 i_{IGBT} 。

2 一体化电站的黑启动原理

2.1 黑启动的基本原理

2.1.1 黑启动电源

黑启动电源可以分为两类: 第一类是本身具有黑启动能力的机组, 主要为水轮机和具有自启动能力的燃气轮机; 第二类是事故后残存的机组和孤岛, 另外还有相邻系统的支援。

电网中除了具备自启动能力的黑启动机组之外, 还有一种没有自启动能力的机组, 但在其厂用电恢复后能快速恢复供电, 并参与以后的系统恢复过程, 这种机组称为非黑启动机组^[14]。

2.1.2 黑启动的原则

(1) 目标

电网恢复的总目标是在最短时间内使电网恢复正常运行, 满足负荷的用电需求, 把停电损失降到最低。具体包括三个方面^[15]: 用最小的启动功率启动机组; 提高一次启动的成功率; 优先恢复对重要负荷供电。

(2) 恢复方法

黑启动方案的网架恢复策略可分为向上恢复(又称并行恢复)和向下恢复(又称串行恢复)^[16]。向上恢复是多个黑启动电源并行启动, 形成多个独立分散运行的小系统后同步并网; 向下恢复与之相反, 通过一个黑启动电源建立电压后, 其他电源以此为同步逐步并网。

(3) 划分子系统

为了加快事故后区域大电网的恢复速度, 黑启动时常常需要将电网划分成若干个具有自启动能力的子系统, 各子系统内部可以同时进行黑启动, 子系统正常运行之后, 再在同期点逐步并列、合环。

(4) 恢复过程

在子系统恢复正常之后, 开始对输电线充电, 子系统依次同步, 逐渐完成网络的重建, 同时监测系统电压、频率和功率平衡。在火电机组都已启动并具有一定的发电能力之后, 就可以通过较稳定的网架, 在保证线路不过载的情况下恢复负荷。

2.2 一体化电站参与黑启动的基本原理

一体化电站作为有源型储能装备, 可以在电网峰荷时向电网输出功率, 分担区域电网的供电任务;

在电网处于谷荷状态时，电网给一体化电站充电，把电网中多余的电能储存起来，功能类似于抽水蓄能电站。文献[12]指出，当电网出现短时和长时故障或因故障全黑时，一体化电站进入相应的运行状态：短时同步、长时同步和孤岛运行。在短时和长时故障修复后，一体化电站和电网重新无缝同期。孤岛运行的一体化电站完全依靠储存的电能维持自身的运行，并且可以给区域内的重要负荷供电。

2.2.1 一体化电站对黑启动原则的满足

(1) 一体化电站作为黑启动电源的优势

首先，系统中的重要负荷和一体化电站多位于市区，在系统故障后可以迅速地对重要负荷供电。其次，在电网崩溃之后，大量的一体化电站都处于孤岛运行状态，一体化电站可以通过SVPWM控制策略运行于电压源模式，其独立的控制系统可以调节孤岛运行时的电压、频率和相位，可以随时作为黑启动电源参与电网的黑启动。

当含有一体化电站的电网进入全黑状态时，一体化电站与电网脱离，并采取一定的控制策略保持自身孤岛的稳定运行，其切除负荷顺序如表1所示。

表 1 孤岛运行时一体化电站切除负荷顺序

Table 1 Load shedding order under island state

切除负荷顺序	负荷类型	实例
1	提高一体化电站运营舒适度的负荷	空调
		装饰照明
		手扶楼梯
		观摩展示屏
2	提供一体化电站基本运营需求的负荷	充电桩
		换电机械手
		灯光照明
		不涉及控制功能的计算机等
3	决定一体化电站关键运营负荷	控制系统供电电源
		控制系统计算机等

表1表明，孤岛运行的一体化电站在参与黑启动时，只保留了站内的第三种负荷，所以自身用电很少，类比于其他黑启动电源，厂用电负荷很小，这也就很好地保证了一体化电站能以最小的启动功率参与黑启动。

综上所述，一体化电站出色地满足了黑启动第一个原则的三个方面。

(2) 一体化电站作为黑启动电源的恢复方法

传统的系统恢复方法对一体化电站也同样适用。含有一体化电站的大系统，可以划分为 n 个子系统，第 n 个子系统有 n_k 个一体化电站，并且至少

有一个容量足够大的非黑启动机组，其划分如图 5 所示。

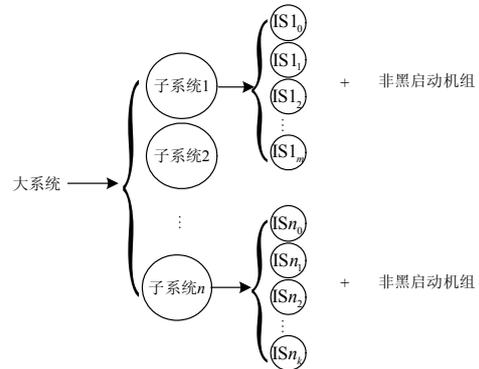


图 5 划分子系统

Fig. 5 Subsystem division

以子系统 1 为例，鉴于并不是所有的一体化电站都是满容量，对 l_0 、 l_1 、 l_2 、 \dots 、 l_m 的容量进行分析，优先选取 i 个能够完成 1 区域内非黑机组启动的一体化电站投入运行。非黑启动机组启动后，未参与启动的一体化电站可在接入点母线处无缝同期，其原理如图 6 所示。

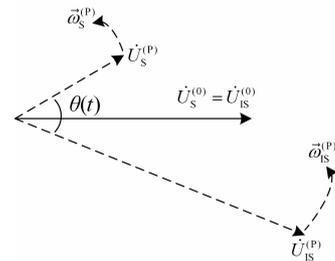


图 6 虚连接控制

Fig. 6 Virtual connection control

图 6 中， $\dot{U}_s^{(0)}$ 、 $\dot{U}_{IS}^{(0)}$ 为正常运行时电网电压和一体化电站接入点电压， $\bar{\omega}_s^{(p)}$ 为电网电角频率， $\bar{\omega}_{IS}^{(p)}$ 为一体化电站孤岛运行电角频率。一体化电站孤岛运行时，电网电压为 $\dot{U}_s^{(p)}$ ，一体化电站接入点电压为 $\dot{U}_{IS}^{(p)}$ ， $\theta(t)$ 为两电压的瞬时相角差。对 $\bar{\omega}_{IS}^{(p)}$ 进行有效的控制，使得 $\theta(t) \rightarrow 0$ 且 $\bar{\omega}_{IS}^{(p)} \rightarrow \bar{\omega}_s^{(p)}$ ，同时调节一体化电站输出的端电压，由于一体化电站并网变流装置具有极高速的调节能力，上述调节非常快速且易于实现，这样即可实现一体化电站与外部电网的无缝连接。

此后将继续同期其他一体化电站，保证有足够容量来启动下一个非黑启动机组，重复以上过程，可以完成 1 区的黑启动。在每个区域，用同样的方法进行黑启动，在所有的子系统都成功启动之后，在同期点并列即可实现整个系统的恢复。可见，一体化电站所在的大系统同时满足了划分子系统和向

上恢复的黑启动原则。

(3) 一体化电站作为黑启动电源的恢复过程

参与黑启动的一体化电站处于电压源运行模式, 利用一体化电站很好的调频调压能力就可以保证各个子系统的电压和频率在允许的范围内波动, 实现子系统平稳的恢复。根据一体化电站的运行特点, 它所在的子系统采用向下恢复的策略进行启动。一体化电站在对空载线路进行充电时, 会产生大量的无功, 而一体化电站不仅可以产生无功, 还能吸收无功, 相当于具有一定进相运行能力的发电机组。所以, 一体化电站也能够满足黑启动的第四个原则。

因此, 一体化电站在电网崩溃后不仅能够参与电网的黑启动, 还可以有效地解决电网中黑启动电源不足的问题。

2.2.2 一体化电站参与黑启动的其他优势

(1) 启动方案简化

传统大电网在黑启动过程中, 由于输电线路太长, 线路的分布电容可能会使得同步发电机产生自励磁现象, 机端电压将自发增大, 越来越高, 带来不安全的因素, 甚至导致事故。而一体化电站不存在自励磁的问题, 可以提高启动成功的机率。此外, 在以一体化电站为黑启动电源的方案中, 一体化电站可以快速为其他非黑启动电源提供同步电压, 可以大大减少同期点的设置, 从而使黑启动的方案简化。

(2) 启动时间短

传统的黑启动方案多是利用水电机组启动火电机组, 水电站本身的成功自启动是有一定概率的, 并且水电站多位于偏远地区, 很可能会由于线路问题或者操作时间过长导致送电失败; 一体化电站随时可以参与黑启动, 而且位于市区, 送电时间要比水电机组短。水电机组与一体化电站的黑启动时间如表2所示。

表 2 两种黑启动方式的启动时间

Table 2 Start-up time of two black-start modes

	水电站黑启动方式	一体化电站黑启动方式	对比
黑启动时间	水电机组自启动时间, 秒级	一体化电站同期时间, 毫秒级	前者>后者
	恢复水电站厂用电时间, 分钟级		
	输电线路充电, 向火电厂送电时间	输电线路充电, 向火电厂送电时间	相等
	火电厂的热启动时间	火电厂的热启动时间	相等

从表2可以看出, 水电站的黑启动时间要明显比一体化电站长。如果利用火电厂附近的一体化电站作为黑启动电源, 就可以加快电网的恢复速度, 有

效地降低停电损失。

(3) 成本优势

从黑启动成本方面来说, 专门设置的黑启动电厂要比一体化电站大的多。专门设置的黑启动电厂除了初期比较大的静态投资之外, 在平时闲置的时候还要进行定期的维护和试验, 保证在发生意外事故的情况下, 它能够成功启动, 这是一笔不小的费用。

而一体化电站可以直接参与电网的运行, 具有一定的经济收益, 平时的运行成本比黑启动电厂的维护费用要少, 并且一体化电站一直在运行, 相当于处在热备用状态, 在需要参与黑启动时只要转换运行模式即可。能够完成黑启动的一体化电站与同容量的传统黑启动电源相比, 不仅经济, 而且更加环保, 具体费用如表3所示。

表 3 两种黑启动方式的成本

Table 3 Start-up cost of two black-start modes

	传统黑启动方式	一体化电站黑启动方式	对比
黑启动费用	黑启动电厂的静态投资	一体化电站的静态投资	前者>后者
	黑启动电厂的维护费用 黑启动电厂的试验费用	一体化电站的运行成本	前者>后者
	黑启动电厂排污费用	无	前者>后者

3 一体化电站参与黑启动的模型和算例

3.1 一体化电站参与黑启动的模型

黑启动实施时, 首先要分断区域内各负荷以避免黑启动冲击造成启动失败, 然后建立区域最筒有效网架, 因此一体化电站的发电容量应满足

$$\sum_{S=1}^{n_1} S_{IS}^{(P)} > \sum_{i=1}^{n_2} S_{Ti} + \sum_{j=1}^{n_3} P_{loss} \quad (3)$$

$$P_{loss} = \sum_{i=1}^{n_3} U_i \sum_{j=1}^{n_3} U_j (G_{ij} \cos \theta_{ij} + B_{ij} \sin \theta_{ij}) \quad (4)$$

式(3)中: $S_{IS}^{(P)}$ 为一体化电站在电网崩溃后进入黑启动程序时的视在功率; n_1 为一体化电站的数量; S_{Ti} 为配电变压器的励磁损耗; n_2 为变压器的数量; P_{loss} 为系统网损; n_3 为线路的数量。式(4)中: U_i 为节点 i 处的电压; U_j 为节点 j 处的电压; G_{ij} 和 B_{ij} 为线路的电导和电纳; θ_{ij} 为节点 i 、 j 的电压相位差。

在开始启动第一个非黑电源时, 作为黑启动电源的一体化电站的发电容量应满足

$$\sum_{S=1}^{n_1} S_{IS}^{(P)} > \sum_{i=1}^{n_2} S_{Ti} + \sum_{j=1}^{n_3} S_{Lj} + \max \{S_{Pk}, k=1, 2, \dots, n_3\} \quad (5)$$

式(5)中, S_{Pk} 为非黑启动电源的最大冲击功率。式(5)表明, 以一体化电站作为区域黑启动电源时, 一体化电站的发电容量必须大于所有的损耗与区域中所有非黑启动电源中最大的一个冲击功率之和。此时, 非黑启动电源不是同时启动的, 当一体化电站满足式(5), 首次启动即可满足。

显然, 首次启动成功后应尽快扩大启动电源数量以保证电网的强壮性, 其后启动应满足

$$\sum_{s=1}^{n_1} S_{IS}^{(p)} + \sum_{l=1}^n S_{Gmax} > \sum_{i=1}^{n_2} S_{Ti} + \sum_{j=1}^{n_3} S_{Lj} + \sum_{k=1}^{n_4} S_{Pk} \quad (6)$$

式中: S_{Gmax} 为本区域已启动电源的最大输出功率; S_{Pk} 为即将同时启动的非黑启动电源的最大冲击功率。

在电源逐步启动的过程中, 可以投入部分负荷, 在负荷恢复的同时吸收系统的无功, 保证电压和频率在正常范围内波动, 启动过程中系统潮流要满足

$$\left\{ \begin{array}{l} \sum_{i=1} S_{loadi} < \sum_{s=1}^{n_1} S_{IS}^{(p)} + \sum_{j=1}^n S_{Gj} \\ P_{ISimin} \leq P_{ISi} \leq P_{ISimax} \\ Q_{ISimin} \leq Q_{ISi} \leq Q_{ISimax} \\ P_{Gjmin} \leq P_{Gj} \leq P_{Gjmax} \\ Q_{Gjmin} \leq Q_{Gj} \leq Q_{Gjmax} \\ U_{imin} \leq U_i \leq U_{imax} \\ |\Delta f| \leq 0.5 \text{ Hz} \end{array} \right. \quad (7)$$

式中: S_{loadi} 为系统负荷 i 的容量; S_{Gj} 为发电机 j 的额定容量; P_{ISimin} 和 P_{ISimax} 为一体化电站 i 输出的有功上限和下限; Q_{ISimin} 和 Q_{ISimax} 为一体化电站输出无功的上限和下限; P_{Gjmin} 和 P_{Gjmax} 为发电机 j 输出有功的下限和上限; Q_{Gjmin} 和 Q_{Gjmax} 为发电机 j 输出无功的下限和上限; U_{imin} 和 U_{imax} 为节点 i 处电压的下限和上限; Δf 为黑启动过程中系统的频率偏差。

以一体化电站作为区域黑启动电源的恢复过程如图7所示。

3.2 一体化电站参与黑启动的实例分析

某城市的电网发生事故后全停, 配电网解环, 各一体化电站与网络解列, 进入孤岛运行模式, 并调整运行状态, 选择电压源运行模式, 准备参与电网的黑启动。根据黑启动的原则, 先进行子系统划分, 区域1的的等值网络如图8所示, 分区内含有2 MW 的一体化电站16座, 非黑启动机组容量为200 MW。

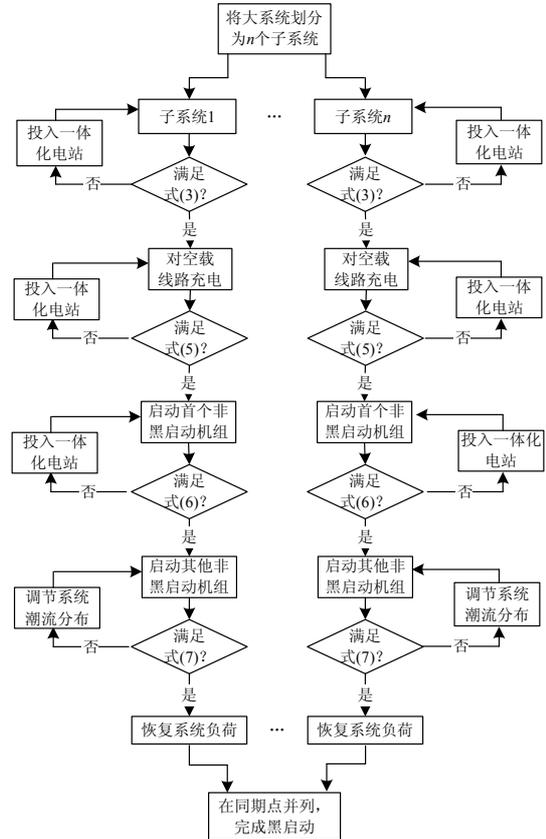


图7 一体化电站的黑启动过程

Fig. 7 Black-start process of the integrated station

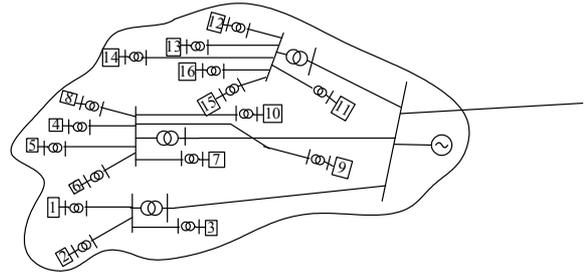


图8 区域1 一体化电站参与黑启动的等值网络

Fig. 8 Equivalent network of integrated station participating in the black-start in section one

已知一体化电站的荷电状态(SOC), 它们经 10 kV 的网络并列后, 通过 220 kV 的网架给电厂提供厂用电, SOC 和送电距离 l 如表 4 所示。

表 4 一体化电站的SOC和送电距离

Table 4 SOC and transmission distance of the integrated station								
名称	IS1	IS2	IS3	IS4	IS5	IS6	IS7	IS8
SOC	0.85	0.9	0.85	0.8	0.9	0.8	0.6	0.9
l/km	5	6	4	3	4	5	4	3
名称	IS9	IS10	IS11	IS12	IS13	IS14	IS15	IS16
SOC	0.9	0.9	0.85	0.7	0.8	0.6	0.9	0.7
l/km	9	8	4	3	3	4	3	4

一体化电站通过10 kV电压等级以地下电缆的网架向220 kV的网络供电。

电厂中除了 6/35 kV 的厂用变的损耗单独计算外, 电厂内部一些辅机专用的小型变压器全部折算成厂用电负荷进行计算, 等效网络中的变压器参数如表 5 所示。

表 5 网络中的变压器参数

Table 5 Transformer parameters of the network

变压器种类	数量	容量(MVA/台)
0.4/10 kV	16	50
10/220 kV	3	200
35/220 kV	1	400
6/35 kV	1	50
18/35 kV	1	400

电厂的厂用电负荷主要分布在三个系统: 燃烧系统、汽水系统和电气系统, 主要负荷如表6所示, 厂用电负荷大约14 MW。

表 6 厂用电负荷

Table 6 House supply load

主要设备	
水泵类	给水泵、凝结水泵、压油泵、密封油泵、循环水泵
电动机	磨煤机、给粉机、引风机、送风机、盘车电动机等
励磁系统	励磁机、励磁变压器、励磁调节器等

要能完成黑启动, 投入的一体化电站最大输出功率要大于电厂的厂用电。一体化电站的总输出功率 S 为

$$\begin{cases} S = \sum_{i=1}^n P_i \eta_i \\ P_i = f(SOC_i) \\ \eta_i = g(l_i, U_i, U_j, \theta_{ij}) \end{cases} \quad (8)$$

式中: P_i 为单个一体化电站的输出功率, 受变流装置的限制, 每个一体化电站最大输出为 1.25 MW, 为了使一体化电站能够以稳定的输出功率长时间供电, 要根据其不同的 SOC 合理确定输出功率; η_i 为 IS_i 送电到 220 kV 网架的权重, 即输电效率; l_i 为送电线路长度; 线路两端电压为 U_i 、 U_j , 电压相位差为 θ_{ij} 。经计算得到的 P_i 和 η_i 如表 7 所示。

表 7 一体化电站输出功率和输电效率

Table 7 Output and transmission efficiency of the integrated station

名称	IS1	IS2	IS3	IS4	IS5	IS6	IS7	IS8
P/MW	1.18	1.25	1.18	1.11	1.25	1.11	0.84	1.25
η	0.95	0.95	0.96	0.96	0.96	0.97	0.97	0.95
名称	IS9	IS10	IS11	IS12	IS13	IS14	IS15	IS16
P/MW	1.25	1.25	1.18	0.98	1.11	0.84	1.25	0.98
η	0.96	0.96	0.96	0.96	0.95	0.98	0.94	0.97

由表 7 可以看出, 一体化电站的输电效率全部大于零, 即满足式(3)。由遍历算法求得一体化电站的并网顺序: $IS5 \rightarrow IS9 \rightarrow IS10 \rightarrow IS8 \rightarrow IS2 \rightarrow IS15 \rightarrow IS3 \rightarrow IS11 \rightarrow IS1 \rightarrow IS6 \rightarrow IS4 \rightarrow IS13 \rightarrow IS1$, 共有 13 座一体化电站优先并网, 总输出功率达到 14.68 MW, 满足式(5), 首次黑启动即可进行。一体化电站的反应几乎是瞬时的, 并且根据负荷需要发出有功和无功功率, 可以有效地进行频率和电压调节, 降低恢复过程中子系统的波动, 加速恢复进程。区域 1 中的非黑机组启动之后, 将剩余的 3 座一体化电站无缝同期, 巩固黑启动的成果。在满足式(7)的潮流约束下恢复负荷, 就可以实现区域 1 的黑启动。在所有子系统以类似方法恢复之后, 子系统之间同期即可实现系统的恢复。

4 结语

本文对一体化电站黑启动进行研究, 得到以下结论:

(1) 一体化电站黑启动完全满足黑启动的基本原则: 启动功率小, 一次启动成功率高, 可以优先给区域重要负荷供电, 并且采用向上恢复的方法完成电网黑启动, 加快恢复进程。

(2) 一体化电站参与黑启动可以有效解决局部电网黑启动电源不足的问题, 对电力系统崩溃后的恢复具有重要意义, 减少大停电损失。

(3) 与传统黑启动电源相比, 一体化电站参与黑启动时, 启动速度更快, 更加经济, 更加可靠, 具有非常广阔的前景。

参考文献

- [1] ANDERSSON G, DONALEK P, FARMER R, et al. Causes of the 2003 major grid blackouts in North America and Europe, and recommended means to improve system dynamic performance[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2005, 20(4): 1922-1928.
- [2] 韩祯祥, 曹一家. 电力系统的安全性及防治措施[J]. 电网技术, 2004, 28(9): 1-6.
HAN Zhenxiang, CAO Yijia. Power system security and its prevention[J]. Power system technology, 2004, 28(9): 1-6.
- [3] 钟慧荣, 顾雪平, 朱玲欣. 黑启动恢复中网架重构阶段的负荷恢复优化[J]. 电力系统保护与控制, 2011, 39(17): 26-32.
ZHONG Huirong, GU Xueping, ZHU Lingxin. Optimization of load restoration during network reconfiguring process of black-start restoration[J]. Power

- System Protection and Control, 2011, 39(17): 26-32.
- [4] 吴焯, 房鑫炎, 张焰, 等. 电网黑启动的广义模式评估算法[J]. 电工技术学报, 2011, 26(3): 155-161.
WU Ye, FANG Xinyan, ZHANG Yan, et al. Generalized assessment algorithm for power grid black-start modes[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2011, 26(3): 155-161.
- [5] KOELLNER K, ANDERSON C, MOXLEY R. Generator black-start validation using synchronized phasor measurement[J]. Power Systems Conference: Advanced Metering, Protection, Control, Communication, and Distributed Resources, 2006.
- [6] BORGHETTI A, MASLO K, MIGLIAVACCA G, et al. Steam unit and gas turbine power station reliable control for network black-start-up[C] // Power Tech Conference Proceedings, 2003: IEEE, Bologna, 2003, 4: 8.
- [7] 刘麒, 刘麟. FCB 功能相关的发变组保护逻辑改造[J]. 电力系统保护与控制, 2011, 39(4): 146-148.
LIU Qi, LIU Lin. Improvements for generator-transformer protection logic relating to FCB function[J]. Power System Protection and Control, 2011, 39(4): 146-148.
- [8] 梁海平, 郝杰, 顾雪平. 计及节点恢复成功率的黑启动分区恢复方案优化[J]. 电工技术学报, 2013, 27(11): 230-238.
LIANG Haiping, HAO Jie, GU Xueping. Optimization of system partitioning schemes for black-start restoration considering the successful rate of node restoration[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2013, 27(11): 230-238.
- [9] LI J, SU J, YANG X, et al. Study on microgrid operation control and black start[C] // Electric Utility Deregulation and Restructuring and Power Technologies (DRPT), 2011 4th International Conference on: IEEE, 2011: 1652-1655.
- [10] 黄杏, 金新民, 马琳. 微网离网黑启动优化控制方案[J]. 电工技术学报, 2013, 28(4): 182-190.
HUANG Xing, JIN Xinmin, MA Lin. An optimized island micro-grid black-start control method[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2013, 28(4): 182-190.
- [11] 廖旭明, 童佳鹏, 余涛. 微型燃气轮机发电系统在城市电网黑启动中的运用[J]. 电力系统保护与控制, 2009, 37(10): 83-89.
LIAO Xuming, TONG Jiapeng, YU Tao. Use of microturbine generation system for power system black-start[J]. Power System Protection and Control, 2009, 37(10): 83-89.
- [12] 刘高维, 冯俊淇, 余志文, 等. 充放储一体化电站孤岛运行的离网及维持控制策略[J]. 电力科学与技术学报, 2013, 28(1): 69-74.
LIU Gaowei, FENG Junqi, YU Zhiwen, et al. Control strategy of off-grid and maintain for EV integrative station islanded operation[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2013, 28(1): 69-74.
- [13] 杨敏霞, 刘高维, 房新雨, 等. 计及电网状态的充放储一体化站运行模式探讨[J]. 电网技术, 2013, 37(5): 1202-1208.
YANG Minxia, LIU Gaowei, FANG Xinyu, et al. Discussion on operation mode of charging-discharging-storage integrated station considering power network status[J]. Power System Technology, 2013, 37(5): 1202-1208.
- [14] 李如琦, 唐林权, 凌武能, 等. 基于前景理论和灰关联分析法的黑启动方案优选[J]. 电力系统保护与控制, 2013, 41(5): 103-107.
LI Ruqi, TANG Linqun, LING Wuneng, et al. Optimization of black-start based on prospect theory and grey relational analysis[J]. Power System Protection and Control, 2013, 41(5): 103-107.
- [15] LIANG Haiping, MA Huiyuan, GU Xueping. Black-start network partitioning considering time limits and subsystem restoration sequences[C] // Power and Energy Engineering Conference (APPEEC), 2011 Asia-Pacific: IEEE, 2011: 1-4.
- [16] ZHONG Huirong, GU Xueping, ZHU Xuedong. Optimization method for unit restarting during power system black-start restoration[C] // Power and Energy Engineering Conference (APPEEC), 2012 Asia-Pacific: IEEE, 2012: 1-4.

收稿日期: 2014-05-25; 修回日期: 2014-07-14

作者简介:

孙俊博(1989-), 男, 通信作者, 硕士研究生, 主要研究方向为电能质量与供电可靠性, 配电网发展与规划;
E-mail: sunhd1006@126.com

解大(1969-), 男, 博士, 副教授, 主要研究方向为电力系统分析、灵活交流输电设备、新能源等;

娄宇成(1990-), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为电力系统及其自动化。

(编辑 周金梅)