直流参与受端弱交流系统黑启动的技术条件

李保宏¹,刘天琪¹,许韦华²,李强²,李兴源¹,张英敏¹ (1. 四川大学 电气信息学院,四川 成都 610065;2. 国网智能电网研究院,北京 102209)

摘要:针对江苏电网现状,考虑利用宜兴抽水蓄能水电站作为黑启动电源,启动龙政直流参与初期黑启动可加快电网恢复速度。通过对直流参与黑启动时的控制模式、启动方式、解锁方式及顺序控制的研究,确定了黑启动时直流自身的技术要求。同时针对直流以最小功率启动的情况,研究了黑启动时的交流系统强度要求、励磁涌流抑制和无功协调配合。利用 PSCAD 电磁暂态模型进行仿真,结果验证了理论分析的正确性。

关键词: 电力系统; 黑启动; 直流输电; 弱交流系统; 技术要求 中图分类号: TM 721 文献标识码: A D

DOI: 10.16081/j.issn.1006-6047.2016.05.004

0 引言

黑启动是指整个系统因故障停运后,不依赖于 其他网络的帮助,通过系统中具有自启动能力机组 的启动,带动无自启动能力的机组逐渐扩大系统恢 复的范围,最终实现整个系统的恢复^[1-3]。传统的电 网黑启动方式,一般利用本地区具有自启动能力的 燃油机组、水电机组作为黑启动电源,逐步启动其他 大型常规发电机组,采用交流输电方式带动电网恢 复^[4-7],具有启动速度慢、辅机启动冲击大等不足,影 响黑启动过程中负荷的恢复速度。因此,在电网黑 启动过程中采取新的方式、研究新的技术以更快速 有效地实现电网供电的恢复,作为常规黑启动方式 的有效补充,对于应对大停电事故、降低大停电带来 的经济损失具有十分重要的现实意义。

直流输电具有输送功率大、启动和调速快、可控 性强等优点^[8-9],这在黑启动初期可以发挥较大的作 用^[10]。因此,研究电网黑启动过程中利用直流输电 的电网恢复技术,充分发挥常规直流输电在输送容量、调节速度等方面的优势,对加速大规模停电事故 后受端电网负荷恢复、提高黑启动过程中电网稳定 性等将起到积极的作用。目前,对于常规直流参与黑 启动的研究很少,仅文献[10-11]以云广、天广直流 为例对黑启动初期的基本条件、典型启动路径等进 行了研究。针对实际情况,本文在假设江苏电网全 黑的情况下,研究利用龙政直流参与受端江苏电网 黑启动以加快直流受端系统恢复速度的技术要求。 以宜兴抽水蓄能水电站作为黑启动电源,从直流系 统的控制模式、启动及解锁方式、顺序控制,以及交 流系统的强度、无功协调配合、励磁涌流抑制等方面 进行深入研究,明确了直流参与弱交流系统的技术 要求。通过 PSCAD 模型验证了理论推导的正确性。

1 黑启动模型搭建

图 1 为在电磁暂态仿真软件 PSCAD 中搭建的



Fig.1 Black-start system model

黑启动模型。模型主要由送端等值机、龙政直流、受端宜兴抽水蓄能机组及负荷构成。由于龙政直流的送端龙泉换流站和三峡左岸电站相联,且本文以江苏电网黑启动过程为研究重点,因此将送端机组简化为等值电压源。龙政直流按照实际工程搭建模型,为双极 12 脉波系统,额定电压为±500 kV,额定电流为3000 A,额定功率为3000 MW。直流线路从三峡附近的龙泉换流站到江苏常州的政平换流站,全长860 km。宜兴抽水蓄能机组由4台水轮机构成,均包含励磁与调速系统,装机容量为4×250 MW。

2 直流启动方式及控制模式

2.1 直流启动控制模式选择

黑启动时选择合适的直流控制模式可以提高系 统稳定性,常见的直流控制模式如表1所示。

表 1 直流控制模式 Table 1 DC control modes

整流侧	逆变侧	整流侧	逆变侧
定电流	定电压	定功率	定电压
定电流	定熄弧角	定功率	定熄弧角

对于弱交流系统而言,受端电压稳定是保证 直流系统正常运行的重要因素。由于电压与有功弱 耦合而与无功强耦合,因此通过分析直流系统换流 器控制模式对逆变侧消耗无功功率的影响可以定性 判断电网电压的稳定性^[12]。直流运行时逆变侧电 压、有功及无功可分别由式(1)—(3)表示。

$$U_{\rm di} = U_{\rm doi} \cos \gamma_{\rm i} - \sqrt{2} K_{\rm m} X_{\rm i} I_{\rm di} =$$

$$1.35 E_{\rm IL} B T_{\rm i} \cos \gamma_{\rm i} - \frac{3 B X_{\rm i} I_{\rm di}}{\pi}$$
(1)

$$P_{\rm dci} = 1.35 E_{\rm IL} B T_{\rm i} \cos \gamma_{\rm i} I_{\rm di} - \frac{3B X_{\rm i} I_{\rm di}^2}{\pi}$$
(2)

$$P_{\rm dci} = P_{\rm dci} \tan \varphi \tag{3}$$

其中, U_{d} 与 I_{d} 分别为直流电压与电流; U_{doi} 为理想空 载电压; γ_{i} 为逆变侧熄弧角; K_{m} 为系数; E_{LL} 为变压器 线电压有效值(一次侧);B=2为桥数; X_{i} 为变压器折 算到二次侧的阻抗; T_{i} 为变压器变比; P_{dei} 为直流外 送有功功率; $\varphi = \arccos(U_{d}/U_{doi})$ 。

a. 整流侧定电流、逆变侧定电压控制。

当直流系统采用整流侧定电流、逆变侧定电压控 制方式时, U_{di} 不变, I_{di} 不变。则逆变侧电压 E_{LL} 下降 时, U_{dai} =1.35 $E_{LL}BT_{i}$ 减小并且 U_{di} 不变,故 $\cos\varphi$ 增大, tan φ 减小,且 $Q_{dai}=P_{dai}$ tan $\varphi=U_{di}I_{di}$ tan φ 亦减小。所以 E_{LL} 下降时, P_{dai} 不变, γ_{i} 减小, Q_{dai} 减小。即直流系统 在保证外送有功的同时消耗无功减小,有利于换流母 线电压的恢复。

b. 整流侧定电流、逆变侧定熄弧角控制。

采用整流侧定电流、逆变侧定熄弧角控制方式

时, γ_i 不变, I_{di} 不变。

$$Q_{dci} = P_{dci} \tan \varphi = U_{di} I_{di} \tan \varphi =$$

$$I_{di} \sqrt{(1 - \cos \gamma_i^2) U_{doi}^2 + 2U_{doi} \cos \gamma_i d_{xi} I_{di} - d_{xi}^2 I_{di}^2}$$

$$d_{xi} = \frac{3BX_i}{\pi}$$

注意到式中根号内是关于 U_{doi} 的二次式,其对称 轴为 $-\frac{\cos \gamma_i d_{si} I_{di}}{\sin \gamma_i^2} < 0$,而根据实际情况 $U_{doi} > 0$,因此 Q_{dci} 正比于 U_{doi} 。故当 E_{IL} 下降、 U_{doi} 减小时, P_{dci} 减小, γ_i 不变, Q_{dci} 减小。即直流外送有功减小的同时消耗 无功也减小。此种模式虽然有利于换流母线电压的 恢复,但不利于系统的频率稳定。

c. 整流侧定功率、逆变侧定电压控制。

采用整流侧定功率、逆变侧定电压控制方式时, U_{di} 不变, P_{dci} 不变。则逆变侧电压 E_{LL} 下降时, U_{dci} 减小, $tan \varphi$ 减小,故 P_{dci} 不变, γ_i 减小, Q_{dci} 减小。直流有功、无功变化情况和整流侧定电流、逆变侧定电压控制模式相同,有利于换流母线电压的恢复。

d. 整流侧定功率、逆变侧定熄弧角控制。

采用整流侧定功率、逆变侧定熄弧角控制方式, 逆变侧交流电压下降时,γ_i不变,P_{di}不变。

$$U_{\rm di} = U_{\rm doi} \cos \gamma_{\rm i} - d_{\rm xi} I_{\rm di} = U_{\rm doi} \cos \gamma_{\rm i} - d_{\rm xi} \frac{P_{\rm dei}}{U_{\rm di}}$$
(4)

即有:

 $U_{\rm di}^2 - U_{\rm doi} \cos \gamma_{\rm i} U_{\rm di} + d_{\rm xi} P_{\rm dci} = 0$

解得:

$$U_{\rm di} = \frac{U_{\rm doi} \cos \gamma_{\rm i} \pm \sqrt{U_{\rm doi}^2 \cos^2 \gamma_{\rm i} - 4 d_{\rm xi} P_{\rm dci}}}{2} \tag{5}$$

为了确定式(5)中的正负号,将式(4)的变形 $U_{doi}\cos\gamma_i = U_{di} + d_{xi}I_{di}$ 代入式(5)的根号项中得:

$$U_{di} = \frac{U_{doi} \cos \gamma_{i} \pm \sqrt{(U_{di} + d_{xi}I_{di})^{2} - 4d_{xi}P_{dci}}}{2} = \frac{U_{doi} \cos \gamma_{i} \pm \sqrt{U_{di}^{2} + 2d_{xi}P_{dci} + d_{xi}^{2}I_{di}^{2} - 4d_{xi}P_{dci}}}{2} = \frac{U_{doi} \cos \gamma_{i} \pm |U_{di} - d_{xi}I_{di}|}{2}$$
(6)
$$\oplus \mp \mathfrak{R} \oplus U_{di} \gg d_{xi}I_{di}, \quad \oplus \mathfrak{R} (6) \quad fi:$$
$$U_{di} = \frac{U_{doi} \cos \gamma_{i} \pm (U_{di} - d_{xi}I_{di})}{2}$$

且当 $U_{di} = \frac{U_{doi}\cos\gamma_i + (U_{di} - d_{xi}I_{di})}{2}$ 时,式(4)成立,故最 终确定式(5)中 U_{di} 的表达式为:

$$U_{\rm di} = \frac{U_{\rm doi} \cos \gamma_{\rm i} + \sqrt{U_{\rm doi}^2 \cos^2 \gamma_{\rm i} - 4 \, d_{\rm xi} P_{\rm dci}}}{2}$$

所以逆变侧电压 E_{IL}下降时, U_{doi}=1.35E_{IL}BT_i 减 小,则 U_d 减小。由于 P_{doi}不变, 故 I_d 增大, 又由于

$$\cos\varphi = \cos\gamma_{\rm i} - \frac{X_{\rm i}I_{\rm di}}{\sqrt{2}U_{\rm doi}} \tag{7}$$

故 cos φ 减小, tan φ 增大, 且由于 Q_{dci} = P_{dci} tan φ, 故 P_{dci}

不变,γ_i不变,Q_{de}增大。可知直流系统在外送有功 不变的同时消耗无功反而增加,不利于换流母线电 压的恢复。

在 CIGRE-HVDC-Benchmark 标准测试系统中 对以上推导进行仿真验证,结果证明了结论的正确 性。根据上述结论,直流参与黑启动宜采用逆变侧 定电压的控制模式。进一步分析发现整流侧定功率 的控制模式不能增加其他辅助控制措施如频率控制 等,不利于后续控制。因此直流参与黑启动时选取 整流侧定电流、逆变侧定电压的控制模式。

2.2 直流启动方式选择

正常的直流启动方式主要包括全压启动、70% 降压启动、80%降压启动,以及解决直流融冰的功率 异向传输方式。由于功率异向传输方式在直流运行 时不能对系统作出贡献,且直流单极闭锁时会对交 流系统造成严重冲击,因此黑启动时不考虑该种启 动方式。根据文献[10]的结论,从无功及有功两方 面考虑,直流 70%降压启动对交流系统产生的冲 击最小。因此直流参与弱交流系统黑启动时宜选择 该启动方式。利用搭建的模型,在受端系统较强时对 3种不同启动方式进行仿真验证。仿真时受端宜兴 抽水蓄能机组开 3 台机,带有功负荷 600 MW,无功 负荷 150 Mvar;直流第 15s 解锁,启动电流均设为最 小启动电流 150 A。交流系统的频率及电压变化情 况分别如图 2、3 所示。由仿真结果可知,单极 70% 降压启动时对交流系统冲击最小。





system for different startup modes



图 3 不同启动方式下对较强受端交流系统电压的冲击 Fig.3 Impact on voltage of strong receiving AC system for different startup modes

2.3 直流解锁方式及启动顺序控制

2.3.1 直流解锁方式

目前国内直流工程的正常解锁过程基本有2种 类型。一种是首先迅速建立直流电流,同时直流电 压达到 0.5 p.u. 左右, 解锁过程中出现电流过冲, 然后 直流电压上升至额定值, 简称为零电压方式。零电 压方式启动配合发电机出力慢速建立直流电压,则 初始过程中直流电压需要降低更多, 触发角势必进一 步加大, 引起电流纹波增加, 同时换流阀需满足能够 进行零功率运行的要求。另外一种是首先缓慢建立 直流电压, 然后增大直流电流, 达到直流最小功率, 简称为零电流方式。零电流方式启动时, 触发角度 在正常设计范围内, 但是直流电流断续期运行时间 较长^[13]。根据龙政直流实际情况, 黑启动时选择零 电流解锁方式。解锁时单极 70%降压启动, 启动电 流为 150 A, 解锁时的电压、电流波形图如图 4 所示。



图 4 降压 70%、直流电流 150 A 时直流解锁波形 Fig.4 Waveforms of DC de-blocking with 150 A DC and 70% of voltage

2.3.2 直流启动的顺序控制

黑启动时,直流启动的顺序控制可参考正常启 动时的顺序控制^[4],但其中交流滤波器的投入时间 需要调整。正常顺序启动时,交流滤波器在直流解 锁前投入。但黑启动时交流系统较弱,滤波器无功 反送较大。因此考虑在直流解锁启动时投入交流 滤波器,由于直流本身会消耗无功,这样可减少交流 滤波器的反送无功对系统的冲击。

因此黑启动时直流启动的顺序控制为:

a. 换流变压器网侧断路器分别合闸,使换流变 压器和换流阀带电:

b. 直流侧开关设备操作以实现直流回路的 连接;

c. 在触发角 $\alpha \ge 90^{\circ}$ 时先解锁逆变器,后解锁整 流器;

d. 投入适量的交流滤波器支路;

e. 电压电流调节器按要求逐步升高直流电压、 电流至运行的整定值后转入正常运行。

3 直流启动时交流系统技术条件

3.1 交流系统强度要求

黑启动时尽快启动直流系统有利于系统快速恢复,但这对交流系统的最小强度提出要求。一般而言,在黑启动条件下,直流启动过程中暂态工频过电压不超过额定值的1.4倍,稳态工频电压值不超过额定值的1.1倍,频率变化范围不超过49~51 Hz。

a. 短路容量要求^[10]。

由于直流系统以最小功率启动时消耗无功较

少,因此直流启动时投入的最小滤波器组会产生反送无功,造成交流电压升高^[11]。直流功率建立时投入1组最小滤波器组合,则滤波器向交流系统反送的无功功率为 $Q_{\rm fo}$ 而在最小启动功率(单极 70%降压,最小电流 0.05 p.u.)运行时,直流系统吸收的无功功率 $Q_{\rm dei} \approx P_{\rm dei} = 0.035 P_{\rm dn}$,其中 $P_{\rm dn}$ 为直流额定功率。同时电压升高的幅值可用下式进行估算:

$$S_{\rm sc} = \frac{U}{\Delta U} Q \tag{8}$$

其中, S_{sc} 为换流母线的短路容量;U为滤波器投入启 动前的电压; ΔU 为电压升高幅值。根据龙政直流 工程中 $P_{dn} = 15Q_{f}$,则为满足稳定电压不超过 1.1 U_{N} (U_{N} 为额定电压)的要求,有:

$$S_{\rm sc} = \frac{1.0}{0.1} \left(Q_{\rm f} - 0.525 \, Q_{\rm f} \right) = 4.75 \, Q_{\rm f} \tag{9}$$

即若投入1组滤波器,受端短路容量需要为单组滤 波器容量的4.75倍左右。

由于在 550 kV 时, Q_i =260 Mvar,故至少需要 S_{se} = 1235 MV·A。当宜兴抽水蓄能水电站开 1 台机时,可 计算出短路容量 S_{se} =1250 MV·A,基本满足电压要求。

b. 频率波动估算^[15]。

对于直流接入弱交流系统,系统维持所要求频率 的能力取决于系统的转动惯量。根据发电机转子运 动方程可得:

$$\frac{\mathrm{d}\omega_{\mathrm{n}}}{\mathrm{d}t} = \frac{\omega_{\mathrm{n}}}{2H} (P_{\mathrm{m}} - P_{\mathrm{e}}) \tag{10}$$

其中, ω_n 为转速; P_m 为发电机机械功率有名值; P_e 为发电机电磁功率有名值;H为惯性时间常数。

因此有:

$$\Delta f = \frac{(P_{\rm m} - P_{\rm e})f_0}{2H_{\Sigma}}\Delta t \tag{11}$$

$$H_{\Sigma} = \sum_{i=1}^{n} H_{i} \frac{S_{Ni}}{S_{B}}$$
(12)

其中, H_{Σ} 为各发电机惯性时间常数归算到统一基准 功率 S_{B} 下的惯性时间常数和; $f_{0}=50$ Hz; $n=1,2,\cdots$; H_{i} 为第i台发电机的惯性时间常数; S_{Ni} 为第i台 发电机的容量。

通过式(11)可知,频率波动正比于系统不平衡 有功及其作用时间。

为衡量直流功率与系统转动惯量之间的相对关系,CIGRE直流工作组定义了直流系统有效惯性常数 H_{de}:

$$H_{\rm dc} = H_{\Sigma} \frac{S_{\rm ac}}{P_{\rm d}} \tag{13}$$

其中, S_{ac} 为交流系统总容量; P_{d} 为直流系统当前输送功率。联立式(11)与式(13)可得:

$$\Delta f = \frac{(P_{\rm m} - P_e) f_0 S_{\rm ac}}{2H_{\rm dc} P_{\rm d}} \Delta t \tag{14}$$

通过式(14)可大致估算直流启动时的系统频率

最大上升水平:仿真计算在直流停运情况下的有功 负荷冲击对频率的影响情况,间接估算直流启动时对 交流系统的频率影响。

由于宜兴抽水蓄能机组开1台机时即满足电压要求,在该条件下利用上述结论估算频率波动范围。 当宜兴抽水蓄能机组开1台机,带负荷为P_L=200MW、 Q_L=50 Mvar时,直流系统停运,逐渐按比例增加有功 负荷,观察最大频率偏差的变化情况,仿真结果如表 2 所示。

表 2 不同有功负荷冲击下的最大频率偏差 Table 2 Maximum frequency errors caused by

different active load impacts

冲击负 荷/MW	最大频率 偏差/Hz	负荷投入 时间/s	最大频率 偏差时间/s
20	-0.258	3	6.085
30	-0.385	3	6.034
40	-0.504	3	6.000
50	-0.630	3	6.149
60	-0.790	3	6.612

由仿真结果可知,冲击负荷的大小与最大频率 偏差成强线性关系。因此,可由有功负荷冲击估算 直流启动造成的频率变化,估算及仿真结果为:直流外 送有功功率为45 MW,估算最大频率偏差为0.5418 Hz,实测最大频率偏差为0.5204 Hz,频率估算误差 为3.95%。仿真时,直流采用整流侧定电流、逆变侧 定电压控制和单极70%降压启动方式,滤波器在直 流启动的同时投入,并投入相应高抗抵消滤波器投 入时的无功冲击。

因此,按照直流最小启动功率为 52.5 MW(外送 功率 45 MW)计算,逆变侧宜兴抽水蓄能机组开 1台 机即可满足启动频率要求。此时逆变侧机组总容量 为 312 MV·A,为直流启动功率 50 MW 的 6.24 倍,则

$$H_{\rm dc} = H_{\Sigma} \frac{S_{\rm ac}}{P_{\rm d}} = 10 \times 6.24 = 62.4 (s)_{\circ}$$

3.2 换流变励空载充电励磁涌流抑制

黑启动过程中,换流变压器在空载合闸投入电 网时,由于变压器铁芯磁通的饱和及铁芯材料的非 线性特性,会产生幅值相当大的励磁涌流^[16]。在弱 交流系统情况下,若不对励磁涌流进行处理会产生 较大的有功、特别是无功振荡,进而产生过电压。因 此,利用超高压系统中常采用的合闸电阻抑制励磁 涌流现象:断路器合闸过程中,在主触头闭合前于负 荷回路中短时串入一合闸电阻,对暂态过电压以及 励磁涌流进行抑制^[12]。抑制效果如图 5 所示。

可见合闸电阻的串入可有效抑制换流变的励磁 涌流现象,为黑启动时系统的稳定性提供保障。

3.3 黑启动时的无功协调配合

根据前述研究结论,虽然宜兴抽水蓄能机组开 1 台机时,电压在交流滤波器的无功冲击下仍能保持



Fig.5 Effect of inrush current depression by reclosing resistor

在限定范围,但若对交流滤波器反送无功不进行处 理,会使发电机处于进相运行状态,危害系统安全, 因此考虑投切高抗消耗滤波器的反送无功。但黑启 动时受端系统只开1台机,滤波器反送无功相对较 大,若同时投入大容量高抗,发电机有功及无功会产 生振荡,不利于系统稳定运行。进一步考虑提前投 入部分高抗,再于滤波器投入的同时投入剩余高抗, 不仅可以降低发电机发生自励磁的风险,同时也有 利于系统快速恢复。

4 仿真分析

通过以上研究,利用 PSCAD 软件进行仿真验证。 验证时受端宜兴抽水蓄能机组开1台机,带有功负荷 200 MW、无功负荷 50 Mvar,直流采取整流侧定电 流,逆变侧定电压控制模式,按单极 70%降压、最小 电流 0.05 p.u.、最小启动功率 52.5 MW 启动。直流 控制模式、启动方式及交流系统最小启动条件确定 后,验证直流顺序控制及无功协调配合策略,仿真条件 如下。

a.第1.5s带合闸电阻的换流变断路器合闸,第3s直流解锁。同时投入1组无功容量为200Mvar的交流滤波器,不投入高抗抵消反送无功。

b.第1.5s带合闸电阻的换流变断路器合闸,第 3.7s投入1组无功容量为200Mvar的交流滤波器, 同时投入无功负荷为200Mvar的高抗,待系统平稳 后第15s直流解锁。

c. 第 1.5 s 带合闸电阻的换流变断路器合闸,第 3 s 直流解锁,直流功率建立时第 3.7 s 投入 1 组无功 容量为 200 Mvar 的交流滤波器,同时投入无功负荷为 150 Mvar 的高抗(直流本身会消耗约 50 Mvar 无功)。

d.第0s先投入100 Mvar的高抗,第1.5s带合 闸电阻的换流变断路器合闸,第3s直流解锁,直流 功率建立时第3.7s投入1组无功容量为200 Mvar 的交流滤波器,同时投入无功负荷为50 Mvar的高抗。

发电机的外送有功、无功,系统频率及机端电 压如图 6 所示。

由图 6(a)可知,不对滤波器反送无功进行处





理,系统稳态电压达到 560kV,超过 1.1 倍限定电压 值。同时由于电压的升高,导致系统负荷有功相应增 加,反而减小了直流启动时的有功冲击,使得系统 频率波动较小。而另一方面电压的升高增加了滤波 器的反送无功,使得发电机进相运行。因此,若不对 滤波器反送无功进行处理,会危害系统稳定性,不利 于系统的快速恢复。

第36卷

由图 6(b)可知,直流解锁前投入滤波器的同时 投入高抗,稳定后可避免发电机进相运行,但发电机 外送有功及无功由于大容量高抗的投入会产生振 荡,且由于直流有功建立的同时会消耗无功,系统 稳定运行点变化,频率大幅上升,同时电压升高,稳 态工频过电压为 556 kV,超过限定额度。

在图 6(c)中,直流启动时同时投入滤波器和高抗,稳定后同样可避免发电机进相运行,但发电机外送有功及无功由于大容量高抗的投入产生振荡。直流有功冲击同样导致发电机频率波动,系统稳定运行点变化,进而导致电压升高,稳态工频过电压为560 kV,超过限定额度。图中电压及功率在 7 s 至 11 s 期间呈直线状是由于该时段电力系统稳定器(PSS)达到限幅所致。

图 6(d)中,由于直流解锁前投入大部分高抗, 解锁前交流电压降低为 480 kV,在±5% 范围内。直 流启动后,交流滤波器及小部分高抗同时投入,发电 机外送有功及无功振荡现象明显好转。同时,系统 频率波动减小,有利于稳定运行,稳态电压为 550 kV,低于 1.1 倍额定电压,符合黑启动标准。

5 结语

本文从交流、直流两方面对黑启动初期直流参与弱交流系统的技术要求进行了详细研究,明确了 直流参与黑启动时宜采取整流侧定电流、逆变侧定 电压控制模式,并以单极 70%降压启动。而在直流 启动之前,投切1组交流滤波器时,交流系统短路容 量需达到单组滤波器容量的 4.75 倍左右,同时需要 对直流有功冲击造成的频率波动进行估算,确保交 流系统的电压、频率在限定范围内。直流启动过程 中,必须分阶段投入高抗处理交流滤波器的反送无 功,避免在弱交流系统中发电机进相运行及功率振荡。

本文的研究内容提供了江苏电网在全黑情况 下,利用宜兴抽水蓄能机组启动龙政直流快速恢复 系统的基本条件及技术要求,为直流参与交流电网黑 启动提供了依据。

参考文献:

- [1] LINDSTROM R R. Simulation and field tests of the black start of a large coal-fired generating station utilizing small remote hydro generation[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 1990, 5 (1):162-168.
- [2] 刘隽,李兴源,许秀芳. 互联电网的黑启动策略及相关问题[J].
 电力系统自动化,2004,28(5):93-97.

LIU Jun,LI Xingyuan,XU Xiufang. Strategies and problems in black start of interconnected power grids[J]. Automation of Electric Power Systems,2004,28(5):93-97.

[3] 王大江,顾雪平,贾京华. 基于 SE-DEA 模型的扩展黑启动方案 恢复相对效率研究[J]. 电力自动化设备,2015,35(2):62-67.

WANG Dajiang, GU Xueping, JIA Jinghua. Relative efficiency of extended black-start restoration plans based on super efficiency data envelopment analysis model[J]. Electric Power Automation Equipment, 2015, 35(2):62-67.

[4] 阮前途,王伟,黄玉,等. 基于燃机机组的上海电网黑启动系列试验[J]. 电网技术,2006,30(2):19-22.
RUAN Qiantu,WANG Wei,HUANG Yu,et al. A series of blackstart tests based on gas turbine generators in Shanghai Power Grid[J]. Power System Technology,2006,30(2):19-22.
[5] 张其明,王万军. 陕西电网黑启动方案研究[J]. 电网技术,2002,26 (4):42-45.

ZHANG Qiming, WANG Wanjun. A study on black-start scheme for Shaanxi Power Network[J]. Power System Technology, 2002, 26 (4):42-45.

[6] 林济铿, 么莉, 孟宪朋, 等. 天津电网黑启动试验研究[J]. 电网技术, 2008, 32(5):55-58.
 LI Jikeng, YAO Li, MENG Xianpeng, et al. Test research of

black start of Tianjin Power Grid[J]. Power System Technology, 2008, 32(5):55-58.

- [7] 孟强,牟龙华,许旭锋,等. 孤立微电网的黑启动策略[J]. 电力自动化设备,2014,34(3):59-64.
 MENG Qiang,MU Longhua,XU Xufeng,et al. Black-start strategy of isolated microgrid[J]. Electric Power Automation Equipment,2014,34(3):59-64.
- [8] 夏俊丽,毛荀,柯德平,等. 基于综合评价的交、直流输电适用范围研究[J]. 电力自动化设备,2015,35(3):120-139.
 XIA Junli,MAO Xun,KE Deping, et al. Applicable scope of AC and DC power transmission based on comprehensive evaluation [J]. Electric Power Automation Equipment,2015,35(3):120-139.
- [9] 李宽,李兴源,李保宏,等. 基于射影定理分层控制的次同步阻尼 控制器设计[J]. 电力自动化设备,2015,35(2):80-84.
 LI Kuan,LI Xingyuan,LI Baohong, et al. Design of supplementary subsynchronous damping controller based on projective theorem for hierarchical control[J]. Electric Power Automation Equipment, 2015,35(2):80-84.
- [10] 周剑,李建设,苏寅生. 电网黑启动情况下高压直流输电系统启动条件分析[J]. 电力系统自动化,2011,35(3):92-96.
 ZHOU Jian,LI Jianshe,SU Yinsheng. Analysis on start-up conditions of HVDC system in black-start[J]. Automation of Electric Power Systems,2011,35(3):92-96.
- [11] 周剑,苏寅生,王新宝. 云广直流在南方电网黑启动及系统恢复 过程的作用[J]. 南方电网技术,2010,4(4):48-51.
 ZHOU Jian,SU Yinsheng,WANG Xinbao. The role of Yunnan-Guangdong ±800 kV DC Project in CSG black-start and recovery process [J]. Southern Power System Technology,2010,4 (4): 48-51.
- [12] 胡艳梅,吴俊勇,李芳,等.±800 kV 哈郑特高压直流控制方式 对河南电网电压稳定性影响研究[J].电力系统保护与控制, 2013,41(21):147-153.
 HU Yanmei,WU Junyong,LI Fang,et al. Impacts of DC system control mode for ±800 kV Ha-Zheng UHVDC on voltage stability of Henan Power Grid[J]. Power System Protection and Control, 2013,41(21):147-153.
- [13] 王华伟,曾南超,蒋卫平,等. ±660kV中蒙直流工程送端孤岛运行方式最小功率启动研究[J]. 电网技术,2010,34(5):83-87.
 WANG Huawei,ZENG Nanchao,JIANG Weiping, et al. Study on minimal startup power of ±660kV HVDC power tansmission

system under islanded operation at sending system[J]. Power System Technology, 2010, 34(5):83-87.

- [14] 赵畹君. 高压直流输电工程技术[M]. 北京:中国电力出版社, 2004:103-104.
- [15] 郭小江,郭强,马世英,等. 直流孤岛送电系统的系统接入技术 要求研究[J]. 中国电机工程学报,2012,32(34):42-49.
 GUO Xiaojiang,GUO Qiang,MA Shiying,et al. Research on system interconnection requirements of DC island sending systems[J]. Proceedings of the CSEE,2012,32(34):42-49.
- [16] 常勇. 500 kV 高岭换流站换流变空载充电励磁涌流分析[J].
 电网技术,2009,33(1):97-100.

CHANG Yong. Analysis on energizing inrush current of no-load

converter transformer in 500 kV Gaoling back-to-back converter station[J]. Power System Technology,2009,33(1):97-100.

作者简介:



李保宏(1986—),男,四川平昌人,博士 研究生,主要研究方向为电力系统稳定与控 制(**E-mail**;scu lbh@163.com);

刘天琪(1962—),女,四川宜宾人,教 授,博士研究生导师,博士,研究方向为电力 系统稳定与控制、高压直流输电、新能源并 网方式。

Technical conditions of HVDC for involving in black-start of weak receiving AC system

LI Baohong¹, LIU Tianqi¹, XU Weihua², LI Qiang², LI Xingyuan¹, ZHANG Yingmin¹

(1. College of Electrical Engineering and Information, Sichuan University, Chengdu 610065, China;

2. State Grid Smart Grid Research Institute, Beijing 102209, China)

Abstract: In order to speed up the power grid recovery, Yixing pumped storage power station can be used as a black-start power source according to the present situation of Jiangsu Power Grid to start Long-Zheng HVDC at the initial stage of black-start. The control modes, startup modes, de-blocking methods and sequential control of HVDC for involving in the black-start are researched to set its technical conditions needed. For the HVDC startup with the minimum power, the technical requirements of AC system, inrush current depression and reactive power coordination are researched. The results of simulation with PSCAD electromagnetic transient model verify the correctness of theoretical analysis.

Key words: electric power systems; black-start; HVDC power transmission; weak AC system; technical requirement

(上接第 22 页 continued from page 22)

DG planning based on CLARA algorithm with consideration of timing characteristics

BAI Xiaoqing, ZHAO Zhan, BAO Haibo

(Guangxi Power System Optimization and Energy-Saving Technique Key Lab,

Guangxi University, Nanning 530004, China)

Abstract: Aiming at the optimal locating and sizing of DG(Distributed Generator) in distributed network, a multi-scene multi-period mixed-integer nonlinear stochastic optimization model is built, which takes the minimum annual power loss as its objective and considers the randomness and timing characteristics of different DGs. Monte Carlo method is applied to generate the time-series scenes and the constraints of each scene are considered to approximately constrain the stochastic process for converting a stochastic optimization problem into a deterministic optimization problem. CLARA(Clustering LARge Application) algorithm is adopted to cluster the samples obtained by simulations for each scene and each period to avoid the large sample scale, model solving difficulty, etc. The tests of IEEE 14- and 33-bus standard systems show that, the proposed model and algorithm can effectively make use of the time-series complementation among different DGs to improve the DG output accommodation capability of distributed network. Compared with the complete scene method without clustering and PAM(Partitioning Around Medoids) clustering method, the proposed algorithm, with the approximate error of optimized result lower than 3%, reduces the model solving difficulty and shortens the computation time significantly.

Key words: DG; locating and sizing; distribution network planning; randomness; timing characteristics; CLARA algorithm; clustering algorithms