

发电机组并行恢复动态决策的熵权方法

梁博森¹, 林振智¹, 文福拴¹, 叶琳²

(1. 浙江大学 电气工程学院, 浙江 杭州 310027;

2. 国网浙江省电力公司, 浙江 杭州 310007)

摘要: 采用并行恢复策略可以加快电力系统大停电后的恢复进程, 减少停电损失和社会影响。到目前为止, 电力系统并行恢复研究主要集中在分区策略和恢复方案评估与决策方面, 从全局层面研究并行恢复动态决策方法则鲜有报道。在此背景下, 研究了从整个发电机组恢复过程的角度制定最优恢复策略问题。首先, 根据各台发电机组的状态信息, 确定每个恢复供电方案中已恢复机组的出力能力和启动待恢复机组所需投入及其恢复对系统全局恢复的效益。然后, 建立基于熵权法的机组并行恢复动态优化决策的混合整数线性规划模型, 寻求互不冲突的恢复供电方案最优组合。所提出的模型考虑了各台发电机组的状态信息, 并能够协调恢复过程中不同机组间的需求冲突。新英格兰 10 机 39 节点系统验证了所提方法的可行性与有效性。

关键词: 电力系统; 恢复; 并行恢复; 动态策略; 熵权法; 混合整数线性规划; 停电

中图分类号: TM 732

文献标识码: A

DOI: 10.16081/j.issn.1006-6047.2015.05.019

0 引言

随着电力系统规模的增大和互联程度的提高, 电力系统运行面临着更多不确定因素^[1-6], 发生大规模停电事故的可能性依然存在, 因此有必要研究大停电后的系统恢复策略^[7-12]。可以首先把大停电后的电力系统划分为若干子区域, 然后对每个子区域根据其内的发电机组、线路和负荷状况制定相应的供电恢复方案, 并根据给定的评判标准和评估方法优选最优恢复方案。在供电恢复方案的评估方面, 现有文献中已经提出了一些方法^[13-15], 但一般假设每个恢复子区域中只有一台已恢复并具有发电能力的机组, 不具备通用性。此外, 现有的分区方法基本都是静态的, 一般只考虑了系统恢复开始时的系统状况, 而系统恢复过程是难以完全预先确定的, 如此确定的分区未必是最优的。

正如电力系统互联会带来备用效益等互联效益一样, 电力系统恢复过程中也可以利用系统规模可能带来的效益。文献^[16]提出了以系统总恢复容量最大为目标的系统全局恢复模型, 但没有考虑恢复过程中相关发电机组恢复所需容量、恢复后出力、爬坡速率、机组状态(温度等)、与已启动电源的电气距

离等因素的影响, 对系统恢复代价以及机组恢复时间成本也没有详细模拟。现有研究注重对所提出的黑启动方案进行评估, 如果将评估理念引入到黑启动方案生成过程中, 则有助于在可行域中搜索最优黑启动方案。而且, 将评估对象由整体的黑启动方案转变为恢复供电方案(指只包含 1 台供电机组和 1 台受电机组以及所供电力)的组合, 可以把并行恢复、多机对多机的供电转化为混合整数规划问题。

熵权法自 1854 年由法国物理学家 K. Clausius 提出以来^[17], 一直广泛应用于各个领域的决策研究中, 如地理灾害预测^[18-19]、计算机科学^[20]、环境评估^[21-22]等。对于电力系统恢复领域, 熵权法已被应用于区域电网的备选黑启动方案比较与决策, 并取得了良好的效果^[23]。通过研究熵权法的原理及效用, 将熵权法引入恢复决策, 可以对恢复方案进行更为综合的评估, 进而获得更好的恢复策略。

在此背景下, 本文初步探讨了供电恢复决策评估指标用以指导恢复决策, 提出了基于熵权法的电力系统恢复策略。首先描述各台发电机组的状态信息, 分析已恢复机组的出力能力和待恢复机组恢复所需投入以及其恢复对全局恢复的效益。之后, 建立所有可能的单机或多机恢复供电方案, 每个恢复供电方案中均描述一台已启动机组对待启动机组的供电, 并利用熵权法判别所有恢复供电方案的相对优劣, 为解决遴选过程中不同机组的需求冲突提供参考依据。最终的恢复策略由数个互不冲突的恢复方案构成, 本文以偏离度最小为目标, 考虑机组出力约束的情况下, 建立了机组并行恢复动态决策的混合整数线性规划(MILP)模型, 以协调恢复过程中不同机组间的需求冲突。最后, 用新英格兰 39 节点系统

收稿日期: 2014-02-19; 修回日期: 2014-12-26

基金项目: 国家高技术研究发展计划(863 计划)项目(2011AA-05A105); 国家自然科学基金资助项目(51007080, 51377005); 浙江省重点科技创新团队项目(2010R50004); 浙江省电力公司科技项目(5211011306TB)

Project supported by the National High Technology Research and Development Program of China(863 Program)(2011AA-05A105), the National Natural Science Foundation of China(51007080, 51377005), Zhejiang Key Science and Technology Innovation Group Program(2010R50004) and Project from State Grid Zhejiang Electric Power Corporation(5211011306TB)

对所提出的模型和策略进行了说明。

1 恢复决策问题简述

在电力系统恢复决策的问题中,对于每个恢复供电方案,为比较其对于电力系统恢复的弊益,首先需选取用于描述各台机组状态信息的指标,分析其对全局恢复的影响。从总体上而言,指标可分为效益型和成本型 2 类,其中效益型指标的值越大越好,成本型指标的值则越小越好。

1.1 已恢复机组的供应能力

对于已恢复供电机组,影响其对系统恢复贡献度的重要指标主要有 2 个:可供功率和向其他待恢复机组供电的困难程度(这里用这 2 台机组之间的开关设备数目表示)。设已恢复机组有 n 台,待恢复机组有 m 台,用 $P_i (i=1, 2, \dots, n)$ 表示已恢复机组 i 的可供功率, $N_{ij} (i=1, 2, \dots, n; j=1, 2, \dots, m)$ 表示从已恢复机组 i 到待恢复机组 j 之间的开关设备数目。

1.2 待恢复机组的出力能力(效益型指标)

在选取优先启动的待恢复机组时,需要考虑其出力能力以确保该机组的优先恢复对全局恢复最为有利。对于待恢复机组 j ,影响其对系统恢复贡献度的主要指标包括:机组状态 y_j 、恢复后可供功率 P_j 、机组爬坡率 a_j 。机组状态描述了机组的温度,即启动的难易程度,这里将其量化为 9 级,其中 1 表示极冷,3 表示冷,5 表示温热,7 表示热,9 表示极热。这些指标属于效益型的。

1.3 待恢复机组的需求(成本型指标)

在选取优先启动的待恢复机组时,也需要考虑其需求情况(即成本型指标)以确保现有恢复资源可以得到最有效利用。对于待恢复机组 j ,影响其系统恢复代价(成本)的主要指标包括:恢复所需功率 S_j 和到对其恢复供电的恢复机组 i 之间的开关设备数目 N_{ij} 。这些指标属于成本型的。需要指出,影响恢复路径的因素除了开关设备数目外,还有其他一些重要特性,如所经变电站的重要程度、线路容量等。作为一项初步的研究工作,本文暂时没有考虑与路径相关的其他重要特性,只考虑了开关设备数目对恢复路径的影响。不过,本文所构造的方法框架可以容纳对其他重要特性的考虑。另一方面,与路径相关的其他重要特性之间一般具有一定的耦合关系,如果要将这些作为评估指标,就需要对它们之间的耦合关系进行分析,以获得更为可靠的评估结果。如何适当考虑与路径相关的其他重要特性是值得研究的重要问题。

2 基于熵权法的并行恢复动态决策模型

2.1 熵权法

首先按照熵和熵权的概念对发电机组指标进行

标准化处理^[23]。

设恢复供电方案的组合数为 v ,且影响每个恢复供电方案的指标有 u 个,根据实际指标构建的评价矩阵为 $\mathbf{R}'$, r'_{cd} 表示第 d 个方案的第 c 个指标值,则:

$$\mathbf{R}' = [r'_{cd}]_{u \times v} \quad c=1, 2, \dots, u; d=1, 2, \dots, v \quad (1)$$

前已述及,指标可分为效益型和成本型 2 类。设 I_1 为效益型指标集合, I_2 为成本型指标集合,则可对 r'_{cd} 作如下的标准化处理:

$$r_{cd} = \begin{cases} \frac{r'_{cd} - \min_d \{r'_{cd}\}}{\max_d \{r'_{cd}\} - \min_d \{r'_{cd}\}} & c \in I_1 \\ \frac{\max_d \{r'_{cd}\} - r'_{cd}}{\max_d \{r'_{cd}\} - \min_d \{r'_{cd}\}} & c \in I_2 \end{cases} \quad (2)$$

然后,可按下面的定义 1 和 2 分别计算各指标的熵和熵权^[24]。

定义 1 在具有 u 个评价指标和 v 个待评价方案的决策问题中,第 c 个评价指标的熵 H_c 定义为:

$$H_c = -k \sum_{d=1}^v f_{cd} \ln f_{cd} \quad c=1, 2, \dots, u \quad (3)$$

其中, $f_{cd} = \frac{r_{cd}}{\sum_{d=1}^v r_{cd}}$, $k = \frac{1}{\ln v}$ 。若 $f_{cd}=0$,则设 $f_{cd} \ln f_{cd}=0$ 。

定义 2 在具有 u 个评价指标和 v 个待评价方案的决策问题中,第 c 个评价指标的熵权 w_c 定义为:

$$w_c = \frac{1 - H_c}{u - \sum_{c=1}^u H_c} \quad (4)$$

在对方案进行评价时,通过综合考虑主观的专家权重和客观的熵权确定最终的权重系数 λ_c 。假设根据专家经验确定的主观权重为 E_c ,则:

$$\lambda_c = \frac{E_c w_c}{\sum_{c=1}^u E_c w_c} \quad (5)$$

主观专家权重在很多评估预测领域得到应用,其相关研究成果包括主观权重误差的抑制以及其偏差或波动对评估结果的影响等。在权重确定过程中可以借助直觉模糊距离判据获得符合一致性的专家评估值^[25],也可以通过检测等方法完善专家评估结果^[26]。主观专家权重的波动会对优化结果产生影响;文献[23,25]的研究表明,采用适当的处理方法可以有效抑制主观专家权重的失真和偏颇。总之,采用主观权重与客观熵权相结合的方法可以得到更切合实际的评价结果。

2.2 基于熵权法的并行恢复动态决策模型

电力系统大停电后的恢复策略可分为串行和并行两大类。其中,串行恢复策略指待恢复机组依先后顺序启动和恢复出力的方式,决策和实施过程相对简单,恢复过程同时占用的资源较少,恢复过程中维

持系统安全和稳定的压力较小,但恢复过程所需时间较长。并行恢复策略则指多台待启动机组可以同时启动和恢复出力的方式,其可以有效提升系统恢复速度,减少停电损失,但恢复过程同时占用的资源较多,恢复过程中维持系统安全和稳定的压力较大。这里提出将组合优化思想应用于并行恢复策略的确定。此外,为了协调满足不同待恢复机组的电力需求和系统稳定约束,本文在生成、设计恢复方案的过程中引入了评估方法,以实现恢复资源的优化配置。现有评估方法一般适用于对已有方案进行比较,对于方案的生成过程则关注较少。本文将熵权法用于方案生成过程,通过评估各个供电恢复方案,最终得到供电恢复方案的最优组合,即最终的并行恢复供电方案。

设共有 v 个已恢复供电机组向待供电机组的恢复供电方案,则 $v=mn$ 。在每个恢复供电方案中,已恢复机组的主要信息为可供功率,主要用于计算其他指标,因此可不计入到影响指标中。待恢复机组的影响指标分为效益型和成本型 2 类:效益型指标包括恢复后可供功率、机组爬坡速率和机组状态;成本型指标则包括恢复所需功率和到向其提供恢复所需电力的已恢复机组的开关设备数目。为使熵权法适用于可行恢复方案的遴选和并行恢复方案的生成,这里引入 2 个新的评价指标,即指标占用比 p_{ij} 和反占比 q_{ij} ,用于反映每个恢复供电方案中待启动机组 j 对启动资源(即已恢复机组 i)的占用率。 p_{ij} 和 q_{ij} 的定义为:

$$p_{ij}=\frac{S_j}{P_i} \quad S_j \leq P_i \tag{6}$$

$$q_{ij}=\frac{P_i}{S_j} \quad S_j > P_i \tag{7}$$

p_{ij} 和 q_{ij} 用于反映已恢复机组向待恢复机组供电的能力。若 $S_j \leq P_i$,则表明该已恢复机组有能力满足待恢复机组的供电需求, p_{ij} 反映了向待恢复机组 j 的供电需求占已恢复机组 i 的发电容量的比例;若 $S_j > P_i$,则表明该已恢复机组无法独立承担待恢复机组的恢复供电需求, q_{ij} 反映了对待恢复机组 j 的发电容量中已恢复机组 i 可以承担的比例。

然后,将所有恢复供电方案分成 2 组:单机恢复供电组和非单机恢复供电组。设有 f_1 个单机恢复供电方案和 f_2 个非单机恢复供电方案,则 $f_1+f_2=v$ 。恢复供电方案的所有评价(影响)指标如表 1 所示。

$\mathbf{R}'_1=[r'_{cd}]_{u \times f_1} (c=1,2,\cdots,u; d=1,2,\cdots,f_1)$ 。对每个指标采用式(2)进行标准化处理后可得到评价矩阵 $\mathbf{R}_1=[r_{cd}]_{u \times f_1}$ 。在表 1 中,恢复供电方案序号、供电机组、受电机组、供电机组可供功率属于恢复方案的基本信息;占用比 p_{ij} 作为参考信息;其余指标值

表 1 所有恢复供电方案的指标集合

Table 1 Index sets of all candidate restoration schemes

方案	基本信息		指标	
	参数名称	参量	参数名称	参量
单机恢复 供电方案 (共 f_1 个)	方案序号	d	恢复后可供功率	P_{jd}
	供电机组	i_d	爬坡速率	a_{jd}
	受电机组	j_d	恢复所需容量	S_{jd}
	供电机组可供功率	P_{i_d}	机组状态	y_{jd}
			开关设备数目	$N_{i_{ajd}}$
			占用比	$P_{i_{ajd}}$
非单机恢复 供电方案 (共 f_2 个)	方案序号	d	恢复后可供功率	P_{jd}
	供电机组	i_d	爬坡速率	a_{jd}
	受电机组	j_d	恢复所需容量	S_{jd}
	供电机组可供功率	P_{i_d}	机组状态	y_{jd}
			开关设备数目	$N_{i_{ajd}}$
			反占比	$q_{i_{ajd}}$

经标准化后得到的 r_{cd} 均取 0~1 之间的值,且其值与其他恢复供电方案有关。然后,可以利用熵权法对恢复供电方案进行优劣排序,主要步骤如下^[19]。

a. 对标准化处理后的 $\mathbf{R}_1$ 赋予权重,得到加权评价矩阵 $\mathbf{B}_x, \mathbf{B}_x=[b_{cd}]_{u \times f_1}=[\lambda_c r_{cd}]_{u \times f_1}$ 。

b. 定义理想点为所有指标取值最好时所对应的状态,而所有指标取最差值时所对应的状态为负理想点。理想点用 $\mathbf{G}^*=[g_1^*, g_2^*, \cdots, g_c^*, \cdots, g_u^*]^T$ 表示。由于指标经过式(2)的标准化处理后,每个指标的最差值均为 0,因此其负理想点 $\mathbf{G}_0=0$ 。

c. 设参加评价的恢复方案到理想点 $\mathbf{G}^*$ 的距离为 l_d^* ,其与理想点的偏离度为 T_d ,则:

$$l_d^*=\sqrt{\sum_{c=1}^u (b_{cd}-g_c^*)^2} \quad d=1,2,\cdots,f_1 \tag{8}$$

$$T_d=\frac{(\mathbf{G}^*-\mathbf{O}_d)^T(\mathbf{G}^*-\mathbf{G}_0)}{\|\mathbf{G}^*-\mathbf{G}_0\|^2}=1-\frac{\mathbf{O}_d^T\mathbf{G}^*}{\|\mathbf{G}^*\|^2}=1-\frac{\sum_{c=1}^u b_{cd}g_c^*}{\sum_{c=1}^u (g_c^*)^2} \tag{9}$$

其中, $\mathbf{O}_d=[b_{1d}, b_{2d}, \cdots, b_{ud}]^T (d=1,2,\cdots,f_1)$; $T_d \in [0,1]$ 。

d. 根据计算得到的 T_d 值对各恢复方案进行排序,其值越小,则该方案偏离理想点越小,表明该供电恢复方案越靠近理想点。如果有 2 个或多个恢复方案的 T_d 值相等,则对这些恢复方案到理想点 $\mathbf{G}^*$ 的距离 l_d^* 进行比较,距离越小则说明该恢复供电方案距离理想点越近,故该方案较优。

这样,可得到如表 2 所示的基于熵权法的单机恢复供电方案的参数集合。

在充分利用已有启动容量的前提下,应尽量优先安排 T_d 值较小的恢复方案,以尽快恢复尽可能多的发电容量。本文构造的并行恢复决策方法可以描述为组合优化问题,各子方案的 T_d 值即为其在目标函数中的权重系数。通过求解该组合优化问题,可

表 2 基于熵权法的单机恢复供电方案相关参数

Table 2 Parameters of single-unit black-start scheme based on entropy weight theory

参数名称	参量	参数名称	参量
方案序号	D	占用比	$P_{i_{adj}}$
供电机组	i_d	偏离度	T_{ld}
受电机组	j_d	偏离距离	l_{ld}^*
供电机组可供功率	P_{i_d}		

以有效避免并行恢复过程中的资源需求冲突,从而得到协调优化的并行恢复供电方案。设 $x_1(d)(d=1, 2, \dots, f_1)$ 为 0-1 决策变量,取 1 和 0 分别表示采用和不采用此方案。设 $E(z_1, z_2)$ 为判别 z_1 和 z_2 是否相等的函数,若 $z_1=z_2$ 则 $E(z_1, z_2)=1$; 否则取 0。这样,确定最优并行恢复供电方案问题在数学上可描述为:

$$\min \sum_{d=1}^{f_1} x_1(d) T_{ld} + (1 - g_i) P_{i_d} \tag{10}$$

$$\text{s.t. } g_i = \sum_{d=1}^{f_1} x_1(d) p_{i_{adj}} E(i, i_d) \leq 1 \quad i=1, 2, \dots, n \tag{11}$$

$$\sum_{d=1}^{f_1} x_1(d) E(j, j_d) \in \Omega \quad \Omega = \{0, 1\} \quad \forall j=1, 2, \dots, m \tag{12}$$

当存在多种并行恢复供电方案组合的目标函数值相同时,则将目标函数替换为后备目标函数 $\sum_{d=1}^{f_1} x_1(d) l_{ld}^*$ 进行计算,选取最小者为最优方案。在选定好最优并行恢复方案后,若 $g_i < 1 (\forall i=1, 2, \dots, n)$ 或者该最优并行恢复供电方案中已恢复机组的总剩余启动容量(即除去单机恢复供电方案所消耗的启动功率后系统内剩余的启动容量)不足以启动任意一台待恢复机组,则最终决策方案即为单机恢复供电分组中优化得到的恢复方案组合;否则,需要考虑多台机组共同供电给其他待恢复机组的情形。

考虑到单机恢复供电方案组合中所占用的启动容量,将已启动机组的发电容量信息替换为已启动机组的剩余启动容量;然后,剔除在单机恢复方案中已得到恢复供电的机组,重新生成非单机恢复供电分组,得到该分组更新后的标准化评估矩阵 $R'_2 = [r'_{cd}]_{f'_2 \times l}(c=1, 2, \dots, f'_2; d=1, 2, \dots, l)$ 。

然后,重新计算得到 T_{2d} 和 l_{2d}^* 。这样,可列出非单机恢复供电分组内恢复供电方案的主要参数,如表 3 所示。

表 3 基于熵权法的非单机恢复供电方案的相关参数

Table 3 Parameters of multi-unit black-start scheme based on entropy weight theory

参数名称	参量	参数名称	参量
方案序号	d	反占比(更新)	$q_{i_{adj}}$
供电机组	i_d	偏离度	T_{2d}
受电机组	j_d	偏离距离	l_{2d}^*
供电机组可供功率(更新)	P'_{i_d}		

设 $x_2(d)(d=1, 2, \dots, f'_2)$ 为 0~1 之间的连续变量,其取值为 0 时表示不采用此方案,取值在 (0, 1] 之间时表示采用此方案,且调用的功率占供电机组总功率的比例为 $x_2(d)$,即供电机组可供功率为 P'_{i_d} ,实际供电功率为 $x_2(d)P'_{i_d}$ 。在这种情形下,确定机组最优并行恢复方案问题可描述为:

$$\min \sum_{d=1}^{f'_2} x_2(d) T_{2d} \tag{13}$$

$$\text{s.t. } \sum_{d=1}^{f'_2} x_2(d) E(i, i_d) \leq 1 \quad i=1, 2, \dots, n \tag{14}$$

$$\sum_{d=1}^{f'_2} x_2(d) q_{i_{adj}} E(j, j_d) \in \Omega \quad \Omega = \{0, 1\} \quad \forall j=1, 2, \dots, m \tag{15}$$

基于熵权法建立上述优化模型后,首先确定单机最优并行恢复供电方案,如果仍有启动功率剩余,则更新机组信息并确定非单机并行恢复供电方案。其中,单机和非单机的并行恢复方案均是一系列供电方案的有机组合,在不发生资源占用冲突的情况下可以得到最优供电方案组合,即得到并行恢复的供电方案。确定单机最优并行恢复供电方案属于 MILP 问题,而确定非单机最优并行恢复供电方案则为线性规划问题。可把并行恢复决策描述为优化问题,并采用成熟而高效的商业求解器 Gurobi 求解^[27]。

在对实际电力系统进行并行恢复动态决策时,可能需要多次调用上述优化模型。在某一步的恢复策略实施后,相关机组和电力网络的状态会发生变化。如果系统中还有待恢复机组,则需要再次调用上述优化模型,确定系统状态更新后的发电机组恢复策略,直到所有机组都被恢复为止。

3 算例与结果

采用图 1 所示的新英格兰 10 机 39 节点系统,

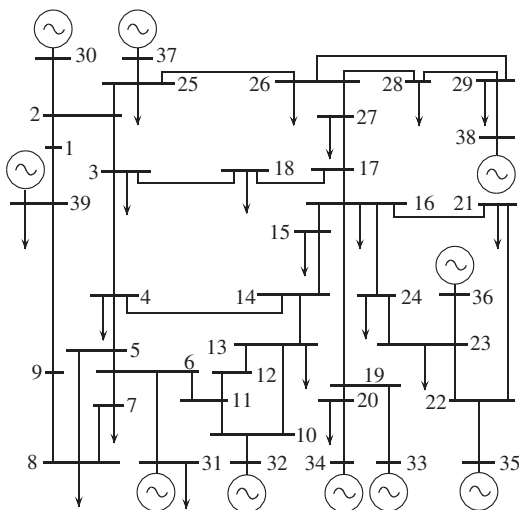


图 1 新英格兰 10 机 39 节点系统

Fig.1 New England 10-unit 39-bus power system

来说明所提出的并行恢复策略。假设每个发电节点只有 1 台发电机组,发电机组的具体参数如表 4 所示。假设各条输电线路的恢复时间相同,则可以通过最短路径算法求解得到恢复供电方案中 2 台机组之间的开关设备数目,其结果列于表 5。假定大停电事故发生后位于节点 30 和 33 的机组已快速恢复,可为其他机组恢复提供电力。

表 4 各发电机组参数
Table 4 Parameters of generator sets

节点	有功容量/MW	爬坡率/(MW·h ⁻¹)	机组状态	启动所需功率/MW
30	50.00	108	运行中	0
31	1 145.55	186	1	66
32	150.00	144	5	45
33	150.00	144	运行中	0
34	660.00	132	3	24
35	750.00	150	5	45
36	660.00	132	7	40
37	640.00	138	3	38
38	930.00	156	7	56
39	1 100.00	168	9	64

针对该系统的网络结构和发电机组情况,可将恢复供电方案分为 2 组,即单机和多机恢复供电方案。计算得到单机供电恢复方案组内各指标的熵权为[0.1082,0.3155,0.0979,0.1063,0.3720]^T。假设专家对各个指标赋予的权重为[0.200,0.300,0.100,0.150,0.250]^T,则按式(5)计算可以得到综合权重系数为[0.0921,0.4027,0.0417,0.0679,0.3957]^T。候选的单机恢复供电方案如表 6 所示。

针对表 6 列出的候选恢复方案,采用式(10)—(12)所描述的优化模型,可求得最优单机恢复供电方案组合为 $x=[1,0,0,0,0,1,0,0,1,0,1,0,0]^T$ 。这样,恢复供电方案为:机组 30 向机组 32 供电;机组 33 向机组 31、35 和 37 供电。此外,可得机组 30 和 33 的剩余启动容量分别为 5 MW 和 1.05 MW。由于这 2 台机组的总剩余容量只有 6.05 MW,不足以启

表 6 候选的单机供电恢复方案
Table 6 Candidate single-unit black-start restoration schemes

方案	供电机组	受电机组	供电机组可供功率/MW	占用比/%	偏离度	偏离距离
1	30	32	50	90.0	0.7888	0.4565
2	30	34	50	48.0	0.9719	0.5672
3	30	35	50	90.0	0.8131	0.4812
4	30	36	50	80.0	0.9745	0.5670
5	30	37	50	76.0	0.4535	0.3630
6	33	31	150	44.0	0.4884	0.4036
7	33	32	150	30.0	0.7886	0.4565
8	33	34	150	16.0	0.5024	0.4064
9	33	35	150	30.0	0.5315	0.3163
10	33	36	150	26.7	0.6929	0.4359
11	33	37	150	25.3	0.8291	0.4817
12	33	38	150	37.3	0.6629	0.3917
13	33	39	150	42.7	0.6458	0.4228

动其他待恢复机组,此时就不存在多机恢复供电方案。

在当前阶段选定的目标机组得到恢复并输出功率后,就着手下一阶段的恢复决策。在当前阶段的恢复方案完成后,电力系统状态会发生变化,因此在下一步恢复方案决策前需对电力系统状态进行更新。此时,已恢复机组为 30、31、32、33、35 和 37,待恢复机组为 34、36、38 和 39。由于多台机组已经恢复运行,因此在第二轮恢复过程中可以恢复所有待恢复机组。针对更新后的发电机组和电力系统状态信息,可求得所有恢复供电方案,表 7 给出了结合占用比指标筛选得到的单机最优恢复供电方案。计算可得单机恢复供电方案组的各个指标的熵权为[0.3139,0.3105,0.1297,0.1555,0.0905]^T。假设专家对各个指标赋予的权重仍为[0.200,0.300,0.100,0.150,0.250]^T,根据式(5)可得在该策略下综合权重系数为[0.2922,0.4336,0.0604,0.1085,0.1053]^T。候选的单机恢复供电方案如表 8 所示。

针对表 8 列出的候选恢复方案,采用式(10)—

表 5 单机恢复方案
Table 5 Single-unit black-start restoration schemes

方案	供电机组	受电机组	供电机组可供功率/MW	恢复后可供功率/MW	爬坡率/(MW·h ⁻¹)	恢复所需容量/MW	机组状态	开关设备数目(开关个数)	占用比/%
1	30	32	50	750.00	144	45	5	7	90.0
2	30	34	50	660.00	132	24	3	8	48.0
3	30	35	50	750.00	150	45	5	8	90.0
4	30	36	50	660.00	132	40	7	8	80.0
5	30	37	50	640.00	138	38	3	3	76.0
6	33	31	150	1 145.55	186	66	1	8	44.0
7	33	32	150	750.00	144	45	5	7	30.0
8	33	34	150	660.00	132	24	3	3	16.0
9	33	35	150	750.00	150	45	5	5	30.0
10	33	36	150	660.00	132	40	7	5	26.7
11	33	37	150	640.00	138	38	3	7	25.3
12	33	38	150	930.00	156	56	7	7	37.3
13	33	39	150	1 100.00	168	64	9	8	42.7

表 7 状态更新后的单机恢复方案
Table 7 Single-unit black-start schemes after statuses updated

方案	供电 机组	受电 机组	供电机组可 供功率/MW	恢复后可 供功率/MW	爬坡率/ (MW·h ⁻¹)	机组 状态	恢复所需 容量/MW	开关设备数目 (开关个数)	占用比/%
1	30	34	50.00	660.00	132	3	24	8	48.000
2	30	36	50.00	660.00	132	7	40	8	80.000
3	31	34	1145.55	660.00	132	3	24	9	2.095
4	31	36	1145.55	640.00	132	7	40	9	3.492
5	31	38	1145.55	930.00	156	7	56	9	4.888
6	31	39	1145.55	1100.00	168	9	64	5	5.587
7	32	34	150.00	1145.55	132	3	24	8	16.000
8	32	36	150.00	750.00	132	7	40	8	26.667
9	32	38	150.00	660.00	156	7	56	10	37.333
10	32	39	150.00	750.00	168	9	64	7	42.667
11	33	34	150.00	660.00	132	3	24	3	16.000
12	33	36	150.00	640.00	132	7	40	5	26.667
13	33	38	150.00	930.00	156	7	56	7	37.333
14	33	39	150.00	1100.00	168	9	64	8	42.667
15	35	34	750.00	660.00	132	3	24	6	3.200
16	35	36	750.00	640.00	132	7	40	3	5.333
17	35	38	750.00	930.00	156	7	56	8	7.467
18	35	39	750.00	1100.00	168	9	64	9	8.533
19	37	34	640.00	660.00	132	3	24	8	3.750
20	37	36	640.00	640.00	132	7	40	8	6.250
21	37	38	640.00	930.00	156	7	56	4	8.750
22	37	39	640.00	1100.00	168	9	64	4	10.000

表 8 状态更新后的单机恢复供电方案
Table 8 Single-unit black-start schemes after
statuses updated

方案	供电 机组	受电 机组	供电机组可 供功率/MW	占用比/%	偏离度	偏离距离
1	30	34	50.00	48.000	0.9501	0.5317
2	30	36	50.00	80.000	0.9578	0.5304
3	31	34	1145.55	2.095	0.9554	0.5340
4	31	36	1145.55	3.492	0.9630	0.5327
5	31	38	1145.55	4.888	0.3861	0.2230
6	31	39	1145.55	5.587	0.0498	0.1126
7	32	34	150.00	16.000	0.9501	0.5317
8	32	36	150.00	26.667	0.9578	0.5304
9	32	38	150.00	37.333	0.3914	0.2295
10	32	39	150.00	42.667	0.0604	0.1241
11	33	34	150.00	16.000	0.9237	0.5263
12	33	36	150.00	26.667	0.9419	0.5259
13	33	38	150.00	37.333	0.3756	0.2126
14	33	39	150.00	42.667	0.0657	0.1321
15	35	34	750.00	3.200	0.9396	0.5282
16	35	36	750.00	5.333	0.9313	0.5250
17	35	38	750.00	7.467	0.3808	0.2173
18	35	39	750.00	8.533	0.0710	0.1412
19	37	34	640.00	3.750	0.9501	0.5317
20	37	36	640.00	6.250	0.9578	0.5304
21	37	38	640.00	8.750	0.3597	0.2045
22	37	39	640.00	10.000	0.0446	0.1096

(12)所描述的优化模型,可求得最优单机恢复供电方案组合为 $\mathbf{x}=[0,0,0,0,0,1,0,0,0,0,1,0,1,0,0,1,0,0,0,0,0]^T$ 。这样,恢复供电方案为:机组 31 向机组 39 供电;机组 33 向机组 34 供电;机组 33 向机组 38 供电;机组 35 向机组 36 供电。所有发电机组均得到了恢复。

4 结语

针对发电机组并行恢复动态决策问题,本文首先讨论了已恢复机组的供应能力和待恢复机组的状态出力能力与需求。在此基础上,以恢复全部发电机组为目标提出了基于熵权法的并行恢复优化策略的 MILP 模型。最后,用新英格兰 10 机 39 节点系统说明了所提并行恢复策略的可行性与有效性。

参考文献:

[1] 薛禹胜. 综合防御由偶然故障演化为电力灾难——北美“8.14”大停电的警示[J]. 电力系统自动化,2003,27(18):1-5,37.
XUE Yusheng. The way from a simple contingency to system-wide disaster—lessons from the Eastern Interconnection blackout in 2003[J]. Automation of Electric Power Systems,2003,27(18):1-5,37.

[2] 陈向宜,陈允平,李春艳,等. 构建大电网安全防御体系——欧洲大停电事故的分析及思考[J]. 电力系统自动化,2007,31(1):4-8.
CHEN Xiangyi,CHEN Yunping,LI Chunyan,et al. Constructing wide-area security defensive system in bulk power grid—a pondering over the large-scale blackout in the European power grid on November 4[J]. Automation of Electric Power Systems,2007,31(1):4-8.

[3] 郭永基. 加强电力系统可靠性的研究和应用——北美东部大停电的思考[J]. 电力系统自动化,2003,27(19):1-5.
GUO Yongji. To focus on improving power system reliability—a pondering over the east north-America major blackout[J]. Automation of Electric Power Systems,2003,27(19):1-5.

[4] 李斌,袁越. 光伏并网发电对保护及重合闸的影响与对策[J]. 电力自动化设备,2013,33(4):12-17,23.
LI Bin,YUAN Yue. Impact of grid-connected photovoltaic power

- generation on protection and reclose, and its countermeasures[J]. Electric Power Automation Equipment, 2013, 33(4): 12-17, 23.
- [5] 曹一家, 曹丽华, 李勇, 等. 考虑大停电风险的多阶段电网扩展规划方法[J]. 电力自动化设备, 2014, 34(6): 1-7.
- CAO Yijia, CAO Lihua, LI Yong, et al. Multi-stage transmission expansion planning with consideration of large-area outage risk[J]. Electric Power Automation Equipment, 2014, 34(6): 1-7.
- [6] 陈仕龙, 束洪春, 甄颖. 云广特高压直流输电负极运行换相失败及控制研究[J]. 电力自动化设备, 2013, 33(6): 128-133.
- CHEN Shilong, SHU Hongchun, ZHEN Ying. Commutation failure of Yun-Guang UHVDC transmission system running in negative pole state and its control measures[J]. Electric Power Automation Equipment, 2013, 33(6): 128-133.
- [7] 顾雪平, 韩忠晖, 梁海平. 电力系统大停电后系统分区恢复的优化算法[J]. 中国电机工程学报, 2009, 29(13): 8-15.
- GU Xueping, HAN Zhonghui, LIANG Haiping. Optimization of parallel restoration through power system partitioning after blackout[J]. Proceedings of the CSEE, 2009, 29(13): 8-15.
- [8] 赵炜炜, 张建华, 尚敬福, 等. 电网大面积停电应急评价指标体系及其应用[J]. 电力系统自动化, 2008, 32(20): 27-31.
- ZHAO Weiwei, ZHANG Jianhua, SHANG Jingfu, et al. Power system large scale blackout emergency evaluation index system and its application[J]. Automation of Electric Power Systems, 2008, 32(20): 27-31.
- [9] 韩忠晖, 顾雪平, 刘艳. 考虑机组启动时限的大停电后初期恢复路径优化[J]. 中国电机工程学报, 2009, 29(4): 21-26.
- HAN Zhonghui, GU Xueping, LIU Yan. Optimization of restoration paths considering unit start-up time requirements at early stage of power system restoration[J]. Proceedings of the CSEE, 2009, 29(4): 21-26.
- [10] 孟强, 牟龙华, 许旭峰, 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.
- [11] 陈亮, 顾雪平, 贾京华. 考虑后续恢复影响的扩展黑启动方案多目标优化与决策[J]. 电力自动化设备, 2014, 34(2): 137-143, 150.
- CHEN Liang, GU Xueping, JIA Jinghua. Multi-objective optimization and decision making of extended black-start scheme considering subsequent restoration influence[J]. Electric Power Automation Equipment, 2014, 34(2): 137-143, 150.
- [12] 李从善, 刘天琪, 李兴源. 停电应急预案快速匹配与智能生成方法[J]. 电力自动化设备, 2014, 34(1): 32-36, 42.
- LI Congshan, LIU Tianqi, LI Xingyuan. Fast matching of power outage event and intelligent generation of power recovery plan[J]. Electric Power Automation Equipment, 2014, 34(1): 32-36, 42.
- [13] LIU C C, LIOU K L, CHU R F, et al. Generation capability dispatch for bulk power system restoration: a knowledge-based approach[J]. IEEE Trans on Power Systems, 1993, 8(1): 316-325.
- [14] WANG C, VITTAL V, SUN K. OBDD-based sectionalizing strategies for parallel power system restoration[J]. IEEE Trans on Power Systems, 2011, 26(3): 1426-1433.
- [15] LIU W J, LIN Z Z, WEN F S, et al. Intuitionistic fuzzy Choquet integral operator-based approach for black-start decision-making[J]. IET Generation Transmission & Distribution, 2012, 6(5): 378-386.
- [16] SUN W, LIU C C, LI Z. Optimal generator start-up strategy for bulk power system restoration[J]. IEEE Trans on Power Systems, 2011, 26(3): 1357-1366.
- [17] COIFMAN R R, WICKERHAUSER M V. Entropy-based algorithms for best basis selection[J]. IEEE Trans on Information Theory, 1992, 38(2): 713-718.
- [18] LI J L, HE Z Y, ZHU Q L. An entropy-based weighted concept lattice for merging multi-source geo-ontologies[J]. Entropy, 2013, 15(6): 2303-2318.
- [19] GE H, HUANG Z P, WANG Y T, et al. Application of fuzzy optimization model based on entropy weight in typical flood hydrograph selection[J]. Journal of Hydrologic Engineering, 2013, 18(11): 1400-1407.
- [20] DENG Z H, CHOI K S, CHUNG F L, et al. EEW-SC: enhanced entropy-weighting subspace clustering for high dimensional gene expression data clustering analysis[J]. Applied Soft Computing, 2011, 11(8): 4798-4806.
- [21] YU C, ZHANG B X, YAO Y, et al. A field demonstration of the entropy-weighted fuzzy DRASTIC method for groundwater vulnerability assessment[J]. Hydrological Sciences Journal, 2012, 57(7): 1420-1432.
- [22] LI X G, WEI X, HUANG Q. Comprehensive entropy weight observability-controllability risk analysis and its application to water resource decision-making[J]. Water SA, 2012, 38(4): 573-579.
- [23] 林振智, 文福拴, 薛禹胜. 黑启动决策中指标值和指标权重的灵敏度分析[J]. 电力系统自动化, 2009, 33(9): 20-25.
- LIN Zhenzhi, WEN Fushuan, XUE Yusheng. Sensitivity analysis on the values and weights of indices in power system black-start decision-making[J]. Automation of Electric Power Systems, 2009, 33(9): 20-25.
- [24] LIN Z Z, WEN F S, HUANG J S, et al. Evaluation of black-start schemes employing entropy weight-based decision-making theory[J]. Journal of Energy Engineering, 2010, 136(2): 42-49.
- [25] 刘伟佳, 林振智, 文福拴, 等. 基于直觉模糊距离的黑启动群体决策一致性分析与优化[J]. 电力系统自动化, 2012, 36(10): 1-6, 32.
- LIU Weijia, LIN Zhenzhi, WEN Fushuan, et al. Consistency analysis and optimization of black-start group decision-making based on intuitionistic fuzzy distance[J]. Automation of Electric Power Systems, 2012, 36(10): 1-6, 32.
- [26] WANG C, BIER V M. Expert elicitation of adversary preferences using ordinal judgment[J]. Operations Research, 2013, 61(2): 372-385.
- [27] WERBOS L, KOZMA R, SILVA-LUGO R, et al. Metamodeling and the critic-based approach to multi-level optimization[J]. Neural Networks, 2012, 32(8): 179-185.

作者简介:



梁博森(1989—),女,辽宁抚顺人,硕士研究生,主要研究方向为电力应急与电力系统恢复(E-mail: bomiao.liang@gmail.com);

林振智(1979—),男,福建莆田人,副教授,博士,主要研究方向为电力应急与电力系统恢复(E-mail: zhenzhi.lin@gmail.com);

文福拴(1965—),男,河南林州人,教授,博士研究生导师,主要研究方向为电力系统故障诊断与系统恢复、电力经济与电力市场、智能电网与电动汽车(E-mail: fushuan.wen@gmail.com)。

(下转第159页 continued on page 159)

Power source with low-voltage ride-through capability for auxiliary equipment inverter of thermal power plant

WANG Xiaoyu¹,ZHANG Tao²,LIU Shu²,CAO Fengmei²,LIU Zhichao²,YANG Qixun^{1,2}

(1. State Key Lab of New Energy Power System,North China Electric Power University,Beijing 102206,China;
2. Beijing Sifang Automation Co.,Ltd.,Beijing 100085,China)

Abstract: Since the low-voltage protection of auxiliary equipment inverter may trip the equipment due to bus voltage sag,leading to the unscheduled unit shutdown of thermal power plant,a power source with low-voltage ride-through capability based on the power electronic devices is designed for the passive inverter. Its main circuit consists of an AC-DC converter based on the triple parallel interleaving Boost circuit with reduced inductor current and capacitor voltage ripple,a three-phase AC bypass channel with high reliability and a single-phase AC power source for control. A method of fast grid-voltage-sag detection and multiple operating modes are proposed according to its topology. A strategy of single-neuron adaptive PI control with the square output error as its performance index is adopted to facilitate the control parameter setting and site commissioning. The results of electromagnetic transient simulation,field test and actual application show that,the designed device has better dynamic and static output characteristics and effective low-voltage ride-through capability.

Key words: thermal power plant; electric inverters; low-voltage ride-through; electric power supplies to apparatus; grid voltage sag; single-neuron PI; neural networks

(上接第 125 页 continued from page 125)

Dynamic strategy based on entropy weight theory for parallel restoration of generators

LIANG Bomiao¹,LIN Zhenzhi¹,WEN Fushuan¹,YE Lin²

(1. College of Electrical Engineering,Zhejiang University,Hangzhou 310027,China;
2. State Grid Zhejiang Electric Power Corporation,Hangzhou 310007,China)

Abstract: The parallel restoration can accelerate the restoration from serious blackout and reduce the outage loss and social impact. The researches of parallel restoration are normally focused on the sectionalizing strategies and restoration scheme evaluation while the study of dynamic parallel restoration strategy at a global level is not found. The optimal restoration strategy is developed with the consideration of whole generator sets. The output power of restored units,the input power needed for restoring the candidate unit and its contribution to the global system restoration are analyzed first according to the status information of generators for each restoration scheme. A mixed integer linear programming model is then built based on the entropy weight theory for the dynamic optimization and decision-making of parallel generators restoration and the optimal combination of restoration schemes without conflicts is obtained. The proposed model fully considers the status information of every generator and appropriately coordinates the power demands among generators. The feasibility and effectiveness of the proposed method is verified by New England 10-unit 39-bus power system.

Key words: electric power systems; restoration; parallel restoration; dynamic strategy; entropy weight theory; MILP; outages