

DOI: 10.7500/AEPS20130412009

考虑机组恢复成功率的黑启动阶段待恢复机组优选

朱海南¹, 刘玉田¹, 邱夕兆²

(1. 电网智能化调度与控制教育部重点实验室(山东大学), 山东省济南市 250061;

2. 山东省电力调度控制中心, 山东省济南市 250001)

摘要: 待恢复机组的选择是制订黑启动方案的首要任务。分析了影响黑启动阶段机组成功恢复的主要因素,其中重点分析了变压器空载投入时励磁涌流引起的黑启动机组机端电压波形畸变的影响。在此基础上,定义了线路权重、变压器权重和辅机权重,提出了黑启动阶段机组恢复成功率的概念。综合考虑机组恢复成功率和机组容量等因素,对黑启动阶段待恢复机组进行优选。为了减小计算量,首先从所有待恢复机组中筛选部分机组作为寻优集合,并使用前 K 最短路径算法搜索寻优集合中机组的可选恢复路径。山东电网实际仿真证明了定义的机组恢复成功率的有效性和所述方法的快速性。

关键词: 电力系统恢复; 励磁涌流; 前 K 最短路径; 机组恢复成功率

0 引言

新技术和设备的采用无法从根本上避免大停电的发生^[1],大停电发生后要进行的是系统状态的识别和设备可用性的诊断^[2-4],然后根据停电后具体的系统状态进行黑启动方案、网架重构方案和负荷恢复方案的制订^[5-9]。制订黑启动方案时,待恢复机组的选择是其首要工作。恢复初期的很多恢复操作具有临界时间限制,时间是最为关键的因素^[2-3]。因此,制订黑启动方案时,快速选定待恢复机组能够加快方案制订进度,尽早进行具体的恢复操作,这对于加快系统的恢复进程具有重要意义。

许多学者对待恢复机组的选择及黑启动方案的制订进行了研究。文献^[10]系统介绍了制订恢复方案的步骤和需要注意的各种问题;文献^[5]提出了一种黑启动方案的决策系统,包括黑启动方案的生成、校验和决策等模块;文献^[6]提出采用广度优先搜索策略生成在拓扑关系上可行的黑启动方案,然后对生成的方案进行各项校验和评估,但这样生成的黑启动方案会较多,对方案进行各项技术校验时会耗费较长时间;文献^[7]采用了深度优先搜索策略来形成多种黑启动初始方案,再对所有方案进行校验,从中选择相对最优方案,这同样存在计算量大、耗时间长的问題。

以往研究大都是先生成多种黑启动方案,然后再通过校验和评估来确定黑启动阶段的待恢复机组以及对应的恢复方案。由于需要校验多个方案,这种方法通常用时较长。为了快速选择黑启动阶段的待恢复机组,本文分析了影响黑启动阶段机组成功恢复的各种因素,其中重点分析了变压器励磁涌流的影响。在此基础上,定义了线路权重、变压器权重和辅机权重,提出了黑启动阶段机组恢复成功率的概念。综合考虑机组恢复成功率和机组容量等因素的影响,快速优选出黑启动阶段的待恢复机组和相应的恢复路径,缩短制订黑启动方案所用的时间,加快系统的恢复进程。

1 黑启动阶段机组恢复成功率

系统恢复过程中的黑启动阶段是指大停电发生后,具有自启动能力的机组成功启动后向无自启动能力的机组提供启动功率,使其重新并网发电的过程^[11]。黑启动阶段是整个恢复过程的起始阶段,黑启动阶段恢复目标的成功完成对后续系统恢复过程具有重要意义,反之则会严重延误整个系统的恢复进程。故在黑启动阶段,选定的待恢复机组成功恢复的可能性应尽可能大,而后续阶段机组恢复过程中,除考虑机组的安全恢复之外,还可考虑机组恢复过程中提供发电量最大的目标^[12]。

影响黑启动阶段机组成功恢复的主要操作有空载线路的充电、空载变压器投入和待恢复机组的大型辅机启动等,本文分别定义了线路权重、变压器权重和辅机权重来表征这 3 种操作对黑启动阶段机组

收稿日期: 2013-04-12; 修回日期: 2013-06-13。

国家高技术研究发展计划(863 计划)资助项目(2011AA05A118); 国家自然科学基金资助项目(50877044)。

恢复的影响,并在此基础上提出了黑启动阶段机组恢复成功率的概念。

1.1 线路权重

线路空载充电时,可能会引起线路工频过电压、操作过电压和发电机自励磁等问题^[13]。工频过电压是由空载线路充电时,线路对地电容发出的大量无功功率导致系统无功功率不平衡引起的^[14];操作过电压是线路空载投入时在线路端引起的过电压,线路的对地电容会影响操作过电压的大小;发电机自励磁发生的根源是:线路对地电容的容性充电电流的助磁作用产生的正反馈,使系统发生自激振荡^[15]。因此,可用线路的等值容抗来表示上述问题的严重程度。线路对地电容越小,线路等值容抗越大,则过电压倍数越小,发电机发生自励磁的可能性越小;反之过电压倍数越大,发电机发生自励磁的可能性越大。单条线路等值容抗 X_C 计算电路如图 1 所示。

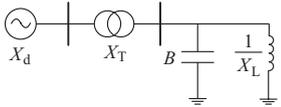


图 1 同步电机带空载长线路等效电路

Fig.1 Equivalent circuit of synchronous generator with a no-load long line

图中: B 为线路等值电纳; X_L 为线路的并联电抗;忽略线路电阻和感抗的影响。线路的等值容抗 X_C 为:

$$X_C = \frac{1}{B - \frac{\epsilon}{X_L}} \quad (1)$$

式中: ϵ 为表征线路上是否存在并联电抗的量,当线路上存在并联电抗时, $\epsilon=1$,反之 $\epsilon=0$ 。

若待恢复机组 i 的第 j 条恢复路径中包含 m 条线路,则该条恢复路径的等值容抗 X_C^{ij} 为:

$$X_C^{ij} = \frac{1}{\sum_{k=1}^m \frac{1}{X_{Ck}}} \quad (2)$$

式中: X_{Ck} 为线路 k 的等值容抗。

通过恢复路径 j 对机组 i 进行恢复时,该条恢复路径的线路权重 L_w^{ij} 定义为:

$$L_w^{ij} = X_C^{ij} \quad (3)$$

恢复路径的线路权重越大,表示该条路径空载充电时的过电压倍数越小,黑启动机组发生自励磁的可能性越小。

1.2 变压器权重

在黑启动阶段,需要对待恢复机组恢复路径中的变压器进行空载充电操作。在变压器空载投入引

起的问题中,以往主要关注的是空充变压器引起的谐振过电压^[13]问题,而对变压器空载投入时励磁涌流对黑启动机组机端电压影响的研究不多。本文分析了励磁涌流引起的机端电压波形畸变对系统恢复的影响,并定义了变压器权重来反映对机组恢复的影响。

对空载变压器进行充电时,会产生励磁涌流现象^[16],其幅值可达额定电流的 4~8 倍,励磁涌流中有数值很大的高次谐波分量(以二次谐波为主)。在黑启动阶段,黑启动机组输出的有功功率相对较小,与之相对应的基波电流也较小;而且黑启动机组并非理想电压源,因此,在励磁涌流的影响下,黑启动机组的机端电压波形会产生畸变。电压波形畸变到一定程度时,会引起采用自并励的黑启动机组的励磁系统异常,进而引起黑启动机组跳闸。2012 年 6 月 5 日,山东电网黑启动试验过程中由于变压器励磁涌流的影响,黑启动机组的机端电压波形发生严重畸变,最终导致采用自并励的黑启动机组跳闸,黑启动机组机端电压的畸变情况见附录 A 图 A1。为了减小变压器励磁涌流的不利影响,最终选定的待恢复机组恢复路径中的变压器空载投入时的励磁涌流幅值要小,引起的黑启动机组机端电压波形的畸变程度要小。

文献[16]给出了一种变压器空载充电时励磁涌流的实用计算方法。图 2 所示为单相变压器空载合闸的等效电路。 L_s 和 R_s 分别为系统等电感值和等效电阻; L_σ 为变压器漏感; r_σ 为变压器等效电路中的串联电阻,等于变压器线圈的直流电阻; R_m 为变压器的铁耗电阻,由于变压器铁芯损耗较小,通常忽略; L_m 为变压器的磁化电感。

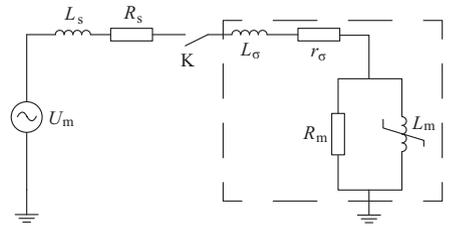


图 2 单相变压器空载合闸等效电路

Fig.2 Equivalent circuit when single-phase no-load transformer switching

变压器空载合闸后,由于励磁回路饱和产生励磁涌流,之后由于变压器铁芯偏磁的减小导致励磁涌流开始衰减。因此,励磁涌流产生后第 1 个周期的幅值最大,引起的机端电压畸变程度也最大,相对应的畸变电压的幅值在第 1 个周期也最大。故可用畸变电压的幅值来反映电压的畸变程度,第 1 个周

期内黑启动机组机端电压的幅值 U_0 为:

$$U_0 = I_0 |Z| = U_m \left(1 + \cos \frac{\theta_{j,0}}{2} \right) \quad (4)$$

$$Z = R_s + r_\sigma + j\omega(L_s + L_\sigma + L_m) \quad (5)$$

$$\theta_{j,0} = 2\arccos \left(\cos \alpha - \frac{\phi_{\text{sat}} - \phi_{\text{res}}}{\phi_m} \right) \quad (6)$$

式中: I_0 为励磁涌流幅值; Z 为整个回路的阻抗; α 为合闸角; ϕ_{sat} 为饱和磁通; ϕ_{res} 为剩余磁通; ϕ_m 为稳态磁通; U_m 为电源电压幅值。

将式(6)代入式(4),得到:

$$U_0 = U_m \left(1 + \cos \alpha - \frac{\phi_{\text{sat}} - \phi_{\text{res}}}{\phi_m} \right) \quad (7)$$

变压器投入时,由于断路器为机械装置,不可避免地存在动作延时,因此合闸角 α 无法做到精确控制,故本文考虑 $\alpha = 0^\circ$,即励磁涌流最严重的情况,得到:

$$U_0 = U_m \left(2 - \frac{\phi_{\text{sat}} - \phi_{\text{res}}}{\phi_m} \right) \quad (8)$$

在黑启动机组确定,即 U_m 确定的情况下, U_0 主要取决于 ϕ_{sat} , ϕ_{res} 和 ϕ_m 三者的关系。其中 ϕ_{sat} 和 ϕ_m 与变压器铁芯的磁化曲线有关,而 ϕ_{res} 可根据变压器跳闸时的电流幅值和相角进行计算^[17],当由于通信通道故障无法获取所需信息时, ϕ_{res} 按照最严重的情况设置。变压器 k 的权重 T_{wk} 可定义为:

$$T_{wk} = \frac{\phi_{\text{sat}k} - \phi_{\text{res}k}}{\phi_{mk}} \quad (9)$$

根据式(8)和式(9),变压器权重越大,空载投入时引起的黑启动机组机端电压畸变程度越小。

设待恢复机组 i 的恢复路径 j 中共包含 n 台变压器,第 1 台变压器空载投入时会引起黑启动机组机端电压波形发生一定程度的畸变,但随着励磁涌流的衰减,畸变程度会不断减小直至基本恢复为标准正弦波;然后第 2 台变压器投入后机端电压波形会再次畸变,随着励磁涌流的衰减恢复为标准正弦波,依此类推。恢复路径中各台变压器投入引起的电压畸变不会累加,因此该条路径的变压器权重取为引起电压畸变最严重的变压器的权重,即

$$T_w^{ij} = \min T_{wk} \quad k = 1, 2, \dots, n \quad (10)$$

对于变压器空载投入时引起的谐振过电压问题,需要通过数值仿真的方法判断其谐振过电压是否越限。

1.3 机组辅机权重

在黑启动阶段,系统较为薄弱,启动待恢复机组的辅机设备时,如果辅机容量过大,会引起较大的频率跌落和电压跌落^[18],导致辅机启动失败,严重时会使已恢复系统再次瘫痪。文献[18]提出了一种计

及暂态电压安全约束和频率约束的可允许投入最大负荷量的计算模型和求解方法,可用来计算恢复辅机设备时在满足暂态电压安全二元表(V_{cr} , T_{cr})和频率约束下允许单次投入的最大电动机负荷容量。本文采用文献[18]提出的模型和方法来求解待恢复机组 i 使用路径 j 恢复时允许投入的最大电动机负荷量 $P_{\text{max}ij}$,设机组最大辅机容量为 $P_{\text{max}i}'$,则机组 i 的辅机权重可定义为:

$$G_w^{ij} = \frac{P_{\text{max}ij}}{P_{\text{max}i}'} \quad (11)$$

辅机权重越大,表示辅机启动时电压跌落和频率跌落越小,成功启动的可能性越大。

1.4 机组恢复成功率

1.4.1 权重预处理

为方便比较,对 L_w , T_w 和 G_w 进行模糊化处理。对于 L_w 和 G_w 采用如下隶属度函数:

$$\mu(f(x)) = \begin{cases} 0 & f(x) < f(x)^- \\ \frac{f(x)}{f(x)^+} & f(x) \geq f(x)^- \end{cases} \quad (12)$$

对于 L_w , $f(x)^-$ 根据黑启动机组带空载线路不发生自励磁的实用判据进行设置^[13], $f(x)^+$ 设置为 L_w 中的最大值。当 $L_w < f(x)^-$ 时,表示给该条路径充电时发生自励磁,无法安全恢复;当 $L_w > f(x)^-$ 时,不发生自励磁,且线路权重越大,线路空载充电时的过电压水平越低,线路成功恢复的可能性越大。对于 G_w , $f(x)^-$ 取值为 1, $f(x)^+$ 设置为 G_w 中的最大值。当 $G_w < f(x)^-$ 时,表示无法在满足暂态电压安全约束和频率安全约束的情况下启动机组的辅机,使用当前路径无法安全恢复机组;而当 $G_w > f(x)^-$ 时,辅机可安全启动,且辅机权重越大,辅机启动时对系统的冲击越小,机组成功恢复的可能性就越大。

对于变压器权重 T_w ,由于自并励机组励磁系统的纹波监视回路的逻辑比较部分为黑匣子,因此无法像 L_w 和 G_w 一样设置一个用来判断能否安全恢复的门槛值 $f(x)^-$ 。对 T_w 使用如下模糊函数:

$$\gamma(g(x)) = \frac{g(x)}{g(x)^+} \quad (13)$$

式中: $g(x)^+$ 为 T_w 中的最大值。

为了提高机组成功恢复的几率,要选择恢复路径中变压器的 T_w 大的机组进行恢复。

1.4.2 考虑机组恢复成功率的机组优选

黑启动阶段机组成功恢复的前提是恢复路径中线路和变压器的成功投运,以及机组辅机的顺利启动,整个机组恢复过程是一个整体,其中任一阶段的失败都会导致整个机组恢复的失败。根据式(3)、

式(10)和式(11),恢复路径中的 L_w 越大,发生自励磁的可能性越小,线路过电压水平越低; T_w 越大,变压器空载投入时引起的机端电压波形畸变越小; G_w 越大,辅机启动时电压和频率跌落越小,因此机组成功恢复的可能性越大。故机组成功恢复的几率与 L_w, T_w 和 G_w 呈正相关关系。

综合考虑 L_w, T_w 和 G_w 的影响,提出黑启动阶段待恢复机组 i 经由路径 j 恢复时的恢复成功率为:

$$\eta_{ij} = \mu(L_w^{ij})\gamma(T_w^{ij})\mu(G_w^{ij}) \quad (14)$$

根据式(14), η 与恢复路径的 L_w 和 T_w 以及使用当前路径恢复时的 G_w 有关,因此同一机组经由不同的恢复路径进行恢复时, η 也不同。当式(14)中的 $\mu(L_w^{ij})$ 和 $\mu(G_w^{ij})$ 中任意一项为0时, η 就为0,表示无法使用当前路径恢复;当 $\mu(L_w^{ij}), \gamma(T_w^{ij})$ 和 $\mu(G_w^{ij})$ 都不为0时, η 才不为0,表示有成功恢复的可能性。恢复路径的 L_w 和 T_w 越大,使用当前路径恢复时的机组 G_w 越大, η 就越大,表示使用当前路径成功恢复机组的可能性就越大。

在选择黑启动阶段的待恢复机组时,除考虑机组的恢复成功率要尽可能大之外,还要考虑优先启动容量大的机组。本文采用如下方法进行选择,首先计算出所有待恢复机组的恢复成功率 η ,获得其中最大的恢复成功率 $\max \eta$;选取对应 $\max \eta$ 的机组以及对应 η 与 $\max \eta$ 相当的若干台机组组成一个集合,从中选择出容量最大的机组作为黑启动阶段的待恢复机组,并选择该台机组对应 η 最大的恢复路径作为黑启动阶段的恢复路径;如果除对应 $\max \eta$ 的机组外,其余机组的 η 与 $\max \eta$ 差异较大,则选择对应 $\max \eta$ 的机组以及其恢复路径作为黑启动阶段的待恢复机组和其恢复路径。

2 待恢复机组优选

求解待恢复机组优选问题时,理论上需要找到所有待恢复机组的所有拓扑关系上可行的恢复路径,分别计算其机组恢复成功率 η 。为了减小求解计算量以提高求解速度,需要对待恢复机组及机组恢复路径进行初步筛选。

2.1 待恢复机组寻优集合

待恢复机组集合 U 中并非所有机组都适合在黑启动阶段进行恢复,例如:超大容量机组的启动过程复杂,启动时间长,距离黑启动机组较远的机组需要过多的线路操作,耗费时间较长,故这两类机组不适合在黑启动阶段进行恢复。因此,可对 U 中机组进行初步筛选,只选取部分机组组成待恢复机组寻

优集合 u ,减少待恢复机组优选时的运算量。 u 中的机组可由运行人员指定或者按照一定规则进行选取,如选取容量适当,且经过线路数目不超过一定数值的机组。

2.2 基于前 K 最短路算法的恢复路径寻优集合

机组 i 的可选恢复路径集合 P_i 的构建主要有2种方法:一种是使用广度优先搜索或深度优先搜索策略生成在拓扑关系上可行的所有恢复路径^[6-7],这种方法会形成过多方案,不利于待恢复机组的快速选择和恢复方案的快速制订;另一种是使用最短路算法获取从黑启动机组到待恢复机组经过线路最少的路径,但这样每台机组仅对应一条恢复路径,就有可能丢失成功率最高的路径。本文提出采用前 K 最短路算法^[19-20]来搜索机组的可选恢复路径,搜索黑启动机组到待恢复机组的第1条到第 K 条经过线路最少的路径作为机组恢复路径的寻优集合。这样一方面限制了搜索到的恢复路径的个数,减小了问题求解的规模,可加快寻优速度;另一方面可以尽量避免最优解的丢失。

2.3 求解流程

黑启动阶段待恢复机组优选流程如下。

步骤1:读取数据,识别系统状态和设备可用性,形成系统拓扑关系矩阵 M (两节点间存在可用线路时取值为1,反之则取值为0)和待恢复机组集合 U ,并形成待恢复机组寻优集合 u 。

步骤2:求取 u 中每台机组的前 K 条最短路,形成机组恢复路径的寻优集合 P 。

步骤3:计算 u 中每台机组对应的每条恢复路径的 L_w, T_w 和 G_w ,按式(12)和式(13)计算对应的 $\mu(L_w), \gamma(T_w)$ 和 $\mu(G_w)$,最终计算出每条恢复路径对应的 η 。

步骤4:按照1.4.2节所提机组优选方法选择出黑启动阶段的待恢复机组和恢复路径,然后采用数值仿真方法对该方案进行各项校验,包括发电机自励磁、线路空载充电时的过电压、变压器空载投入时的励磁涌流和谐振过电压以及机组辅机启动时的电压和频率跌落校验。

步骤5:如果当前方案校验不通过,按照 η 的大小排序依次对恢复方案进行校验;如果所有方案都不通过校验,则对 η 最大的方案根据其越限情况进行调整。

3 仿真分析

以山东电网为例,说明黑启动阶段待恢复机组优选的过程。山东电网发生大停电事故后,使用内

部电源作为黑启动电源进行恢复时,黑启动电源的首选是泰山抽水蓄能电站。其中泰山抽水蓄能电站1号机组进行过多次技术改造,并且先后进行了3次黑启动试验,启动速度快,运行稳定性高,可作为可靠的黑启动机组。

停电事故发生后,首先对山东电网的系统状态进行识别,判断各种设备的可用性,形成系统的拓扑关系矩阵 M 和待恢复机组集合 U 。从 U 中选取石横乙5号机组、邹县厂3号机组、运河电厂5号机组和黄台电厂7号机组作为待恢复机组寻优集合 u 。使用前 K 最短路径算法搜索恢复路径时,为控制求解规模,取 $K=3$ 。泰山抽水蓄能电站周边电网结构如附录A图A2所示。

从黑启动机组到 u 中待恢复机组的前3条最短路径中经过线路如附录A表A1所示,恢复路径中的变压器如附录A表A2所示,变压器剩磁情况如附录A表A3所示,并设不同路径在同一变电站进行相同电压等级转换时使用同一变压器。分别计算 u 中待恢复机组的不同恢复路径的 $\mu(L_w)$, $\gamma(T_w)$, $\mu(G_w)$ 及 η ,如表1所示。

表1 机组恢复成功率
Table 1 Successful rate of unit restoration

机组	路径	$\mu(L_w)$	$\gamma(T_w)$	$\mu(G_w)$	η
石横乙5号机组	1	0.831	0.846	1.000	0.703
	2	0.665	0.846	0.944	0.531
	3	0.826	0.846	0.889	0.622
邹县厂3号机组	1	1.000	0.462	0.533	0.246
	2	0.474	1.000	0.500	0.237
	3	0.473	1.000	0.500	0.237
运河厂5号机组	1	0	0.538	0.833	0
	2	0	0.538	0.778	0
	3	0	0.462	0.667	0
黄台厂7号机组	1	0	0.462	0.794	0
	2	0	0.538	0.856	0
	3	0	0.462	0.733	0

运河厂5号机组和黄台厂7号机组的各条恢复路径的 L_w 均不满足自励磁不发生的条件, $\mu(L_w)$ 按式(12)计算为0,故这2台机组的 η 为0,如表1所示。在石横乙5号机组和邹县厂3号机组对应的各条恢复路径中,石横乙5号机组恢复路径1对应的 η 值最大,且远大于其余机组对应的 η 。故黑启动阶段待恢复机组就选择为石横乙5号机组,并且该机组的恢复路径选为对应的路径1。

为验证 η 的有效性,对石横乙5号机组路径1和邹县厂3号机组路径1对应的黑启动方案进行校验和对比分析,校验结果如表2所示。表中:工频过电压和操作过电压是指线路空载充电时的最大工频

过电压和最大操作过电压,其为标么值;谐振过电压是指变压器空载投入时的最大谐振过电压,其为标么值;是否通过励磁涌流校验一栏的“是”表示变压器空载投入时产生的励磁涌流未引起黑启动机组跳闸,通过励磁涌流校验,而“否”则表示引起黑启动机组跳闸,未通过励磁涌流校验;跌落电压为标么值。

表2 方案校验结果
Table 2 Checking results of black start plans

方案	工频过电压	操作过电压	谐振过电压	是否发生自励磁	是否通过励磁涌流校验	跌落电压	跌落频率/Hz
1	1.06	2.02	1.41	否	是	0.15	0.29
2	1.03	1.74	1.91	否	否	0.20	0.43

方案1为石横乙5号机组路径1,其各项指标都在允许范围内,通过校验;方案2为邹县厂3号机组路径1,未通过变压器励磁涌流校验。这与表1中石横乙5号机组路径1的 $\gamma(T_w)$ 较大,而邹县厂3号机组路径1的 $\gamma(T_w)$ 较小相一致。另外方案2的线路过电压水平较低,与表1中邹县厂3号机组路径1的 $\mu(L_w)$ 较大相一致,方案1的电压跌落和频率跌落较小,与表1中石横乙5号机组路径1的 $\mu(G_w)$ 较大相一致,可表明本文定义的各项权重和 η 可正确反映黑启动阶段各机组成功恢复的可能性大小。

方案制订过程中,使用时域仿真技术对方案进行校验是最为耗时的阶段,尤其是对变压器励磁涌流的校验。当使用广度优先搜索策略和前 K 最短路径算法($K=3$)按照先生成方案再校验筛选的方法来选择待恢复机组时,待恢复机组寻优集合仍然选择为石横乙5号机组、邹县厂3号机组、运河电厂5号机组和黄台电厂7号机组,各方法需要进行的方案校验次数如表3所示。

表3 方案校验次数
Table 3 Number of plan checking

方法	广度优先搜索	前 K 最短路径	η + 前 K 最短路径
校验次数	23	12	1

从表3可见,使用 η 并结合前 K 最短路径算法选择待恢复机组时,可显著减少方案校验次数,节省黑启动方案制订时间以加快恢复进程。

在黑启动阶段,如果能够同时启动多台待恢复机组,则机组成功启动后可为系统后续恢复提供更大的功率支持,从而加快系统的恢复速度^[21]。优化扩展黑启动方案时,可将扩展黑启动形成的小系统在确定时间段 T_1 内发电量的加权和最大^[21]与多台待恢复机组的机组恢复成功率最大作为优化目标,

对在黑启动阶段进行恢复的机组和相关恢复路径同时进行优化,力求得到更优的扩展黑启动方案。

4 结语

本文分析了线路空载充电、变压器空载投入和机组辅机启动 3 种操作对黑启动阶段机组恢复的影响,其中重点分析了变压器空载投入时产生的励磁涌流的影响。在此基础上,定义了线路权重、变压器权重和辅机权重,并提出了黑启动阶段机组恢复成功率的概念。综合考虑机组恢复成功率和机组容量等因素的影响,通过对待恢复机组进行提前筛选和使用前 K 最短路径算法建立机组恢复路径寻优集合来快速选择黑启动阶段的待恢复机组及对应的恢复路径。山东电网的实际仿真表明,本文提出的机组恢复成功率可正确反映在黑启动阶段不同机组成功恢复的可能性大小,本文方法能快速有效地选定黑启动阶段的待恢复机组及相应的恢复路径,减少黑启动方案制订过程中方案校验的计算量,节省方案制订时间以加快系统恢复进程。

附录见本刊网络版(<http://aeps.sgepri.sgcc.com.cn/aeps/ch/index.aspx>)。

参考文献

[1] 薛禹胜.时空协调的大停电防御框架:(一)从孤立防线到综合防御[J].电力系统自动化,2006,30(1):8-16.
XUE Yusheng. Space-time cooperative framework for defending blackouts: Part I from isolated defense lines to coordinated defending[J]. Automation of Electric Power Systems, 2006, 30(1): 8-16.

[2] FINK L H, LIOU K, LIU C C. From generic restoration actions to specific restoration strategies[J]. IEEE Trans on Power Systems, 1995, 10(2): 745-752.

[3] YE Hua, LIU Yutian. A new method for standing phase angle reduction in system restoration by incorporating load pickup as a control means[J]. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 2013, 53: 664-674.

[4] ANCONA J J. A framework for power system restoration following a major power failure [J]. IEEE Trans on Power Systems, 1995, 10(3): 1480-1485.

[5] 周云海, 闵勇, 杨滨. 黑启动及其决策支持系统[J]. 电力系统自动化, 2001, 25(15): 43-46.
ZHOU Yunhai, MIN Yong, YANG Bin. Decision support system for black-start [J]. Automation of Electric Power Systems, 2001, 25(15): 43-46.

[6] 高远望, 顾雪平, 刘艳, 等. 电力系统黑启动方案的自动生成与评估[J]. 电力系统自动化, 2004, 28(13): 50-54.
GAO Yuanwang, GU Xueping, LIU Yan, et al. Automatic derivation and assessment of power system black-start schemes [J]. Automation of Electric Power Systems, 2004, 28(13): 50-54.

[7] 林济铿, 蒋越梅, 郑卫洪, 等. 电力系统黑启动初始方案的自动形成[J]. 电力系统自动化, 2008, 32(2): 72-75.
LIN Jikeng, JIANG Yuemei, ZHENG Weihong, et al. Automatic establishment of the initial black start schemes for power systems [J]. Automation of Electric Power Systems, 2008, 32(2): 72-75.

[8] 王洪涛, 刘玉田. 基于 NSGA-II 的多目标输电网架最优重构[J]. 电力系统自动化, 2009, 33(23): 14-18.
WANG Hongtao, LIU Yutian. Multi-objective optimization of power system reconstruction based on NSGA-II [J]. Automation of Electric Power Systems, 2009, 33(23): 14-18.

[9] QU Hanbing, LIU Yutian. Maximizing restorable load amount for specific substation during system restoration [J]. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 2012, 43(1): 1213-1220.

[10] HAZARIKA D, SINHA A K. Power system restoration: planning and simulation[J]. International Journal of Electrical Power and Energy Systems, 2003, 25(3): 209-218.

[11] 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 Trans on Power Systems, 1990, 5(1): 162-168.

[12] SUN Wei, LIU C C, ZHANG Li. Optimal generator start-up strategy for bulk power system restoration[J]. IEEE Trans on Power Systems, 2011, 26(3): 1357-1366.

[13] 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.

[14] 刘艳, 刘国良, 顾雪平. 输电网架恢复方案线路投运风险评估[J]. 电力系统自动化, 2011, 35(13): 12-16.
LIU Yan, LIU Guoliang, GU Xueping. Line risk assessment in transmission network restoration schemes[J]. Automation of Electric Power Systems, 2011, 35(13): 12-16.

[15] 贺家李, 贺继红, 王小玲, 等. 发电机自励磁发生根源及其对特高压输电线运行的影响[J]. 电力系统自动化, 2011, 35(23): 52-58.
HE Jiali, HE Jihong, WANG Xiaoling, et al. Cause of generator self-excitation and its influences on operation of UHV transmission lines [J]. Automation of Electric Power Systems, 2011, 35(23): 52-58.

[16] 张建松, 何奔腾, 张雪松. 变压器衰减励磁涌流的实用计算方法[J]. 电力系统自动化, 2005, 29(12): 57-60.
ZHANG Jiansong, HE Benteng, ZHANG Xuesong. Approach to calculate attenuated magnetizing inrush current in transformer [J]. Automation of Electric Power Systems, 2005, 29(12): 57-60.

[17] 李钲, 乌云高娃, 刘涤尘, 等. Preisach 模型剩磁计算与抑制励磁涌流合闸角控制规律[J]. 电力系统自动化, 2006, 30(19): 37-41.
LI Po, WUYUN Gaowa, LIU Dichen, et al. Calculation of residual flux based on Preisach model and entering phase control of transformer to eliminate inrush current [J]. Automation of Electric Power Systems, 2006, 30(19): 37-41.

- [18] 瞿寒冰, 刘玉田. 计及暂态电压约束的负荷恢复能力快速计算[J]. 电力系统自动化, 2009, 33(15): 8-12.
QU Hanbing, LIU Yutian. Fast calculation of load restoration capability considering transient voltage constraint [J]. Automation of Electric Power Systems, 2009, 33(15): 8-12.
- [19] MATTHEW W, CARLYLE R, KEVIN W. Near shortest and k -shortest simple paths[J]. Networks, 2005, 46(2): 98-109.
- [20] 王增平, 李刚, 任建文. 基于前 K 最短路径的输电断面搜索新算法[J]. 电工技术学报, 2012, 27(4): 193-201.
WANG Zengping, LI Gang, REN Jianwen. A new search algorithm for transmission section based on K shortest paths [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2012, 27(4): 193-201.
- [21] 顾雪平, 钟慧荣, 贾京华, 等. 电力系统扩展黑启动方案的研究

[J]. 中国电机工程学报, 2011, 31(28): 25-32.

GU Xueping, ZHONG Huirong, JIA Jinghua, et al. Extended black-start schemes of power systems[J]. Proceedings of the CSEE, 2011, 31(28): 25-32.

朱海南(1987—), 男, 博士研究生, 主要研究方向: 电力系统恢复与控制。E-mail: hainanzhu@mail.sdu.edu.cn

刘玉田(1964—), 男, 通信作者, 教授, 博士生导师, 主要研究方向: 电力系统运行与控制。E-mail: liuyt@sdu.edu.cn

邱夕兆(1963—), 男, 高级工程师, 主要研究方向: 电网调度、运行。E-mail: qxz@luneng.com

(编辑 孔丽蓓)

Optimal Restoration Unit Selection Considering Success Rate During Black Start Stage

ZHU Hainan¹, LIU Yutian¹, QIU Xizhao²

(1. Key Laboratory of Power System Intelligent Dispatch and Control, Ministry of Education (Shandong University), Jinan 250061, China;

2. Shandong Electric Power Dispatch and Control Center, Jinan 250001, China)

Abstract: The primary task of making a black start plan is to select the to-be-restored unit. The main factors which have an impact on unit restoration are analyzed, especially the terminal voltage waveform distortion of black start unit caused by inrush current when no-load transformers are switched on. Based on the above analysis, the line weight, transformer weight and auxiliary motor weight are defined and the concept of success rate of unit restoration is proposed. The success rate of unit restoration and the capacity of units are considered to select the optimal to-be-restored unit during the black start stage. To reduce the computation burden, several units are selected as a candidate set, whose restoration paths are obtained by the algorithm of K -shortest paths. Simulation results of Shandong power grid show the effectiveness of the success rate of unit restoration and the rapidity of the proposed method.

This work is supported by National High Technology Research and Development Program of China (863 Program) (No. 2011AA05A118) and National Natural Science Foundation of China (No. 50877044).

Key words: power system restoration; inrush current; K -shortest paths; success rate of unit restoration

世界首个±500 kV 同塔双回直流工程开始送电

2013年10月12日,世界首个±500 kV 同塔双回直流工程,也是目前世界上±500 kV 最大容量直流输电工程——溪洛渡右岸电站送电广东同塔双回直流输电工程第一回极2投入试运行,开始向广东送电,最大输电容量1600 MW。该工程起于云南昭通换流站,止于广东从化换流站,线路全长 $2 \times 1\,286$ km,额定输送容量6400 MW,相当于广州市一半的用电负荷。该工程在世界上首次采用了同塔架设双回直流输电线路、双回直流共用接地板线路和接地板极址,可节约大量建设用地。该工程在国内首次采用了1035大截面新型导线穿越云贵高原重冰区,可有效防止覆冰对线路的影响。

【来源国家电力信息网】