

# 电力系统负荷恢复控制协调优化策略

方涛<sup>1</sup>, 刘俊勇<sup>1</sup>, 李宏亮<sup>2</sup>, 李杨<sup>1</sup>, 李勇<sup>1</sup>, 杨旭昕<sup>1</sup>

(1. 四川大学电气信息学院, 四川 成都 610065; 2. 宁夏电力公司, 宁夏 银川 750001)

**摘要:** 就黑启动最后阶段的负荷恢复问题, 以全局恢复量最大为目标, 计及负荷投载后系统暂态约束, 构建了一种新的最优负荷恢复模型。通常依据发电侧调节能力增加一定的出力进行优化分配, 缺乏对系统物理特性和运行工况的考虑, 所增加量不一定是实际可恢复的最大量。提出在负荷侧求取最大可恢复量, 同时将原动机响应特性用于算法初始化, 提高寻优效率。所提方法对所有待恢复负荷进行编码, 全局搜索, 动态校验, 能够协调系统暂态约束、可恢复负荷量与位置以及寻优速度三方面的要求, 较好地解决了负荷恢复这一“技术—空间—时间”的多维问题。以 IEEE-30 节点测试系统为算例模型, 验证了该方法的有效性。

**关键词:** 负荷恢复量; 负荷建模; 暂态约束; 负荷分布; 系统工况

## Harmonious optimal strategies of power system load restoration control

FANG Tao<sup>1</sup>, LIU Jun-yong<sup>1</sup>, LI Hong-liang<sup>2</sup>, LI Yang<sup>1</sup>, LI Yong<sup>1</sup>, YANG Xu-xin<sup>1</sup>

(1. School of Electrical Engineering and Information, Sichuan University, Chengdu 610065, China; 2. Ningxia Electric Power Company, Yinchuan 750001, China)

**Abstract:** Regarding to the load restoration problem during the last stage of blackout, a new optimal load restoration model is established aiming at the maximum restoration quantity and considering transient constraints after the load pickup. The usual method is to optimize the distribution of a certain amount, which is confirmed by the system generation capability, the issue of system physical characteristic and operation condition are not involved, and the calculation amount may not be the max amount actually. This paper presents a way to obtain max restoration amount at the load side, in addition, turbine governor responsive function is used to initialize arithmetic programs, so the computing efficiency is improved. All the load nodes that need to restore can be coded, searched entirely and tested dynamically by using the proposed method. It also can coordinate the transient constraints, restoration quantity and distribution and computing efficiency, so it preferably solves the “technic-space-time” three-dimension problem. Simulation results on IEEE-30 test system show the effectiveness of the method.

This work is supported by Special Fund of the National Basic Research Program of China (973) (No.2004CB217905).

**Key words:** load restoration quantity; power load modeling; transient constraints; load distribution; system operation condition

中图分类号: TM76 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2010)16-0018-06

## 0 引言

恢复控制是坚强电网生命力的最后保障, 特别在当前“智能电网”背景下, 电网恢复效率、故障反应速度等方面的研究面临着新的挑战。负荷恢复是电网恢复控制的最后一个阶段, 该阶段的智能控制是实现系统恢复最终目标的关键步骤<sup>[1]</sup>。负荷投载会引起系统电磁暂态和机电暂态过程。负荷量过大, 发电机需要相应增加无功出力, 系统 PV 节点可能转换为 PQ 节点, 即发电机不再具有电压调节

能力, 引起系统变压崩溃; 同时, 负荷的不平衡会造成频率越线。负荷量过小, 延长系统恢复时间, 降低恢复效率。如何在确定工况下快速、合理选择被恢复负荷是负荷恢复的核心问题, 需要解决的主要问题包括负荷投入过程中各种约束指标的模拟。

负荷恢复问题需求解负荷恢复最大量, 具有多维数、非线性、多变量、多约束等特点, 目前多将智能方法和数值优化算法结合起来求解。文献[2]研究了负荷的快速恢复在线算法, 求解系统稳态频率并进行灵敏度分析。文献[3-4]用改进的遗传算法求解最优负荷分配, 没有考虑负荷分布情况, 所恢复量不一定是系统最大可恢复量。文献[5]结合粒子群算法求解了考虑冷负荷特性的负荷恢复问题, 计及

**基金项目:** 国家重点基础研究发展计划(973 项目)(2004CB217905)

了冷负荷特性对系统恢复的影响。文献[6]计及系统的暂态电压约束, 将单个变电站的恢复问题抽象为一维非线性多约束问题, 提出用二分法快速计算单次变电站最大可恢复量。

负荷恢复控制传统方法是根据经验或是系统中发电机爬坡能力确定某一恢复量, 在负荷侧进行优化分配<sup>[7-8]</sup>。这样的方法难以顾及网络拓扑结构以及负荷在网络中的分布等因素, 估计量不一定是系统当前可恢复最大量, 该方法可操作性亦值得商榷。本文将待恢复负荷进行编码, 在负荷侧寻优, 结合约束条件校验求解当前最大可恢复量的求解策略。所构建模型以恢复的负荷量最大为目标, 计及潮流约束与系统动态稳定约束, 力求规避负荷投载后暂态冲击造成的风险。利用发电侧出力调节能力优化寻优初始点, 提高计算效率。所提方法能够较好地兼顾所求解问题的快速性和精确性要求。

## 1 负荷恢复优化建模

### 1.1 数学建模

#### 1.1.1 目标函数

以当前系统工况下可恢复的负荷总量为优化目标, 优化问题的目标函数定义为:

$$\max \sum_i^n l_i r_i a_i \quad (1)$$

式中:  $l_i$  为负荷  $i$  的负荷量;  $r_i$  为相应的负荷权重;  $a_i$  为负荷  $i$  的投载状态, 取 0 表示不可恢复, 取 1 表示可以投载;  $n$  是待恢复负荷的数量。

#### 1.1.2 潮流约束

电力系统负荷恢复, 首先要满足恢复后系统的稳态约束条件:

$$F(C, U) = 0 \quad (2)$$

$$G(C, U) < 0 \quad (3)$$

式(2)为系统一般的潮流方程, 式(3)包括系统频率的上下限、发电机的有功、无功输出范围、节点电压上下限、线路功率传输极限等。

#### 1.1.3 暂态约束

负荷投载是一个电磁暂态和机电暂态混合过程, 此过程中系统机理可描述为:

$$p \dot{x} = f(x, y) \quad (4)$$

$$\dot{i} \begin{pmatrix} x \\ \dot{v} \end{pmatrix} = Y \dot{v} \quad (5)$$

式(4)代表发电机以及感应电动机等设备元件方程。式(5)为节点导纳矩阵表示的网络方程,  $\dot{i}$   $\dot{v}$  分别为各节点注入电流相量和节点电压相量;  $Y$  是网络节点导纳矩阵。求解式(4)、(5)得出系统状态变量的

时域响应方程。

本文集中起来用一个不等式来定义暂态约束条件:

$$\begin{cases} V_{\min} \leq V(t) \leq V_{\max} \\ \omega_{\min} \leq \omega(t) \leq \omega_{\max} \end{cases} \quad (6)$$

其中:  $V(t)$ 、 $\omega(t)$  表示投载引起暂态过程中各母线电压和发电机转速关于时间  $t$  的函数矩阵, 也可用若干条曲线表示, 所有的恢复方案都进行动态校验。

### 1.2 负荷建模

负荷机理不同会导致投载后系统状态变量波动程度差异。按模型数学表达方式, 可将电力系统负荷分为静态负荷和动态负荷两种。前者用多项式或是幂函数等方式描述负荷功率与端电压及频率关系; 后者在系统电压和频率快速变化时, 用微分方程描述负荷的动态过程。

#### 1.2.1 静态负荷建模

对于机电暂态过程, 静态负荷模型可以用于负荷以静态成分为主, 负荷影响较小的节点<sup>[9]</sup>。本文中用静态等值模型模拟已恢复负荷。

#### 1.2.2 动态负荷建模

电动机是电力系统负荷主要成分, 感应电机模型是目前故障程序中常用负荷模型<sup>[9]</sup>。一方面, 异步电机的启动对电压要求严格, 其启动转矩与电压的平方成正比, 启动转矩为额定转矩 1~2 倍。另一方面, 异步电机的启动电流是额定电流的 5~7 倍, 会加剧输电线路阻抗压降。本文电动机模型采用 3 阶的机电暂态模型。

静态 ZIP 负荷模型会加剧系统的频率跌落; 动态负荷模型会恶化系统电压稳定性<sup>[10]</sup>。为降低决策和分析的风险性, 本文采用不同负荷模型或参数进行仿真, 所投载负荷采用静态 ZIP 模型、冷负荷模型和感应电动机模型相组合的形式, 其中 30% 的负荷采用静态 ZIP 模型, 其余采用感应电动机模型。

### 1.3 原动机系统建模

电力系统负荷恢复分阶段完成, 发电机需要不断调整出力, 为下一次负荷投入做准备。因此, 需要对发电机调速系统、爬坡能力进行建模。

本文中发电机调速系统机理如式(7):

$$T_{\text{mech}} = \begin{cases} T_{\text{mech}}^* & T_{\min} < T_{\text{mech}}^* < T_{\max} \\ T_{\max} & T_{\max} < T_{\text{mech}}^* \\ T_{\min} & T_{\text{mech}}^* < T_{\min} \end{cases} \quad (7)$$

式中:  $T_{\text{mech}}$  是原动机实际出力;  $T_{\min}$ 、 $T_{\max}$  是原动机系统出力上下限;  $T_{\text{mech}}^*$  是调速系统控制信号; 该信号根据转子转速调整, 如式(8)。

$$T_{mech}^* = t_g + K(\omega_{ref} - \omega) + T_{mech0} \quad (8)$$

其中： $\omega_{ref}$ 和 $\omega$ 是转速参考输入和主反馈信号； $t_g$ 是原动机出力给定值； $T_{mech0}$ 是调速系统扰动信号。

本文算例中，发电机采用考虑的 $q$ 轴上阻尼绕组暂态过程的4阶模型。

负荷投载之后，原动机调速系统、发电机出力都处于变化过程中，是一个电磁暂态和机电暂态共存的复杂过程。

## 2 模型求解

### 2.1 优化寻优初始点

文献[11]研究了恢复阶段机组各不同部分的线性模型，该模型能够在系统恢复阶段快速计算系统的频率响应，如式(9)：

$$P_{limit} = P_{l1} - \frac{(P_{l1} - P_{l2})}{(f_{l1} - f_{l2})}(f_{limit} - f_{l2}) \quad (9)$$

式中： $P_{limit}$ 为当前系统可安全恢复最大负荷量； $P_{l1}$ 、 $P_{l2}$ 任意两个恢复量； $f_{l1}$ 、 $f_{l2}$ 是按照上述量恢复后系统的最低频率值； $f_{limit}$ 是规定的系统最低频率值。

本文提出以下计算方法：首先按照式(9)求解系统可恢复最大值，生成寻优空间，如图1区域B。

图1中，区域A表示所有待恢复负荷的任意组合，区域B和C为其子集；B表示不同工况下，以公式(9)计算结果为总量，待恢复负荷任意组合；C表示不同工况下系统的最优解，包括各待恢复负荷投载量与位置分布。对应到某一种运行方式下，所求解为区域C中的一点。

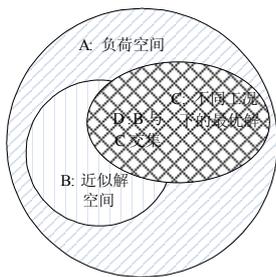


图1 不同工况下的解集

Fig.1 Strategy volume under different operation conditions

### 2.2 利用 TSP 问题求解当前最优解

在某一确定的工况下，第一阶段计算结果对应为B中某一点集，当其于D相交时，交集是系统当前的最大恢复量；否则这一量只是近似最大量，接近真实值，但可以利用其生成初始解寻优，提高寻

优速度。第二阶段优化就是从这一点集中的某点出发，找到全局最优解在C中对应点。

至此，原先优化问题可以抽象为一个TSP问题。给每一个待恢复负荷赋以位置编码和状态编码，位置编码依次累加，状态编码采用二进制编码，如图2，某一固定位置上负荷量一定。

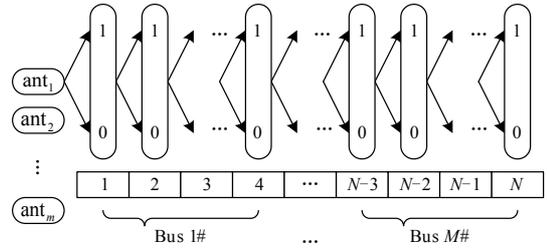


图2 负荷状态与遍历路径

Fig.2 Load connection status and ergodic path

本文利用蚁群算法全局正反馈搜索的特点求解这一TSP (Traveling Salesman Problem)问题。以图1的B区域中某一点为出发点，按照路径顺序对所有负荷进行遍历，算法程序流程图如图3。图3中，个体对负荷进行遍历、对局部信息素和全局信息素更新规则参见文献[12]。

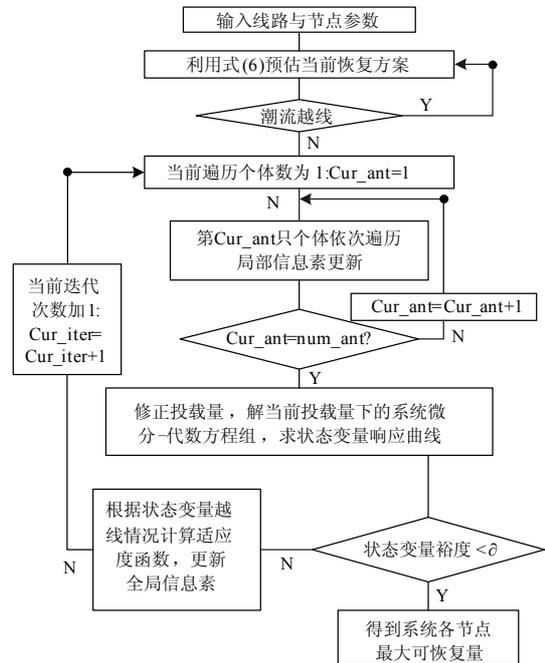


图3 算法流程图

Fig.3 Flow chart of arithmetic

生成恢复方案以后首先进行潮流校验，对于潮流越线的情况，调节发电机出力或负荷水平以满足潮流约束。如果超出系统调节能力，则视为不可行，

需重新生成恢复方案。对于暂态指标越线, 反馈相应的罚函数项到寻优适应度函数中, 通过优化算法参数对投载量进行修正。

### 2.3 算法改进与约束条件处理

信息素矩阵不断更新, 为了让较好路径上的信息量作用更明显, 本文为信息素矩阵设计一个放大因子项  $\beta$ ,  $\beta$  是一个线性递减函数, 其值最终趋于 1, 如式 (10) 所示:

$$\beta = 1 + \frac{N-i}{N} \quad (10)$$

采用罚函数方法处理式不等式约束条件(6), 定义罚函数项如式(11):

$$\omega_j = \begin{cases} 0 & x_{j\min} \leq x_j \leq x_{j\max} \\ \gamma_j (x_j - x_{j\max}) & x_j \geq x_{j\max} \\ \gamma_j (x_{j\min} - x_j) & x_j \leq x_{j\min} \end{cases} \quad (11)$$

式中:  $x$  是系统的状态变量;  $\gamma_j$  是惩罚因子, 为指定的正常数。引入罚函数项之后, 就将模型转化为无约束问题。将罚函数项引入到目标函数中, 得到的适应度函数如式(12):

$$F(u, x) = f(u, x) - \sum_{i=1}^s \omega_i \quad (12)$$

## 3 算例分析

### 3.1 仿真说明

本文算例采用 IEEE-30 节电系统进行负荷恢复优化仿真。文献[13]研究了黑启动中的发电机选择和路径优化, 其优化网络如图 4, 实线代表已恢复路径, 虚线代表未恢复路径。参照该文部分数据初始化仿真网络: 节点 {1, 2, 13, 22, 23, 27} 为已恢复电源节点, 备用充足, 系统各支路已经恢复; 节点 1 至 30 为待恢复负荷节点, 系统节点待恢复负荷约为

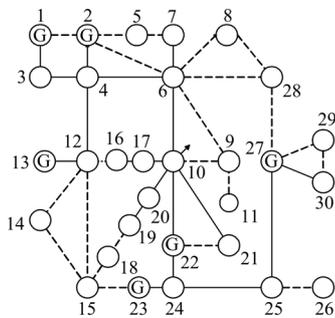


图 4 算例网络拓扑图

Fig.4 Simulation network topology

最大负荷的 40%。取 100 MVA 为容量基值, 当前系统总负荷为 3.528 0 p.u。

同步电机采用考虑  $E_q'$ 、 $E_d'$ 、 $E_d''$  电势变化的 5 阶模型, 调速器和励磁系统采用四阶模型。动态过程中, 电压允许波动范围 0.9~1.1 p.u, 频率允许波动范围 0.99~1.01 p.u。

### 3.2 算例仿真

本文算例有 30 个待恢复节点, 规定每个节点上有 10 个待恢复负荷, 则共需对 300 个待恢复负荷位置进行编码。

在仿真软件上按式(9)计算当前系统的最大可恢复量, 计算数据如表 1,  $P_{11}$ 、 $P_{12}$  是按照 10%和 15%比例线性增加各负荷所得。

表 1 按照频率响应计算恢复量

Tab.1 Restoration quantity calculation using frequency responsive function

$P_{11}$	$f_{11}$	$P_{12}$	$f_{12}$	$f_{limit}$	$P_{limit}$
0.353	0.995 8	0.529	0.991	0.990	0.316

如表 1, 按照公式(9)计算得当前系统可增加出力约为 0.410 p.u。根据系统负荷分布, 考虑到动态负荷会加剧系统波动, 生成某一投载状态为算法寻优初始点, 满足该状态下可投载负荷总量为  $0.33 \times (1+0.1)$  p.u。则使当前所有负荷投载状态与该方案一致, 并且状态为 1 的位置上赋以较大信息素, 状态为 0 的位置上赋以较小信息素。从该点出发, 遍历所有待恢复负荷, 计算结果如表 2。

表 2 系统可恢复量及其分布

Tab.2 Load restoration quantity and distribution

节点号	1	2	3	4	5	6
恢复量	0.014 2	0.015 8	0.002 2	0.015 9	0.011 0	0.001 7
节点号	7	8	9	10	11	12
恢复量	0.004 8	0.009 5	0.016 7	0.016 8	0.002 7	0.016 9
节点号	13	14	15	16	17	18
恢复量	0.016 7	0.008 4	0.013 9	0.002 5	0.007 3	0.015 9
节点号	19	20	21	22	23	24
恢复量	0.013 8	0.016 7	0.011 4	0.000 6	0.014 8	0.016 3
节点号	25	26	27	28	29	30
恢复量	0.011 8	0.013 2	0.012 9	0.006 8	0	0

如表 2, 系统可恢复量为 0.311 2 p.u, 占系统当前负荷量的 8.82%。可恢复负荷位置及各位置相应数量见表 2, 其中 29、30 号节点负荷不可恢复。按照该分布方式投载, 系统典型响应曲线如图 5、图 6 所示。

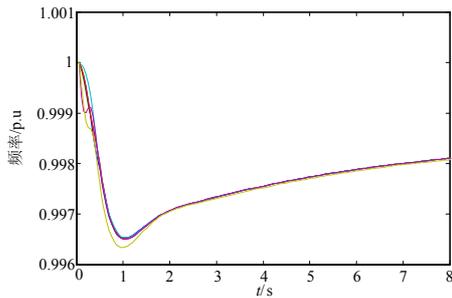


图 5 典型频率响应曲线  
Fig.5 Typical frequency responsive curves

如图 5，负荷的投载引起的瞬时功率不平衡以及负荷特性对系统造成冲击，状态变量有明显的跌落；同时，发电机调节出力(图 6)，维持系统有功平衡。随着发电机出力的增加，系统频率响应曲线逐渐恢复上扬。在此过程中频率响应曲线呈近似 V 字形，系统各状态变量未超出允许范围。

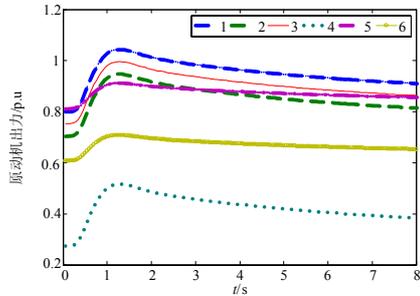


图 6 原动机响应曲线  
Fig.6 Turbine governor responsive curves

### 3.3 算例分析

如图 5、图 6 所示，负荷投入后的暂态过程中，系统频率最低值距允许频率下线保持相当的裕度，部分发电机出力水平明显低于其它发电机。即系统有功备用充足，发电机爬坡能力没有得到充分发挥，但是节点 29、30 上负荷不可恢复，其电压运行水平为全系统最低(图 7)，电压问题可能成为该节点，甚至是全系统负荷恢复的瓶颈。

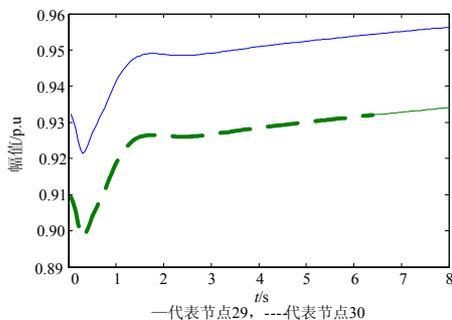


图 7 母线 29、30 电压响应曲线  
Fig.7 Bus 29 and 30 voltage responsive curves

为改善恢复过程中系统的电压运行水平，调整 27 号节点上的发电机励磁系统放大增益系数，29、30 号节点电压有较明显的改善，能够承受一定的负荷增加，系统其它节点也可以继续增加部分负荷。

### 3.4 算例对比

#### 3.4.1 寻优效率对比

算例 3.2 中，算法程序能较快地找到最优解，并且使适应度函数趋于稳定。为验证本文方法有效性，在不利用公式(9)的情况下，算法信息素、编码初始状态等随机生成，做对比算例，对比效果如图 8 所示。

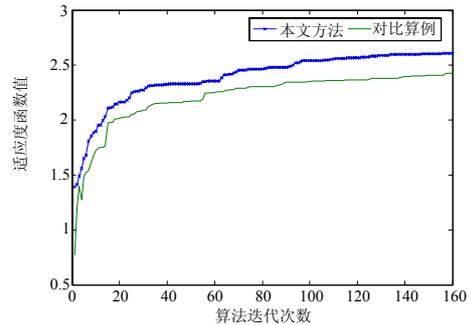


图 8 寻优过程中的适应度函数值

Fig.8 Adapting function value comparison during calculation

图 8 为算例迭代前 160 次时的适应度函数对比。如式(12)，适应度函数值大小直接反映当前可恢复方案的优劣。利用式(9)优化之后，迭代初期，本文算例较比算例具有较大的适应度函数。迭代 100 次之后，程序逐渐收敛，适应度函数值趋于稳定。

#### 3.4.2 负荷模型对比

为比较负荷模型对可恢复负荷量计算影响，在本文算例相同的初始条件下，采用静态 ZIP 负荷模型代替仿真模型中的电动机负荷、冷负荷模型，计算结果如表 3。

表 3 只考虑 ZIP 负荷模型系统恢复量

Tab.3 Load restoration quantity and distribution only ZIP load

	model					
节点号	1	2	3	4	5	6
恢复量	0.0144	0.0160	0.0019	0.0161	0.0132	0.0012
节点号	7	8	9	10	11	12
恢复量	0.0058	0.0125	0.0173	0.0171	0.0026	0.0161
节点号	13	14	15	16	17	18
恢复量	0.0171	0.0093	0.0150	0.0027	0.0082	0.0163
节点号	19	20	21	22	23	24
恢复量	0.0148	0.0183	0.0164	0.0015	0.0168	0.0167
节点号	25	26	27	28	29	30
恢复量	0.0008	0.0035	0.0329	0.0268	0.0053	0

如表 3, 系统可恢复量为 0.356 6 p.u, 占系统当前负荷量的 10.1%, 大于表 2 算例下数值。在未计及动态负荷模型, 尤其是感应电机模型的情况下, 计算可恢复量偏乐观。

## 4 结论

本文建立了最优负荷恢复模型, 该模型计及系统的暂态电压和频率约束, 规避了只用稳态约束条件校验结果偏乐观的风险。寻优算法对系统所有待恢复负荷投载状态编码, 负荷位置以及负荷量固定, 依次进行遍历, 确保获得系统当前工况下的最大可恢复量、可恢复负荷的分布等。利用机组功频特性优化寻优初始点, 有效地提高寻优效率。

电动机负荷启动电流大, 是电力系统最主要的无功负荷之一, 其投载会加剧瞬时电压降。电动机负荷比重的增加, 会减少负荷可恢复量。

空载线路、设备投载等原因增加的无功损耗, 可能使部分和系统连接较弱的节点电压偏低, 成为系统负荷恢复的瓶颈。做好恢复过程中系统的无功控制, 提高较低电压节点的电压运行水平, 是提高系统恢复效率的必要条件。

电力系统负荷恢复是一个多时序的复杂问题, 如何结合系统实际情况, 协调每一次的恢复量, 缩短整个恢复过程花费的时间以及经济代价等问题有待继续研究。

本文方法可为单次负荷恢复策略提供参考, 算例分析证明了方法的有效性。

在此, 感谢宁夏电力公司对我们相关研究的一贯支持。

## 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] 周云海, 闵勇. 负荷的快速恢复算法研究[J]. 电机工程学报, 2003, 23(3):74-79.  
ZHOU Yun-hai, MIN Yong. Optimal algorithm for fast load recovery[J]. Proceedings of the CSEE, 2003, 23(3):74-79.
- [3] 张志毅, 陈允平, 刘敏忠, 等. 用改进遗传算法求解电力系统负荷恢复[J]. 华中科技大学学报, 2007, 35(7): 102-104.  
ZHANG Zhi-yi, CHEN Yun-ping, LIU Min-zhong, et al. Modified genetic-algorithm for load restoration in power systems[J]. Huazhong Univ of Sci & Tech, 2007, 35(7): 102-104.
- [4] Luan W P, Irving M R, Daniel J S. Genetic algorithm for supply restoration and optimal load shedding in power system distribution networks[J]. IEEE Proceedings on Generation, Transmission and Distribution, 2002, 149(2): 145-151.
- [5] 程改红, 徐政. 基于粒子群优化的最优负荷恢复算法[J]. 电力系统自动化, 2007, 31(16): 62-65.  
CHENG Gai-hong, XU Zheng. Optimal load restoration algorithm based on particle swarm optimization algorithm [J]. Automation of Electric Power Systems, 2007, 31(16): 62-65.
- [6] 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 Han-bing, LIU Yu-tian. Fast calculation of load recovery capability considering transient voltage constraints[J]. Automation of Electric Power Systems, 2009, 33(15):8-12.
- [7] Adibi M M, Clelland P, Fink L, et al. Power system restoration—a task force report[J]. IEEE Trans on Power Systems, 1987, 2(2): 271- 277.
- [8] Adibi M M, Borkoski J N, Kafka R J. Power system restoration—the second task force report[J]. IEEE Trans on Power Systems, 1987, 2(4): 927- 933.
- [9] 鞠平, 戴琦, 黄永皓, 等. 我国电力负荷建模工作的若干建议[J]. 电力系统自动化, 2004, 28(16): 8-12.  
JU Ping, DAI Qi, HUANG Yong-hao, et al. Several suggestions for electric power load modeling in our country[J]. Automation of Electric Power Systems, 2004, 28(16): 8-12.
- [10] 薛禹胜, 任先成, WU Q H, 等. 关于低频低压切负荷决策优化协调的评述[J]. 电力系统自动化, 2009, 33(9): 100-107.  
XUE Yu-sheng, REN Xian-cheng, WU Q H, et al. A review of strategic optimization and coordination for power system UFLS and UVLS[J]. Automation of Electric Power Systems, 2009, 33(9): 100-107.
- [11] Jadid S, Salami A. Accurate model of hydroelectric power plant for load pickup during power system restoration[C]. //TENCON 2004. IEEE Region 10 Conference. Chiang Mai (Thailand): 2004: 307-310.
- [12] 杨剑峰, 蒋静坪. 蚁群算法及其应用研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2007.  
YANG Jian-feng, JIANG Jing-ping. Research on ant colony algorithm and its applications[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2007.
- [13] 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): 21-29.  
HAN Zhong-hui, GU Xue-ping, 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): 21-29.

收稿日期: 2009-09-09; 修回日期: 2009-10-27

作者简介:

方涛(1983-), 男, 硕士研究生, 研究方向为电力系统稳定与控制; E-mail:scucc@sohu.com

刘俊勇(1963-), 男, 教授, 博士生导师, 研究方向为电力市场、电力系统稳定与控制。