

基于目标规划的网架重构路径优化方法

刘 艳, 高 倩, 顾雪平

(华北电力大学电气与电子工程学院, 河北省保定市 071003)

摘要: 大停电后的网架重构需要在保证系统运行安全的约束下尽快恢复机组出力, 合理的路径恢复顺序对提高重构效果意义重大。文中提出了一种基于目标规划的网架重构路径优化方法。该方法以重构时间和机组出力恢复程度作为评价重构效果的主要因素, 在为二者确定合理目标值的基础上, 建立了体现各目标相对重要性及综合目标偏差最小的目标规划模型。针对 IEEE 30 节点系统的应用结果说明, 该方法能够利用不同优化目标间的不相容性, 所获得的路径恢复顺序以目标值为基础, 最大限度地体现了恢复决策的侧重点, 对于指导恢复操作更具现实意义。

关键词: 大停电; 网架重构; 路径优化; 目标规划; 交叉粒子群算法

0 引言

电力系统发生大停电后的恢复过程通常要经历黑启动、网架重构和负荷恢复 3 个阶段^[1-2]。其中, 网架重构阶段需要充分利用黑启动阶段已经恢复的发电容量, 通过依次启动重要机组及投入主要输电线路逐步建立稳定的系统网架, 为负荷的全面恢复奠定基础。在系统电源多数为火电机组的情况下, 决定网架重构速度的主要因素是机组的恢复时间, 而其又将受到由重构总目标和重构路径顺序决定的停机时间的极大影响。因此, 研究合理、可行的网架重构策略对于加快恢复进程、减小停电损失具有十分重要的意义。

目前, 对于网架重构策略的研究主要集中在重构目标网架的确定和重构路径顺序优化两方面。文献[3]采用节点收缩后的网络凝聚度定量评价网络中电源和负荷的重要性, 以此为基础构建目标骨架网。文献[4]采用离散粒子群优化算法, 以重要负荷恢复量占已恢复负荷总量的比例最高为目标构建目标网架。文献[5]将网架重构分为“串行”和“并行”2 个阶段, 并给出了相应的送电路径寻优算法。文献[6]充分考虑了电力系统分层调度的特点, 通过建立分布式恢复的主从递阶决策模型来满足系统大面积停电后分层分区恢复协调调度决策的需要。文献[7]综合考虑了重构时间、机组出力及负荷恢复程度 3 个因素, 通过这 3 个因素的组合, 构造重构效率指标, 以效率最大为目标进行优化。文献[8]综合考虑目标网架的确定和节点恢复顺序的优化, 通过将机组启动时间限制引入节点恢复顺序优化过程增强恢复方案的实用性。文献[9]引入加权复杂网络模型

中衡量网络枢纽性的介数指标, 对恢复路径进行优化。上述方法在建立网架重构优化模型的过程中, 需要将多个优化目标整合为单一目标函数, 因此很容易忽略不同目标之间优化方向不同甚至相互矛盾的问题。针对这一点, 文献[10]引入了带精英策略的快速非支配排序遗传算法 NSGA-II 求解多目标输电网架重构模型, 以避免求解过程的目标偏好性。

网架重构过程涉及大量元件, 协调关系复杂, 属于多目标、多约束的非线性优化问题, 不同优化目标之间的不相容性客观存在, 应予以重视并对其加以利用。因此, 区分不同目标的重要程度, 在满足系统运行安全约束的同时, 明确不同优化目标应该达到的基本要求, 以有针对性地降低对次要目标的优化要求为代价, 最大限度地提高对主要目标的优化效果, 不失为一种降低重构方案在执行过程中协调难度的替代思路。针对这一问题, 本文提出了一种基于目标规划的网架重构路径优化方法。该方法以重构时间和机组出力恢复程度作为评价重构效果的主要因素, 在为两因素确定合理的目标值的基础上, 建立了综合目标偏差最小的目标规划模型。采用交叉粒子群算法对模型求解获得的网架重构路径顺序虽然不是绝对意义上的最优解, 但由于其最大限度地贴近目标值, 体现决策的优化侧重点, 因此对于指导恢复操作更具现实意义。

1 基于目标规划的重构路径优化模型

1.1 重构路径优化基本思想^[8]

网架重构的目标是尽快恢复机组出力并重建主要网架, 其重点在于优先恢复电源及个别重要负荷节点, 统称为目标节点。若调度人员根据经验事先指定目标节点的恢复顺序, 则重构路径优化仅需根据重构效果评价指标找出与此相对应的路径恢复顺

序。由于所指定的目标节点恢复顺序并未经过优化,因此得到的通常为网架重构的局部最优恢复顺序。为了改进重构效果,重构路径优化需要对目标节点恢复顺序及与之对应的路径恢复顺序同时进行优化,通过对不同目标节点恢复顺序下的局部最优恢复顺序的重构效果加以比较,得到最终的全局最优恢复顺序。

1.2 基于目标规划的重构路径优化

1.2.1 目标规划简介

目标规划最早由 Charnes 和 Cooper 提出,是多目标优化问题的一个特殊的妥协模型。在多目标决策问题中,假设决策者对每一个目标设计了一个目标值,其基本思想是极小化各目标函数与目标值的偏差(正偏差、负偏差或正负偏差)。

在实际问题中,一个目标通常只有在牺牲另一些目标的情况下才能实现,而这些目标一般是不相容的。因此,在这些不相容的目标之间,根据其重要性,建立一个优先级并按照这个优先级为所有目标排序,尽可能地实现更多的目标。为了平衡多个冲突目标,根据决策者的目标值和优先结构,一些实际问题可以建模为目标规划模型。目标规划的一般形式如下^[11]:

$$\begin{cases} \min \sum_{j=1}^P p_j \sum_{i=1}^M (u_{ij}d_i^+ + v_{ij}d_i^-) \\ \text{s. t. } f_i(x) + d_i^- - d_i^+ = b_i & i = 1, 2, \dots, M \\ g_j(x) \leq 0 & j = 1, 2, \dots, P \\ d_i^-, d_i^+ \geq 0 & i = 1, 2, \dots, M \end{cases} \quad (1)$$

式中: p_j 为各目标相对重要性的权重因子; u_{ij} 和 v_{ij} 分别为对应优先因子 j 第 i 个目标正、负偏差的权重因子; d_i^+ 和 d_i^- 分别为目标 i 偏离目标值 b_i 的正、负偏差; f_i 为目标约束中的函数,共有 M 个目标约束; g_j 为系统约束中的函数,共有 P 个系统约束。

1.2.2 重构路径优化目标规划模型

在电源组成多为火发电机组的系统中,合理利用机组的启动时限,使尽可能多的机组较快恢复出力是加快重构速度的重要保证。同时,随着机组和线路的逐步投运,为了稳定运行,还需要优先恢复部分重要负荷。虽然此时系统的整体负荷水平较低,但机组出力的恢复程度可在一定程度上反映出重构效果的差异。因此,如何在尽可能短的时间内有效地恢复机组出力成为网架重构阶段的主要目标。由于不同系统在停电后可用的电源和网络的具体恢复条件不同,所期望的多个优化目标往往难以同时实现。因此,有必要结合系统实际区分其相对重要性,确定各自可行的目标值。若将重构时间和机组出力恢复程度作为优化目标,并以 T_g 和 W_g 作为预期重构时

间和预期机组出力恢复程度,则两目标可表示为:

$$\begin{cases} T_m + d_1^- - d_1^+ = T_g \\ \frac{W_m}{W_0} + d_2^- - d_2^+ = W_g \end{cases} \quad (2)$$

式中: T_m 为网络重构恢复时间; W_m 为在重构阶段所恢复的机组出力总和; W_0 为停电前系统中的机组出力总和; d_1^+ 和 d_1^- 分别为实际重构时间与预期重构时间 T_g 之间的正、负偏差; d_2^+ 和 d_2^- 分别为机组出力恢复程度的实际值与预期值 W_g 之间的正、负偏差。

实际重构过程中,总期望重构时间尽可能短,发电量尽可能大,即必须极大化 $d_1^- - d_1^+$,极小化 $d_2^- - d_2^+$ 。因此,在满足系统运行安全约束的前提下,建立如下重构路径优化的目标规划模型:

$$\begin{cases} \min \{ p_1(d_1^+ - d_1^-) + p_2\alpha(d_2^- - d_2^+) \} \\ \text{s. t. } T_m + d_1^- - d_1^+ = T_g \\ \frac{W_m}{W_0} + d_2^- - d_2^+ = W_g \\ P_{Gm}^{\min} \leq P_{Gm} \leq P_{Gm}^{\max} & m = 1, 2, \dots, N_G \\ Q_{Gm}^{\min} \leq Q_{Gm} \leq Q_{Gm}^{\max} & m = 1, 2, \dots, N_G \\ V_n^{\min} \leq V_n \leq V_n^{\max} & n = 1, 2, \dots, N \\ P_{lk} \leq P_{lk}^{\max} & k = 1, 2, \dots, K \\ d_x^-, d_x^+ \geq 0 & x = 1, 2 \end{cases} \quad (3)$$

式中: p_1 和 p_2 分别为与重构时间、机组出力恢复程度 2 个目标相对应的权重因子; α 为调节因子,防止由于 2 个目标偏差取值范围不同而出现的数值湮没现象; P_{Gm} 和 Q_{Gm} 分别为发电机节点 m 的有功、无功出力; N_G 为已恢复的发电机节点数; V_n 为节点 n 的电压; N 为已恢复的节点总数; P_{lk} 为支路 k 上流过的有功功率; K 为已恢复的线路总数。

2 基于目标规划的重构路径优化算法

2.1 算法描述

采用目标规划方法对重构路径进行优化,能够根据与不同优化目标相对应的目标值及权重逐步调整优化进程,其优化结果是以目标值为基准的相对最优。依据网架重构的总体目标,重构路径优化包括 2 个层次,即目标节点顺序优化及恢复每一个目标节点的阶段路径顺序优化^[8],其优化效果将会以不同优化目标的偏差量之和的形式加以集中体现。由于目标节点顺序优化是确定阶段路径顺序的基础,控制着整个优化过程的走向,因此,在该层次上使用如式(3)所示的重构路径优化的目标规划模型,并采用交叉粒子群算法求解。同时,采用 Dijkstra 算法求解针对某一确定目标节点的最优阶段路径顺序。

2.1.1 基于交叉粒子群算法的目标节点顺序优化

粒子群优化算法是一种智能全局优化算法。该算法在初始化过程中生成一组随机解(粒子),然后通过迭代找到最优解。在每一次迭代中,粒子通过跟踪个体极值 p_{best} 和全局极值 g_{best} 进行更新。其中, p_{best} 是粒子本身所找到的最优解,而 g_{best} 是整个种群目前找到的最优解。文献[12]将遗传算法中的交叉操作引入经典的粒子群算法,提出了交叉粒子群算法:让当前解与个体极值和全局极值分别作交叉操作,产生的解为新的位置。本文采用的交叉方法如下。假设有两父串 $s_1:1\ 2\ 3\ 4\ 5\ 6\ 7\ 8\ 9, s_2:9\ 8\ 7\ 6\ 5\ 4\ 3\ 2\ 1$,在 s_2 中随机选择一个交叉区域 c 为 $6\ 5\ 4\ 3$;将交叉区域 c 加到 s_1 前面并删除 s_1 中已在 c 中出现过的数字,则交叉后的新串 $s_n:6\ 5\ 4\ 3\ 1\ 2\ 7\ 8\ 9$ 。这里,粒子初始化为不同的目标节点恢复顺序,指导粒子进行迭代更新的适应度函数为式(3)中的目标函数,即

$$F = \min\{p_1(d_1^+ - d_1^-) + p_2\alpha(d_2^- - d_2^+)\} \quad (4)$$

2.1.2 基于 Dijkstra 算法的阶段路径顺序优化

在对重构路径进行优化的过程中,利用交叉粒子群算法初始化或迭代生成不同的目标节点恢复顺序后,还必须根据已恢复网络的情况和当前待恢复目标节点的位置优化确定具体的路径恢复先后顺序,即阶段路径顺序。为此,本文采用基于网络拓扑和线路权值的最短路算法——Dijkstra 算法进行寻优。其中,线路权值以综合反映充电风险和操作代价的线路恢复时间表示^[13],黑启动初期形成的两机并列小系统可视为广义机组节点 V_0 ,作为阶段路径顺序优化的起点。该算法的思想为:首先从网络中选取具有最小 $D[x]$ 的点 x , $D[x]$ 为从起点到某一点 x 的距离,然后把 x 放在集合 U 中,设 $L(x, y)$ 为点 x 到点 y 的距离,对所有经过点 x 而与起点相通的点 y ,如果存在 $D[y] > D[x] + L(x, y)$,则将原路径值 $D[y]$ 调整为 $D[x] + L(x, y)$,重复此过程直到所有的点全部进入集合 U 。

2.2 重构路径优化目标值的确定

利用目标规划方法对重构路径进行优化的过程中,阶段路径顺序寻优的结果最终要集中体现在目标节点恢复顺序优化的适应度函数中。因此,确定各优化目标的目标值,进而求取其正、负偏差将是决定最终优化结果的关键。在实际网架恢复过程中,调度人员可根据运行经验确定较为符合实际的重构时间目标和机组出力恢复程度目标。从研究角度出发,本文构造了如式(5)所示的反映恢复时间和机组出力恢复程度的目标函数,并采用与前述重构路径优化相同的过程,进行了大量运算统计。结果表明,

重构时间和机组出力均大致分布在某个区间范围上,取该区间统计值的算术平均值作为各自的目标值,供重构路径优化的目标规划模型使用。

$$\begin{cases} S = \min T_m \left(\frac{W_m}{W_0} \right)^{-1} \\ \text{s. t. } P_{Gm}^{\min} \leq P_{Gm} \leq P_{Gm}^{\max} & m = 1, 2, \dots, N_G \\ Q_{Gm}^{\min} \leq Q_{Gm} \leq Q_{Gm}^{\max} & m = 1, 2, \dots, N_G \\ V_n^{\min} \leq V_n \leq V_n^{\max} & n = 1, 2, \dots, N \\ P_{lk} \leq P_{lk}^{\max} & k = 1, 2, \dots, K \end{cases} \quad (5)$$

2.3 算法流程

基于目标规划的重构路径优化算法流程如图 1 所示。

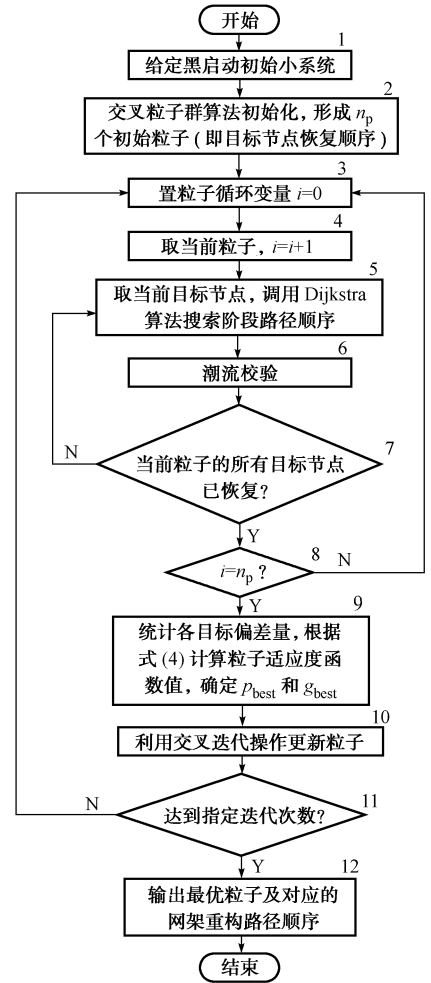


图 1 基于目标规划的重构路径优化算法流程
Fig. 1 Flow of restoration sequence optimization algorithm based on goal programming

其中,目标规划模型着重体现在步骤 9 中,即目标偏差量统计及与式(4)对应的粒子适应度函数的计算。需要指出的是,目标偏差量统计是以确定的目标值为基础的。如 2.2 节所述,本文求取目标值的过程与图 1 基本一致,只是步骤 9 与步骤 12 的任

务不同。其中:步骤 9 以式(5)中的目标函数作为适应度函数,确定个体极值 p_{best} 和全局极值 g_{best} ;步骤 12 输出与各粒子相对应的恢复时间和机组出力,取其各自的算术平均值作为目标值。

3 算例分析

为验证本文方法的有效性,采用 IEEE 30 节点系统进行测试。系统接线如图 2 所示,包含 30 个节点和 41 条支路。假设在黑启动阶段已形成由电源节点 1、节点 2 及其间线路组成的初始小系统。网络重构的目标为:选择合理的线路投入顺序,尽快恢复其他电源节点出力并形成基本网架。重构过程将涉及到机组的陆续启动和负荷的逐步接入,过程较为复杂。本文采用文献[7]的处理方法:机组按照预制的升负荷速率进行负荷分配,负荷每次的投入量为当前系统容量的 5%;同时,还需确保每步恢复操作满足系统运行的安全约束。

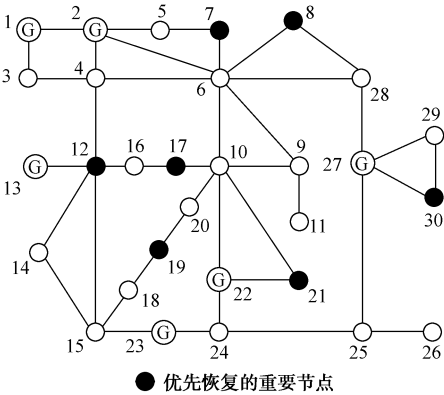


图 2 IEEE 30 节点系统
Fig. 2 IEEE 30 power system

首先,计算重构时间和机组出力恢复程度的目标值。利用图 1 所示的流程,根据 2.3 节所述,调整步骤 9 和步骤 12 的操作任务,粒子总数为 10,最大迭代次数分别为 90,120,160。得到的结果为:重构时间集中分布在[317 min,322 min],机组出力恢复程度集中分布在[32.0%,36.2%],且该趋势随迭代次数的增加越发明显。最终以最大迭代步数为 160 次时的运行结果为基础,取分布于上述区间的统计值的算术平均值,即重构时间目标值 $T_g=319\text{ min}$,机组出力恢复程度目标值 $W_g=34\%$ 。

进一步,利用图 1 所示的流程对重构恢复的路径顺序进行优化。结合式(4),调节系数 α 取为 100,分别对重构时间目标和机组出力恢复程度目标施以不同的权重。设置最大迭代次数为 100,在粒子数分别为 10,30,50 的情况下,程序在运行 70 次、66 次、60 次时收敛。其中,在粒子数为 10 的情况下

适应度函数取值最优。具体优化效果如表 1 所示,与其对应的恢复顺序如表 2 所示。

表 1 基于目标规划的网架重构路径优化效果
Table 1 Effect of restoration sequence optimization based on goal programming

目标权重取值	重构时间/min	机组出力恢复程度/(%)
$p_1=0.7, p_2=0.3$	316.8	32.8
$p_1=0.3, p_2=0.7$	323.9	36.5

表 2 不同决策侧重下的恢复顺序比较
Table 2 Comparison of restoration sequence achieved from different decision preference

恢复次序	恢复顺序	
	侧重时间 ($p_1=0.7, p_2=0.3$)	侧重出力恢复程度 ($p_1=0.3, p_2=0.7$)
1	1-2	1-2
2	2-4-12-13	2-4-12-13
3	12-16-17	12-15-23
4	2-6-7	2-6-7
5	6-8	23-24-22
6	17-10-22	22-21
7	22-21	21-10-17
8	22-24-23	10-20-19
9	10-20-19	6-28-27
10	8-28-27	28-8
11	27-30	27-30

表 2 给出的恢复顺序表明,侧重重构时间目标时,恢复时会优先选择充电风险和操作代价较小的线路。例如:在恢复电源节点 23 时,采用顺序 22-24-23 将优于 12-15-23。当更加关注机组出力恢复程度时,恢复顺序将会在适当提高恢复代价的情况下,尽快恢复电源节点,特别是停电前出力较大的电源节点,如电源节点 23。

同时,本文还记录了利用式(5)求取目标值过程中所获得的最优方案的恢复效果,即重构时间为 317.5 min,机组出力恢复程度为 37%。该结果是在将多个目标整合为单一目标函数的基础上获得的。通过与表 1 数据综合比较显示:重构时间和机组出力恢复程度这 2 个优化目标确实具有一定程度的不相容性,很难同时实现。正是针对这一现状,目标规划方法能够根据决策的倾向性,通过设定权重,保证在降低次要目标实现效果的同时,最大限度地实现主要目标。同时,预先确定的目标值使得优化结果将在一定范围内变化,减少了与期望效果偏差较大的恢复方案出现的概率。

4 结语

本文提出了一种基于目标规划的网架重构路径优化方法。该方法在明确重构过程主要任务的基础

上,构建出反映各目标相对重要性及与目标值偏差量之和最小的重构路径优化目标规划模型。采用 IEEE 30 节点系统的验证结果说明:该方法通过合理利用优化目标间的不相容性获得了满足不同优化要求的路径顺序。其中,各优化目标的目标值和权重的选取是应用该方法的关键,就实际系统而言,这 2 个参数的确定有赖于调度人员的系统运行经验和对具体恢复条件的把握。为了增强重构方案的可操作性,必须将数学优化方法和调度经验有机地结合起来,本文方法为在优化网架重构路径的过程中有针对性地融入调度运行经验提供了一种新的思路和手段。

参 考 文 献

- [1] FINK L H, LION K L, LIU C C. From generic restoration to specific restoration strategies. *IEEE Trans on Power Systems*, 1995, 10(2): 745-752.
- [2] ANCONA J J. A framework for power system restoration following a major power failure. *IEEE Trans on Power Systems*, 1995, 9(3): 1480-1485.
- [3] 刘艳,顾雪平. 基于节点重要度评价的骨架网络重构. *中国电机工程学报*, 2007, 27(10): 20-27.
LIU Yan, GU Xueping. Node importance assessment based skeleton network reconfiguration. *Proceedings of the CSEE*, 2007, 27(10): 20-27.
- [4] 魏智博,刘艳,顾雪平. 基于 DPSO 算法以负荷恢复为目标的网络重构. *电力系统自动化*, 2007, 31(1): 38-42.
WEI Zhibo, LIU Yan, GU Xueping. DPSO algorithm based network reconfiguration of power systems for maximizing load recovery efficiency. *Automation of Electric Power Systems*, 2007, 31(1): 38-42.
- [5] 周云海,闵勇. 恢复控制中的系统重构优化算法研究. *中国电机工程学报*, 2003, 23(4): 67-70.
ZHOU Yunhai, MIN Yong. Optimal algorithm for system reconstruction. *Proceedings of the CSEE*, 2003, 23(4): 67-70.
- [6] 王洪涛,刘玉田,邱夕兆,等. 基于多 Agent 的电力系统主从递阶恢复决策. *电力系统自动化*, 2006, 30(15): 5-9.
WANG Hongtao, LIU Yutian, QIU Xizhao, et al. Multi-agent

- based stackelberg decision for power system restoration. *Automation of Electric Power Systems*, 2006, 30(15): 5-9.
- [7] 刘连志,顾雪平,刘艳. 不同黑启动方案下电网重构效率的评估. *电力系统自动化*, 2009, 33(5): 24-28.
LIU Lianzhi, GU Xueping, LIU Yan. Investigation on the efficiencies of power system reconfiguration with different black-start schemes. *Automation of Electric Power Systems*, 2009, 33(5): 24-28.
 - [8] 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. *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. *Proceedings of the CSEE*, 2009, 29(4): 21-26.
 - [9] 林振智,文福拴. 基于加权复杂网络模型的恢复路径优化方法. *电力系统自动化*, 2009, 33(6): 11-15.
LIN Zhenzhi, WEN Fushuan. A new optimization method for determining restoration paths based on weighted complex network model. *Automation of Electric Power Systems*, 2009, 33(6): 11-15.
 - [10] 王洪涛,刘玉田. 基于 NSGA-II 的多目标输电网架最优重构. *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. *Automation of Electric Power Systems*, 2009, 33(23): 14-18.
 - [11] 刘宝碇,赵瑞清. *随机规划与模糊规划*. 北京:清华大学出版社, 1998.
 - [12] 高尚,杨静宇. *群智能算法及其应用*. 北京:中国水利水电出版社, 2006.
 - [13] 韩忠晖. 电力系统大停电后初期恢复算法的研究[D]. 保定:华北电力大学, 2007.

刘 艳(1973—),女,通信作者,博士,副教授,主要研究方向:电力系统安全防御和系统恢复、智能技术在电力系统中的应用. E-mail: bd_ly@263.net

高 倩(1983—),女,硕士研究生,主要研究方向:电力系统安全防御和系统恢复。

顾雪平(1964—),男,博士,教授,博士生导师,主要研究方向:电力系统安全稳定评估与控制、电力系统安全防御和系统恢复、智能技术在电力系统中的应用。

Optimization of Restoration Sequence of Network Based on Goal Programming

LIU Yan, GAO Qian, GU Xueping

(North China Electric Power University, Baoding 071003, China)

Abstract: After large-scale blackout, it is of great significance for effective network reconfiguration to formulate a rational restoration sequence under the constraint of ensuring system operation security to restore the output of units as quickly as possible. A method for network reconfiguration and sequence optimization based on goal programming is proposed with the duration of reconfiguration and the restoration of units output as the main items for evaluation of the effects of reconfiguration. Furthermore, a model of goal programming is developed that takes into account different weights of sub-goals and the sum of total differences in target values. The application to an IEEE 30 power system shows that the method can make full use of the incompatibility of different objectives to most emphatically bring out the decision preference regarding target values.

Key words: large-scale blackout; network reconfiguration; optimization of restoration sequence; goal programming; cross PSO