



(12) 发明专利

(10) 授权公告号 CN 109586298 B

(45) 授权公告日 2021.01.15

(21) 申请号 201811507717.X

(22) 申请日 2018.12.11

(65) 同一申请的已公布的文献号
申请公布号 CN 109586298 A

(43) 申请公布日 2019.04.05

(73) 专利权人 国网山东省电力公司电力科学研究院

地址 250002 山东省济南市市中区望岳路
2000号

专利权人 国家电网有限公司

(72) 发明人 刘萌 苏建军 张国辉 李宽
李常刚 李玉敦 苏欣 史方芳
杨超 赵斌超 张婉婕 黄秉青
王永波 李聪聪 梁正堂 石硕
李娜 佟新元 王昕

(74) 专利代理机构 北京智绘未来专利代理事务
所(普通合伙) 11689

代理人 郭红燕 龚淑华

(51) Int.Cl.
H02J 3/06 (2006.01)

(56) 对比文件
CN 105022885 A, 2015.11.04
CN 104901316 A, 2015.09.09
CN 103457268 A, 2013.12.18
CN 103066595 A, 2013.04.24

胡益 等. 特高压直流闭锁后的交直流混联
受端电网最优切负荷方案.《电力系统自动化》
.2018, 第42卷(第22期),

孙昱 等. “兵力组织扁平化指挥控制结构设
计方法”.《系统工程与电子技术》.2016, 第38卷
(第8期),

审查员 赵梅杰

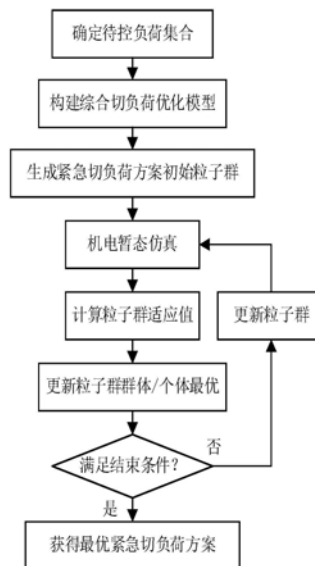
权利要求书7页 说明书15页 附图3页

(54) 发明名称

一种多直流受端电网综合负荷优化控制方
法与系统

(57) 摘要

一种多直流受端电网综合负荷优化控制方
法与系统。适用于大规模受端电网直流闭锁故障
的综合负荷控制;所述综合负荷优化控制方法在
电网既有安全稳定控制策略基础上,计算各变电
站的具体负荷控制量,通过改进的粒子群优化算
法确定能够维持多直流受端电网系统安全稳定
性的最小综合切负荷量,按照最小综合切负荷量
执行切负荷操作。本发明公开的综合负荷优化控
制方法和相应的控制系统,以实现大规模受端电
网的安全稳定控制目标,为优化电网切负荷装置
安装、提高系统运行经济性、确保系统安全稳定
性奠定基础。



1. 一种多直流受端电网综合负荷优化控制方法,其特征在于,所述综合负荷优化控制方法包括以下步骤:

步骤1:确定多直流受端电网系统中所有待控负荷的控制量和优先级;

步骤2:将多直流受端电网系统中所有待控负荷进行集中汇总,确定汇总到多直流受端电网系统中各最高电压等级变电站中的各条出线下所承载的不同优先级的负荷量;

步骤3:按照待控直流闭锁故障初步确定待控负荷集合;

步骤4:确定多直流受端电网系统最大允许频率偏移量约束,包括最大允许暂态频率偏移约束和最大稳态频率偏移约束;

步骤5:确定多直流受端电网系统最大允许电压偏移约束;

步骤6:确定系统各支路最大允许承载电流和功率;

步骤7:确定待比较过载量线路集合;

步骤8:以各变电站节点切负荷量为优化变量,以切负荷总量最小为优化目标,在机组功角、线路功率、母线电压约束下,构建多直流受端电网系统综合切负荷优化模型;

步骤9:生成紧急切负荷方案初始粒子群,对于单一粒子的生成,粒子的初始位置是一个N维数组,N表示步骤3中求得的待控负荷集合中变电站的个数;

步骤10:执行机电暂态仿真,将每个粒子的位置作为一个负荷控制方案,利用电力系统仿真软件进行暂态仿真并得到仿真结果;

步骤11:据步骤8建立的多直流受端电网综合负荷优化控制模型计算粒子目标函数适应值,当所有约束条件都满足时,适应值即为模型的优化目标;

步骤12:构建群体档案库和个体档案库,用于储存粒子迭代过程中的历史信息,更新粒子群,得到所有粒子迭代过程中最优适应值粒子的位置,以及每个粒子在迭代过程中最优适应值的位置;针对群体档案库和个体档案库是否更新的不同组合,定义三种模态为:

(1) 群体档案信息被更优的粒子替换时,定义为模态一;

(2) 群体档案没有更新而个体档案发生更新时,定义为模态二;

(3) 个体档案没有发生更新时,定义为模态三;

步骤13:判断粒子群更新是否达到设定的最大迭代次数,如果没达到则返回步骤10;如果达到设定的最大迭代次数,则将适应值最小粒子的位置作为多直流受端电网综合负荷优化控制方法所得到的最优负荷控制方案。

2. 根据权利要求1所述的多直流受端电网综合负荷优化控制方法,其特征在于:

步骤1中,根据不同负荷的供电可靠性要求或用户供电协议确定待控负荷的优先级。

3. 根据权利要求2所述的多直流受端电网综合负荷优化控制方法,其特征在于:

对于未进行电力市场改造的电力公司,根据不同负荷的供电可靠性要求确定其优先级,供电可靠性要求越高的负荷,其优先级越高,供电可靠性要求越低的负荷,其优先级越低。

4. 根据权利要求3所述的多直流受端电网综合负荷优化控制方法,其特征在于:

对于不允许停电的用户,其协议供电价格最高,供电优先级最高;

对于允许较短时间停电的用户,其协议供电价格较高,供电优先级次之;

对于允许在一段时间内长时间停电的用户,其协议供电价格最低,供电优先级最低。

5. 根据权利要求2或4所述的多直流受端电网综合负荷优化控制方法,其特征在于:

将负荷按照优先级分为三级：

一级负荷为供电可靠性要求最高和/或协议供电价格最高的负荷，由两个独立电源供电；

二级负荷对供电可靠性要求较高和/或协议供电价格较高的负荷，应由两回线路供电；

三级负荷对供电可靠性要求最低和/或协议供电价格最低的负荷，采用单回线路供电；

对于采用双电源供电的负荷，赋其优先级为一级，对于采用双回线供电的负荷，赋其优先级为二级，其他负荷为三级，并相应确定各负荷的典型运行功率。

6. 根据权利要求1所述的多直流受端电网综合负荷优化控制方法，其特征在于：

在步骤2中，具体包括以下内容：

S2-1：将具体用户的优先级和可控量汇总至第一级变电站，统计第一级变电站各出线下不同优先级负荷的负荷量；

S2-2：将第一级变电站的待控负荷优先级和控制量汇总至第二级变电站，统计第二级变电站各出线下不同优先级负荷的负荷量；

S2-3：将第二级变电站的待控负荷优先级和控制量汇总至第三级变电站，统计第三级变电站各出线下不同优先级负荷的负荷量；

S2-4：将第三级变电站的待控负荷优先级和控制量汇总至第四级变电站，统计第四级变电站各出线下不同优先级负荷的负荷量；

S2-5：确定各第四级变电站各条出线下所承载的不同优先级的可控负荷量。

7. 根据权利要求6所述的多直流受端电网综合负荷优化控制方法，其特征在于：

在步骤2中，所述具体用户是指电压等级为380V的电力用户；

所述第一级变电站的典型电压等级为10kV；

所述第二级变电站的典型电压等级为110kV；

所述第三级变电站的典型电压等级为220kV；

所述第四级变电站的典型电压等级为500kV。

8. 根据权利要求1或6所述的多直流受端电网综合负荷优化控制方法，其特征在于：

在步骤3中，按照S3-1~S3-4确定初步待控负荷集合：

S3-1：累加统计各第四级变电站出线第 N_p 级负荷的总量 $P_{cN_p-N_p}$ ，如果 $P_{cN_p-N_p} < P_{DC}$ ，那么进入下一步，否则退出待控负荷集合初步搜索；

S3-2：累加统计各第四级变电站出线第 N_{p-1} 和 N_p 级负荷的总量 $P_{cN_{p-1}-N_p}$ ，如果 $P_{cN_{p-1}-N_p} < P_{DC}$ ，那么进入下一步，否则退出待控负荷集合初步搜索；

S3-3：累加统计各第四级变电站出线第 N_{p-2} 至 N_p 级负荷的总量 $P_{cN_{p-2}-N_p}$ ，如果 $P_{cN_{p-2}-N_p} < P_{DC}$ ，那么进入下一步，否则退出待控负荷集合初步搜索；

S3-4：累加统计各第四级变电站出线第 p 至 N_p 级负荷的总量 P_{cp-N_p} ，如果 $P_{cp-N_p} < P_{DC}$ ，那么 p 减小1，并重复S3-4，直至 $P_{cp-N_p} \geq P_{DC}$ ，退出待控负荷集合初步搜索；

假定经上述搜索后，共需第 p 级至 N_p 级负荷进行控制方能满足 $P_{cp-N_p} \geq P_{DC}$ ，此时将所有第四级变电站的所有 p 至 N_p 级负荷总量分别统计出来，作为待控负荷集合；

其中， P_{DC} 为待控直流闭锁功率。

9. 根据权利要求1所述的多直流受端电网综合负荷优化控制方法，其特征在于：

在步骤4中，根据实际电网的运行要求设定最大允许频率偏移量约束。

10. 根据权利要求9所述的多直流受端电网综合负荷优化控制方法,其特征在于:
选择多直流受端电网系统第一轮低频减载的启动频率为最大允许暂态频率偏移约束。

11. 根据权利要求9或10所述的多直流受端电网综合负荷优化控制方法,其特征在于:
选择49.5Hz为多直流受端电网系统允许最大稳态频率偏移约束。

12. 根据权利要求1所述的多直流受端电网综合负荷优化控制方法,其特征在于:
在步骤5中,根据多直流受端电网系统的各处的电压稳定极限电压确定最大允许暂态电压跌落约束。

13. 根据权利要求12所述的多直流受端电网综合负荷优化控制方法,其特征在于:
当多直流受端电网系统各处的电压稳定极限电压无法确定时,选择0.7pu为系统最大允许电压偏移约束。

14. 根据权利要求1所述的多直流受端电网综合负荷优化控制方法,其特征在于:
在步骤6中,通过各线路的设计参数获得其热稳定约束和机械稳定约束最大允许承载电流和功率,通过系统安全稳定分析确定各断面支路的最大允许承载电流和功率,将上述约束下的电压和功率上限取最小值,即得到各支路最大允许承载电流和功率。

15. 根据权利要求1所述的多直流受端电网综合负荷优化控制方法,其特征在于:
在步骤8中,优化模型如下:

$$\min F = \sum_i P_i$$

$$\text{s.t.} \begin{cases} \Delta \delta \leq \Delta \bar{\delta} \\ \mathbf{s} \leq \bar{\mathbf{s}} \\ \underline{\mathbf{v}} \leq \mathbf{v} \leq \bar{\mathbf{v}} \\ \underline{\mathbf{f}} \leq \mathbf{f} \\ \underline{\mathbf{P}} \leq \mathbf{P} \leq \bar{\mathbf{P}} \end{cases}$$

其中, $\min F$ 为最小切负荷量,即优化变量, P_i 为第*i*个变电站节点负荷的切负荷量, $\Delta \delta$ 为机组功角差向量, $\Delta \bar{\delta}$ 为机组最大功角差约束向量, \mathbf{s} 为线路视在功率向量, $\bar{\mathbf{s}}$ 为线路最大传输功率向量, \mathbf{v} 为节点电压向量, $\bar{\mathbf{v}}$ 和 $\underline{\mathbf{v}}$ 分别为节点电压的上下限约束向量, \mathbf{f} 为节点频率向量, $\underline{\mathbf{f}}$ 为各节点最低频率的门槛值向量, \mathbf{P} 为切负荷向量, $\bar{\mathbf{P}}$ 和 $\underline{\mathbf{P}}$ 分别为切负荷量的上下限约束向量。

16. 根据权利要求15所述的多直流受端电网综合负荷优化控制方法,其特征在于:
在步骤11中,模型的优化目标即适应值按以下公式计算:

$$F = \sum_i P_i + \varepsilon_f \sum_j \Delta f_j / \sigma_j + \varepsilon_v \sum_k \Delta v_k K_v + \varepsilon_s \sum_l \Delta s_l$$

其中, P_i 为第*i*个变电站节点负荷的切负荷量, ε_f 为频率惩罚因子, Δf_j 为第*j*个机组母线频率的越限量, σ_j 为第*j*个机组的一次调频调差系数, ε_v 为电压惩罚因子, Δv_k 为第*k*个母线节点电压的越限量, K_v 为电压调节系数, ε_s 为功率惩罚因子, Δs_l 为第*l*条线路的功率越限量。

17. 根据权利要求16所述的多直流受端电网综合负荷优化控制方法,其特征在于:

所述频率惩罚因子 ε_f 的取值范围为5000~10000;

第*j*个机组的一次调频调差系数 σ_j 的取值为该机组的实际调差系数;

所述电压惩罚因子 ε_v 的取值范围是2000~5000;

所述电压调节系数 K_v 的取值范围是0.5~5.0;

所述功率惩罚因子 ε_s 的取值范围是3000~5000。

18. 根据权利要求17所述的多直流受端电网综合负荷优化控制方法,其特征在于:

所述电压调节系数 K_v 优选为1;

所述一次调频调差系数 σ_j 从优化模型数据库中获得。

19. 根据权利要求1或15所述的多直流受端电网综合负荷优化控制方法,其特征在于:

在步骤12中,更新粒子群具体包括以下内容:

S12-1: 构建群体档案库和个体档案库,用于储存粒子迭代过程中的历史信息,群体档案库储存了所有粒子迭代过程中前 N_g 个最优适应值粒子的位置,个体档案库储存了每个粒子在迭代过程中前 N_u 个最优适应值的位置,即 N_g 为群体档案库的大小, N_u 为个体档案库的大小, $N_g \leq N_u$;

S12-2: 通过迭代过程更新粒子群;

S12-3: 每完成一次迭代后,更新群体档案库和个体档案库的状态。

20. 根据权利要求19所述的多直流受端电网综合负荷优化控制方法,其特征在于:

在S12-1中,群体档案和个体档案里的数据在初始生成时是空的,通过不断的迭代,将计算适应值后的粒子位置连同其适应值输入到库中,直至群体档案和个体档案信息储满。

21. 根据权利要求20所述的多直流受端电网综合负荷优化控制方法,其特征在于:

在S12-1中,取 $N_g = N_u$,优选地选取设置粒子总数的1/2作为两档案库的大小。

22. 根据权利要求20或21所述的多直流受端电网综合负荷优化控制方法,其特征在于:

在S12-1中,群体档案信息 R_g 和个体档案信息 R_u 的数据结构如下:

$$\mathbf{R}_g = \left[[p_1, F_1] \quad [p_2, F_2] \quad \dots \quad [p_{N_g}, F_{N_g}] \right]^T$$

$$\mathbf{R}_u = \left[\begin{array}{c} [p_1, F_1] \\ [p_2, F_2] \\ \dots \\ [p_{N_u}, F_{N_u}] \end{array} \right]_1 \quad \mathbf{L} \quad \left[\begin{array}{c} [p_1, F_1] \\ [p_2, F_2] \\ \dots \\ [p_{N_u}, F_{N_u}] \end{array} \right]_{N_g}$$

其中, $[p_i, F_i]$ 表示群体档案中储存在第 i 号位置的粒子位置和适应值构成的数据, $[p_1, F_1] \quad [p_2, F_2] \quad \dots \quad [p_{N_u}, F_{N_u}]_j^T$ 表示个体档案中第 j 个粒子的前 N_u 个历史最优适应值与其粒子位置构成的数据, N_s 为粒子总数。

23. 根据权利要求22所述的多直流受端电网综合负荷优化控制方法,其特征在于:

在S12-2中,迭代过程中按如下公式更新,得到第 i 个粒子的速度向量和位置向量:

$$\begin{cases} \mathbf{v}(t) = \omega \mathbf{v}(t-1) + r_1 \lambda_g (\mathbf{P}_g - \mathbf{P}(t-1)) + r_2 \lambda_u (\mathbf{P}_{ui} - \mathbf{P}(t-1)) \\ \mathbf{P}(t) = \mathbf{P}(t-1) + \mathbf{v}(t) \end{cases}$$

其中, $\mathbf{P}(t)$ 为本次迭代得到的粒子的位置向量, $\mathbf{V}(t)$ 为本次迭代得到的粒子的速度向量, $\mathbf{P}(t-1)$ 为上一次次迭代得到的粒子的位置向量, $\mathbf{V}(t-1)$ 为上一次迭代得到的粒子的速度向量, t 为迭代次数, ω 为惯性系数, r_1 和 r_2 为 $[0, 1]$ 上均匀分布的随机数, λ_g 和 λ_u 为群体加速系数和个体加速系数, \mathbf{P}_g 为群体档案中最优适应值粒子的位置向量, \mathbf{P}_{ui} 为个体档案中第 i 个粒子历史最优适应值粒子的位置向量。

24. 根据权利要求23所述的多直流受端电网综合负荷优化控制方法,其特征在于:
 所述惯性系数 ω 取值范围是0~1;
 所述群体加速系数 λ_g 取值范围是0.5~1;
 所述个体加速系数 λ_u 取值范围是0~0.5;
 其中,群体加速系数 λ_g 与个体加速系数 λ_u 之和一般为1。

25. 根据权利要求23所述的多直流受端电网综合负荷优化控制方法,其特征在于:
 在S12-3中,如果某些粒子适应值优于库中的最差粒子适应值,即该次迭代获得了更优解,则替换库中该位置所储存的粒子信息,否则不进行库更新操作。

26. 根据权利要求25所述的多直流受端电网综合负荷优化控制方法,其特征在于:
 在步骤12的更新粒子群中,还进一步包括:根据三种模态对公式中的 ω 、 λ_g 和 λ_u 进行调整:

(1) 当演化处于状态一时,提高群体加速系数,使粒子群向收敛区域搜索,同时减小惯性系数;

(2) 演化处于状态二时,提高个体加速系数;

(3) 演化处于状态三时,粒子群算法的寻优接近尾声,不做特殊处理。

27. 根据权利要求25或26所述的多直流受端电网综合负荷优化控制方法,其特征在于:
 根据三种模态,对迭代过程中的公式参数调整如下:

$$\omega(t) = \begin{cases} \omega(t-1) - s_\omega & \text{模态一} \\ \omega(t-1) + s_\omega & \text{模态二} \\ \omega(t-1) & \text{模态三} \end{cases}$$

$$\lambda_g(t) = \begin{cases} \lambda_g(t-1) + s_\lambda & \text{模态一} \\ \lambda_g(t-1) - s_\lambda & \text{模态二} \\ \lambda_g(t-1) & \text{模态三} \end{cases}$$

$$\lambda_u(t) = \begin{cases} \lambda_u(t-1) - s_\lambda & \text{模态一} \\ \lambda_u(t-1) + s_\lambda & \text{模态二} \\ \lambda_u(t-1) & \text{模态三} \end{cases}$$

其中, $\omega(t)$ 为第 t 次迭代中粒子的惯性系数, $\lambda_g(t)$ 为第 t 次迭代中粒子的群体加速系数, $\lambda_u(t)$ 为第 t 次迭代中粒子的个体加速系数, s_ω 为惯性调节步长, s_λ 为速度调节步长。

28. 根据权利要求27所述的多直流受端电网综合负荷优化控制方法,其特征在于:
 所述惯性调节步长 s_ω 取值范围是0.1~0.5;
 所述速度调节步长 s_λ 取值范围是0.1~0.5。

29. 根据权利要求1所述的多直流受端电网综合负荷优化控制方法,其特征在于:
 采用并行方法对步骤10步的仿真流程进行并行化,具体方法为:

S10-1:采用软件并行工具multiprocessing创建并行池,并行池的并行数为所用仿真计算机的CPU核心数减一;

S10-2:向进程池中添加需要并行的暂态仿真子进程;

S10-3:关闭进程池,并利用multiprocessing并行执行进程池中的各个子程序,直至进

程池中所有子程序均完成仿真。

30. 一种利用权利要求1-29中任一权利要求所述综合负荷优化控制方法的多直流受端电网综合负荷优化控制系统,其特征在于:

所述综合负荷优化控制系统包括多直流受端电网系统基础数据获取单元、优化控制模型生成模块、并行仿真控制单元、初始粒子生成模块、群体档案库与个体档案库更新模块、最优负荷控制方案选择模块;

所述优化控制模型生成模块根据多直流受端电网系统基础数据获取单元上传的电网系统基础数据构建直流受端电网系统综合切负荷优化模型即优化控制模型,并上传至并行仿真控制单元;

所述初始粒子生成模块生成初始粒子并上传至并行仿真控制单元,其中,初始粒子的初始位置为N维数组,N表示待控负荷集合中变电站的个数;

所述并行仿真控制单元将每个粒子的位置作为一个负荷控制方案,利用电力系统仿真软件进行暂态仿真并得到仿真结果;

群体档案库和个体档案库更新模块根据仿真结果更新群体档案和个体档案,并通过粒子群算法进行迭代;

当达到设定的最大迭代次数后,迭代结束,将最新迭代后得到的仿真结果上传至最优负荷控制选择模块,所述最优负荷控制选择模块将适应值最小粒子的位置作为多直流受端电网系统的最优负荷控制方案。

31. 根据权利要求30所述的多直流受端电网综合负荷优化控制系统,其特征在于:

所述基础数据获取单元通过与电力系统控制中心数据库以及电力交易市场数据库进行通信,获取电网基本信息并对优先级负荷进行统计汇总。

32. 根据权利要求30或31所述的多直流受端电网综合负荷优化控制系统,其特征在于:

所述基础数据获取单元包括电力系统基础接线数据获取模块、电力系统用户负荷与优先级获取模块、电力系统用户负荷与优先级聚合整合模块、电力系统关键线路及最大允许过载电流与容量获取模块;

其中,电力系统基础接线数据获取模块获取多直流受端电网系统中的接线结构,确定网络拓扑;

所述电力系统用户负荷与优先级获取模块通过与多直流受端电网系统的控制中心以及电力交易数据库进行通信,获取多直流受端电网系统中各个负荷当前负荷量与优先级;

所述电力系统用户负荷与优先级聚合整合模块变电站出线的各优先级负荷进行统计汇总;

所述电力系统关键线路及最大允许过载电流与容量获取模块用于确定需要比较过载量的关键线路以及最大允许过载电流与容量。

33. 根据权利要求30所述的多直流受端电网综合负荷优化控制系统,其特征在于:

所述并行仿真控制单元包括暂态仿真模块、动态结果分析与适应值计算模块;

所述暂态仿真模块用于对各粒子生成的紧急切负荷方案进行暂态仿真,并输出仿真结果中的频率偏移、电压偏移、机组功角、线路功率各种暂态指标;

所述动态结果分析与适应值计算模块用于对暂态仿真模块中获得的暂态指标进行分析计算,并按模型的优化目标即适应值的计算公式计算得到各粒子的适应值,优化目标为

满足各约束条件下,适应值尽可能小。

一种多直流受端电网综合负荷优化控制方法与系统

技术领域

[0001] 本申请属于电力系统控制技术领域,涉及直流输电控制技术,尤其涉及一种多直流受端电网综合负荷控制方法与系统。

背景技术

[0002] 近年来,随着大规模远距离大容量交流和直流输电技术的快速发展,我国东部电网接入直流功率大幅增加,东部电网呈现典型的受端系统特征。同时,由于风电、光伏等可再生能源的大规模发展,东部电网的常规电源逐渐被外来直流和本地电力电子接口新能源电力替代,系统的整体惯性水平持续下降,一旦发生直流闭锁等严重功率扰动,受端电网的安全稳定性将受到严峻挑战,造成如严重频率偏移、系统暂态稳定失稳、大幅电压偏移、潮流大幅转移等。为应对直流闭锁等故障,多直流馈入受端电网一般在直流闭锁后采取必要的切负荷等紧急控制措施,通过快速降低系统功率缺额,提高系统的安全稳定性,实现降低频率偏移、提高系统暂态稳定、减小电压偏移、弱化潮流转移等控制目标。因此,直流闭锁后的切负荷控制措施的实施,会影响受端系统的多重安全稳定属性,针对各种安全稳定属性对受端系统的负荷控制进行综合协调优化,能够显著提高受端系统的安全稳定性,并尽可能降低切负荷量,减少切负荷对用户供电的影响。

[0003] 直流闭锁后的切负荷控制优化的关键是兼顾系统的多重稳定性与系统经济性。有的研究基于可控负荷节点选取及负荷分层原理首先对负荷进行分层,确定不同层级上的切负荷量,在系统实际发生故障后通过快速查找控制策略表的实行进行相应的控制。有的文献针对特定直流闭锁后的系统响应特性,从防止系统失稳的角度对切负荷控制总量进行优化设计,对于其他安全稳定属性则仅在进行事后校核,未在优化过程中予以考虑。有的文献构建了考虑暂态安全约束的紧急切负荷优化模型,建立了考虑时域约束的大规模非线性规划模型,但是该模型的求解非常困难,且由于涉及时域约束,模型求解效率低下。还有的文献提出了基于SVM的电力系统紧急控制实时决策方法,通过改造SVM 稳定规则表达式得到一种能够表征系统稳定裕度并能实时求取的稳定性指标,以此分析不同紧急控制方案对系统稳定性的影响,但在电网实际应用中,这种实时决策方法的实时性尚不能满足需求。

发明内容

[0004] 本申请针对多直流馈入的受端电网直流闭锁故障,以紧急切负荷方案的经济性为优化目标,考虑多种暂态安全约束,建立综合计及系统安全稳定性和经济性的负荷控制综合优化模型,并以粒子群优化算法为基础,对优化方法进行适应性改进,提出了综合负荷优化控制方法,并设计了相应的控制系统,以实现大规模受端电网的安全稳定控制目标,为优化电网切负荷装置安装、提高系统运行经济性、确保系统安全稳定性奠定基础。

[0005] 为实现上述发明目的,本申请公开了两项发明,分别为一种多直流受端电网综合负荷优化控制方法和一种多直流受端电网综合负荷优化控制系统,具体采用以下技术方案。

[0006] 一种多直流受端电网综合负荷优化控制方法,适用于大规模受端电网直流闭锁故障的综合负荷控制;其特征在于:所述综合负荷优化控制方法在电网既有安全稳定控制策略基础上,计算各变电站的具体负荷控制量,通过改进的粒子群优化算法确定能够维持多直流受端电网系统安全稳定性的最小综合切负荷量,按照最小综合切负荷量执行切负荷操作。

[0007] 一种多直流受端电网综合负荷优化控制方法,其特征在于,所述综合负荷优化控制方法包括以下步骤:

[0008] 步骤1:确定多直流受端电网系统中所有待控负荷的控制量和优先级;

[0009] 步骤2:将多直流受端电网系统中所有待控负荷进行集中汇总,确定汇总到多直流受端电网系统中各最高电压等级变电站中的各条出线下所承载的不同优先级的负荷量;

[0010] 步骤3:按照待控直流闭锁故障初步确定待控负荷集合;

[0011] 步骤4:确定多直流受端电网系统最大允许频率偏移量约束,包括最大允许暂态频率偏移约束和最大稳态频率偏移约束;

[0012] 步骤5:确定多直流受端电网系统最大允许电压偏移约束;

[0013] 步骤6:确定系统各支路最大允许承载电流和功率;

[0014] 步骤7:确定待比较过载量线路集合;

[0015] 步骤8:以各变电站节点切负荷量为优化变量,以切负荷总量最小为优化目标,在机组功角、线路功率、母线电压约束下,构建多直流受端电网系统综合切负荷优化模型;

[0016] 步骤9:生成紧急切负荷方案初始粒子群,对于单一粒子的生成,粒子的初始位置是一个N维数组,N表示步骤3中求得的待控负荷集合中变电站的个数;

[0017] 步骤10:执行机电暂态仿真,将每个粒子的位置作为一个负荷控制方案,利用电力系统仿真软件进行暂态仿真并得到仿真结果;

[0018] 步骤11:据步骤8建立的多直流受端电网综合负荷优化控制模型计算粒子目标函数适应值,当所有约束条件都满足时,适应值即为模型的优化目标;

[0019] 步骤12:更新粒子群,得到所有粒子迭代过程中最优适应值粒子的位置,以及每个粒子在迭代过程中最优适应值的位置;

[0020] 步骤13:判断粒子群更新是否达到设定的最大迭代次数,如果没达到则返回步骤10;如果达到设定的最大迭代次数,则将适应值最小粒子的位置作为多直流受端电网综合负荷优化控制方法所得到的最优负荷控制方案。

[0021] 本发明进一步包括以下优选方案:

[0022] 步骤1中,根据不同负荷的供电可靠性要求或用户供电协议确定待控负荷的优先级。

[0023] 对于未进行电力市场改造的电力公司,根据不同负荷的供电可靠性要求确定其优先级,供电可靠性要求越高的负荷,其优先级越高,供电可靠性要求越低的负荷,其优先级越低。

[0024] 对于不允许停电的用户,其协议供电价格最高,供电优先级最高;

[0025] 对于允许较短时间停电的用户,其协议供电价格较高,供电优先级次之;

[0026] 对于允许在一段时间内长时间停电的用户,其协议供电价格最低,供电优先级最低。

- [0027] 将负荷按照优先级分为三级：
- [0028] 一级负荷为供电可靠性要求最高和/或协议供电价格最高的负荷，由两个独立电源供电；
- [0029] 二级负荷对供电可靠性要求较高和/或协议供电价格较高的负荷，应由两回线路供电；
- [0030] 三级负荷对供电可靠性要求最低和/或协议供电价格最低的负荷，采用单回线路供电；
- [0031] 对于采用双电源供电的负荷，赋其优先级为一级，对于采用双回线供电的负荷，赋其优先级为二级，其他负荷为三级，并相应确定各负荷的典型运行功率。
- [0032] 在步骤2中，具体包括以下内容：
- [0033] S2-1：将具体用户的优先级和可控量汇总至第一级变电站，统计第一级变电站各出线下不同优先级负荷的负荷量；
- [0034] S2-2：将第一级变电站的待控负荷优先级和控制量汇总至第二级变电站，统计第二级变电站各出线下不同优先级负荷的负荷量；
- [0035] S2-3：将第二级变电站的待控负荷优先级和控制量汇总至第三级变电站，统计第三级变电站各出线下不同优先级负荷的负荷量；
- [0036] S2-4：将第三级变电站的待控负荷优先级和控制量汇总至第四级变电站，统计第四级变电站各出线下不同优先级负荷的负荷量；
- [0037] S2-5：确定各第四级变电站各条出线下所承载的不同优先级的可控负荷量。
- [0038] 在步骤2中，所述具体用户是指电压等级为380V的电力用户；
- [0039] 所述第一级变电站的典型电压等级为10kV；
- [0040] 所述第二级变电站的典型电压等级为110kV；
- [0041] 所述第三级变电站的典型电压等级为220kV；
- [0042] 所述第四级变电站的典型电压等级为500kV。
- [0043] 在步骤3中，按照S3-1~S3-4确定初步待控负荷集合：
- [0044] S3-1：累加统计各第四级变电站出线第 N_p 级负荷的总量 $P_{cN_p-N_p}$ ，如果 $P_{cN_p-N_p} < P_{DC}$ ，那么进入下一步，否则退出待控负荷集合初步搜索；
- [0045] S3-2：累加统计各第四级变电站出线第 N_{p-1} 和 N_p 级负荷的总量 $P_{cN_{p-1}-N_p}$ ，如果 $P_{cN_{p-1}-N_p} < P_{DC}$ ，那么进入下一步，否则退出待控负荷集合初步搜索；
- [0046] S3-3：累加统计各第四级变电站出线第 N_{p-2} 至 N_p 级负荷的总量 $P_{cN_{p-2}-N_p}$ ，如果 $P_{cN_{p-2}-N_p} < P_{DC}$ ，那么进入下一步，否则退出待控负荷集合初步搜索；
- [0047] S3-4：累加统计各第四级变电站出线第 p 至 N_p 级负荷的总量 P_{cp-N_p} ，如果 $P_{cp-N_p} < P_{DC}$ ，那么 p 减小1，并重复S3-4，直至 $P_{cp-N_p} \geq P_{DC}$ ，退出待控负荷集合初步搜索；
- [0048] 假定经上述搜索后，共需第 p 级至 N_p 级负荷进行控制方能满足 $P_{cp-N_p} \geq P_{DC}$ ，此时将所有第四级变电站的所有 p 至 N_p 级负荷总量分别统计出来，作为待控负荷集合；
- [0049] 其中， P_{DC} 为待控直流闭锁功率。
- [0050] 在步骤4中，根据实际电网的运行要求设定最大允许频率偏移量约束。
- [0051] 选择多直流受端电网系统第一轮低频减载的启动频率为最大允许暂态频率偏移约束。

[0052] 选择49.5Hz为多直流受端电网系统允许最大稳态频率偏移约束。

[0053] 在步骤5中,根据多直流受端电网系统的各处的电压稳定极限电压确定最大允许暂态电压跌落约束。

[0054] 当多直流受端电网系统各处的电压稳定极限电压无法确定时,选择0.7pu为系统最大允许电压偏移约束。

[0055] 在步骤6中,通过各线路的设计参数获得其热稳定约束和机械稳定约束最大允许承载电流和功率,通过系统安全稳定分析确定各断面支路的最大允许承载电流和功率,将上述约束下的电压和功率上限取最小值,即得到各支路最大允许承载电流和功率。

[0056] 在步骤8中,优化模型如下:

$$[0057] \quad \min F = \sum_i P_i$$

$$[0058] \quad \text{s.t.} \begin{cases} \Delta \delta \leq \Delta \bar{\delta} \\ \mathbf{s} \leq \bar{\mathbf{s}} \\ \underline{\mathbf{v}} \leq \mathbf{v} \leq \bar{\mathbf{v}} \\ \underline{\mathbf{f}} \leq \mathbf{f} \\ \underline{\mathbf{P}} \leq \mathbf{P} \leq \bar{\mathbf{P}} \end{cases}$$

[0059] 其中, $\min F$ 为最小切负荷量,即优化变量, P_i 为第*i*个变电站节点负荷的切负荷量, $\Delta \delta$ 为机组功角差向量, $\Delta \bar{\delta}$ 为机组最大功角差约束向量, \mathbf{s} 为线路视在功率向量, $\bar{\mathbf{s}}$ 为线路最大传输功率向量, \mathbf{v} 为节点电压向量, $\bar{\mathbf{v}}$ 和 $\underline{\mathbf{v}}$ 分别为节点电压的上下限约束向量, \mathbf{f} 为节点频率向量, $\underline{\mathbf{f}}$ 为各节点最低频率的门槛值向量, \mathbf{P} 为切负荷向量, $\bar{\mathbf{P}}$ 和 $\underline{\mathbf{P}}$ 分别为切负荷量的上下限约束向量。

[0060] 在步骤11中,模型的优化目标即适应值按以下公式计算:

$$[0061] \quad F = \sum_i P_i + \varepsilon_f \sum_j \Delta f_j / \sigma_j + \varepsilon_v \sum_k \Delta v_k K_v + \varepsilon_s \sum_l \Delta s_l$$

[0062] 其中, P_i 为第*i*个变电站节点负荷的切负荷量, ε_f 为频率惩罚因子, Δf_j 为第*j*个机组母线频率的越限量, σ_j 为第*j*个机组的一次调频调差系数, ε_v 为电压惩罚因子, Δv_k 为第*k*个母线节点电压的越限量, K_v 为电压调节系数, ε_s 为功率惩罚因子, Δs_l 为第*l*条线路的功率越限量。

[0063] 频率惩罚因子 ε_f 的取值范围为5000~10000;

[0064] 第*j*个机组的一次调频调差系数 σ_j 的取值为该机组的实际调差系数,从模型数据库中获得;

[0065] 电压惩罚因子 ε_v 的取值范围是2000~5000;

[0066] 电压调节系数 K_v 的取值范围是0.5~5.0,一般取1;

[0067] 功率惩罚因子 ε_s 的取值范围是3000~5000。

[0068] 在步骤12中,更新粒子群具体包括以下内容:S12-1:构建群体档案库和个体档案库,用于储存粒子迭代过程中的历史信息,群体档案储存了所有粒子迭代过程中前 N_g 个最优适应值粒子的位置,个体档案储存了每个粒子在迭代过程中前 N_u 个最优适应值的位置。即 N_g 为群体档案库的大小, N_u 为个体档案库的大小,一般取 $N_g = N_u$ 。档案库大小不得大于粒子群个数,一般取设置粒子数的1/2作为两档案库的大小。

[0069] S12-2:通过迭代过程更新粒子群;

[0070] S12-3:每完成一次迭代后,更新群体档案库和个体档案库的状态。

[0071] 进一步:

[0072] 在S12-1中,群体档案和个体档案里的数据在初始生成时是空的,通过不断的迭代,将计算适应值后的粒子位置连同其适应值输入到库中,直至群体档案和个体档案信息储满。

[0073] 群体档案信息 R_g 和个体档案信息 R_u 的数据结构如下:

$$[0074] \quad \mathbf{R}_g = \left[[p_1, F_1] \quad [p_2, F_2] \quad \dots \quad [p_{N_g}, F_{N_g}] \right]^T$$

$$[0075] \quad \mathbf{R}_u = \begin{bmatrix} \begin{bmatrix} [p_1, F_1] \\ [p_2, F_2] \\ \vdots \\ [p_{N_u}, F_{N_u}] \end{bmatrix}_1 & \begin{bmatrix} [p_1, F_1] \\ [p_2, F_2] \\ \vdots \\ [p_{N_u}, F_{N_u}] \end{bmatrix}_2 & \dots & \begin{bmatrix} [p_1, F_1] \\ [p_2, F_2] \\ \vdots \\ [p_{N_u}, F_{N_u}] \end{bmatrix}_{N_s} \end{bmatrix}$$

[0076] 其中, $[p_i, F_i]$ 表示群体档案中储存在第 i 号位置的粒子位置和适应值构成的数据, $\left[[p_1, F_1] \quad [p_2, F_2] \quad \dots \quad [p_{N_u}, F_{N_u}] \right]^T_j$ 表示个体档案中第 j 个粒子的前 N_u 个历史最优适应值与其粒子位置构成的数据, N_s 为粒子总数。

[0077] 在S12-2中,迭代过程中按如下公式更新,得到第 i 个粒子的速度向量和位置向量:

$$[0078] \quad \begin{cases} \mathbf{v}(t) = \omega \mathbf{v}(t-1) + r_1 \lambda_g (\mathbf{P}_g - \mathbf{P}(t-1)) + r_2 \lambda_u (\mathbf{P}_{ui} - \mathbf{P}(t-1)) \\ \mathbf{P}(t) = \mathbf{P}(t-1) + \mathbf{v}(t) \end{cases}$$

[0079] 其中, $\mathbf{P}(t)$ 为本次迭代得到的粒子的位置向量, $\mathbf{V}(t)$ 为本次迭代得到的粒子的速度向量, $\mathbf{P}(t-1)$ 为上一次次迭代得到的粒子的位置向量, $\mathbf{V}(t-1)$ 为上一次迭代得到的粒子的速度向量, t 为迭代次数, ω 为惯性系数, r_1 和 r_2 为 $[0, 1]$ 上均匀分布的随机数, λ_g 和 λ_u 为群体加速系数和个体加速系数, \mathbf{P}_g 为群体档案中最优适应值粒子的位置向量, \mathbf{P}_{ui} 为个体档案中第 i 个粒子历史最优适应值粒子的位置向量。

[0080] 其中,所述惯性系数 ω 取值范围是 $0 \sim 1$;

[0081] 所述群体加速系数 λ_g 取值范围是 $0.5 \sim 1$;

[0082] 所述个体加速系数 λ_u 取值范围是 $0 \sim 0.5$;

[0083] 群体加速系数 λ_g 与个体加速系数 λ_u 之和一般为 1 。

[0084] 在S12-3中,如果某些粒子适应值优于库中的最差粒子适应值,即该次迭代获得了更优解,则替换库中该位置所储存的粒子信息,否则不进行库更新操作。

[0085] 针对群体库和个体库是否更新的不同组合,定义三种模态为:

[0086] (1) 群体档案信息被更优的粒子替换时,定义为模态一;

[0087] (2) 群体档案没有更新而个体档案发生更新时,定义为模态二;

[0088] (3) 个体档案没有发生更新时,定义为模态三;

[0089] 群体档案的更新必然伴随个体档案更新,个体档案没有更新则群体档案一定也没有更新。

[0090] 在步骤12的更新粒子群中,还进一步包括:根据三种模态对公式中的 ω 、 λ_g 和 λ_u 进行调整:

[0091] (1) 当演化处于状态一时,提高群体加速系数,使粒子群向收敛区域搜索,同时减小惯性系数;

[0092] (2) 演化处于状态二时,提高个体加速系数;

[0093] (3) 演化处于状态三时,粒子群算法的寻优接近尾声,不做特殊处理。

[0094] 根据三种模态,对迭代过程中的公式参数调整如下:

$$[0095] \quad \omega(t) = \begin{cases} \omega(t-1) - s_{\omega} & \text{模态一} \\ \omega(t-1) + s_{\omega} & \text{模态二} \\ \omega(t-1) & \text{模态三} \end{cases}$$

$$[0096] \quad \lambda_g(t) = \begin{cases} \lambda_g(t-1) + s_{\lambda} & \text{模态一} \\ \lambda_g(t-1) - s_{\lambda} & \text{模态二} \\ \lambda_g(t-1) & \text{模态三} \end{cases}$$

$$[0097] \quad \lambda_u(t) = \begin{cases} \lambda_u(t-1) - s_{\lambda} & \text{模态一} \\ \lambda_u(t-1) + s_{\lambda} & \text{模态二} \\ \lambda_u(t-1) & \text{模态三} \end{cases}$$

[0098] 其中, $\omega(t)$ 为第t次迭代中粒子的惯性系数, $\lambda_g(t)$ 为第t次迭代中粒子的群体加速系数, $\lambda_u(t)$ 为第t次迭代中粒子的个体加速系数, s_{ω} 为惯性调节步长, s_{λ} 为速度调节步长。

[0099] 其中,所述惯性调节步长 s_{ω} 取值范围是0.1~0.5;

[0100] 所述速度调节步长 s_{λ} 取值范围是0.1~0.5。

[0101] 本发明还进一步包括采用并行方法对步骤10步的仿真流程进行并行化,具体方法为:

[0102] S10-1:采用软件并行工具multiprocessing创建并行池,并行池的并行数为所用仿真计算机的CPU核心数减一;

[0103] S10-2:向进程池中添加需要并行的暂态仿真子进程;

[0104] S10-3:关闭进程池,并利用multiprocessing并行执行进程池中的各个子程序,直至进程池中所有子程序均完成仿真。

[0105] 本申请同时公开了一种基于前述综合负荷优化控制方法的多直流受端电网综合负荷优化控制系统,其特征在于:

[0106] 所述综合负荷优化控制系统包括多直流受端电网系统基础数据获取单元、优化控制模型生成模块、并行仿真控制单元、初始粒子生成模块、群体档案库与个体档案库更新模块、最优负荷控制方案选择模块;

[0107] 所述优化控制模型生成模块根据多直流受端电网系统基础数据获取单元上传的电网系统基础数据构建直流受端电网系统综合切负荷优化模型即优化控制模型,并上传至并行仿真控制单元;

[0108] 所述初始粒子生成模块生成初始粒子并上传至并行仿真控制单元,其中,初始粒子的初始位置为N维数组,N表示待控负荷集合中变电站的个数;

[0109] 所述并行仿真控制单元将每个粒子的位置作为一个负荷控制方案,利用电力系统仿真软件进行暂态仿真并得到仿真结果;

[0110] 群体档案库和个体档案库更新模块根据仿真结果更新群体档案和个体档案,并通过粒子群算法进行迭代;

[0111] 当达到设定的最大迭代次数后,迭代结束,将最新迭代后得到的仿真结果上传至最优负荷控制选择模块,所述最优负荷控制选择模块将适应值最小粒子的位置作为多直流受端电网系统的最优负荷控制方案。

[0112] 进一步地,

[0113] 所述基础数据获取单元通过与电力系统控制中心数据库以及电力交易市场数据库进行通信,获取电网基本信息并对优先级负荷进行统计汇总。

[0114] 所述基础数据获取单元包括电力系统基础接线数据获取模块、电力系统用户负荷与优先级获取模块、电力系统用户负荷与优先级聚合整合模块、电力系统关键线路及最大允许过载电流与容量获取模块;

[0115] 其中,电力系统基础接线数据获取模块获取多直流受端电网系统中的接线结构,确定网络拓扑;

[0116] 所述电力系统用户负荷与优先级获取模块通过与多直流受端电网系统的控制中心以及电力交易数据库进行通信,获取多直流受端电网系统中各个负荷当前负荷量与优先级;

[0117] 所述电力系统用户负荷与优先级聚合整合模块变电站出线的各优先级负荷进行统计汇总;

[0118] 所述电力系统关键线路及最大允许过载电流与容量获取模块用于确定需要比较过载量的关键线路以及最大允许过载电流与容量。

[0119] 所述并行仿真控制单元包括暂态仿真模块、动态结果分析与适应值计算模块;

[0120] 所述暂态仿真模块用于对各粒子生成的紧急切负荷方案进行暂态仿真,并输出仿真结果中的频率偏移、电压偏移、机组功角、线路功率等各种暂态指标。

[0121] 所述动态结果分析与适应值计算模块用于对暂态仿真模块中获得的暂态指标进行分析计算,并按步骤11中模型的优化目标即适应值的计算公式计算得到各粒子的适应值,优化目标为满足各约束条件下,适应值尽可能小。

[0122] 相对现有技术,本申请具有以下有益的技术效果:

[0123] 1、本申请提出了一种基于粒子群优化的多直流受端电网综合负荷优化控制方法与系统,给出了多直流受端电网综合负荷优化控制模型建模流程,能够快速、准确地得到系统最优紧急切负荷控制方案,提高系统运行的安全稳定性;

[0124] 2、本申请的技术方案,实现了综合负荷优化控制模型的快速准确求解;

[0125] 3、本申请提出的一种受端系统综合负荷优化控制系统,规定了各模块功能及实现方法。

附图说明

[0126] 图1为本申请一种多直流受端电网综合负荷优化控制方法的流程示意图;

[0127] 图2为本申请粒子群迭代过程中更新状态示意图;

[0128] 图3为本申请中对仿真流程进行并行化的流程示意图;

[0129] 图4为本申请一种多直流受端电网综合负荷优化控制系统的结构框图;

[0130] 图5为实施例中某电网拓扑结构图。

具体实施方式

[0131] 下面结合说明书附图以及具体实施例对本申请的技术方案做进一步详细介绍。

[0132] 如图1所示为本申请公开的一种多直流受端电网综合负荷优化控制方法的流程示意图所述综合负荷优化控制方法包括以下步骤：

[0133] 步骤1：确定多直流受端电网系统中所有待控负荷的控制量和优先级；

[0134] 根据不同负荷的供电可靠性要求或用户供电协议确定待控负荷的优先级。

[0135] 对于未进行电力市场改造的电力公司，根据不同负荷的供电可靠性要求确定其优先级，供电可靠性要求越高的负荷，其优先级越高，供电可靠性要求越低的负荷，其优先级越低。

[0136] 在本申请中为了使读者更好地理解技术方案，本申请将负荷分为三级，但需要说明书的是，三级负荷的分类并非是对本申请发明精神以及保护范围的限制，本领域技术人员根据本申请文件，可以按照实际需求对负荷进行适当的分级方案。

[0137] 在本申请的实施例中，一级负荷为供电可靠性要求最高的负荷，应由两个独立电源供电；二级负荷对供电可靠性要求较高，应由两回线路供电；三级负荷对供电可靠性要求最低，对供电电源无特殊要求。据此，可以利用电力公司的配电用户接线方式和具体负荷功率值确定负荷的优先级：对于采用双电源供电的负荷，赋其优先级为一级，对于采用双回线供电的负荷，赋其优先级为二级，其他负荷为三级，并相应确定各负荷的典型运行功率。

[0138] 对于已经进行电力市场改造的电力公司，根据用户供电协议确定不同用户的优先级。

[0139] 电力公司根据与用户协议商定的供电价格确定相应的供电可靠性和允许停电时间，对于不允许停电的用户，其协议供电价格最高，供电优先级最高；

[0140] 对于允许较短时间停电的用户，其协议供电价格较高，供电优先级次之；

[0141] 对于允许在一段时间内长时间停电的用户，其协议供电价格最低，供电优先级最低。

[0142] 步骤2：将多直流受端电网系统中所有待控负荷进行集中汇总，确定汇总到多直流受端电网系统中各最高电压等级变电站中的各条出线下所承载的不同优先级的负荷量。

[0143] 在具体实施例中，选取典型的380V---10kV---110kV----220kV---500kV作为不同电压等级进行介绍。同样需要说明的是，列举以上电压等级只是为了更好地介绍技术方案，而不是对保护范围的限制。事实上，我国电压等级还包括6kV/35kV/60kV/330kV/750kV 等不同的电压等级，因此具体电压等级以及基于电压等级所区分的变电站基数要根据实际分析的多直流受端电网系统来确定。

[0144] 在本申请实施例中，将变电站分成以下等级，然后所有待控负荷进行集中汇总，确定汇总到多直流受端电网系统中各最高电压等级变电站中的各条出线下所承载的不同优先级的负荷量，具体包括以下内容：S2-1：将具体用户（典型电压等级为380V）的优先级和可控量汇总至第一级变电站（典型电压等级为10kV），统计第一级变电站各出线下不同优先级负荷的负荷量；

[0145] S2-2：将第一级变电站的待控负荷优先级和控制量汇总至第二级变电站（典型电

压等级为110kV),统计第二级变电站各出线下不同优先级负荷的负荷量;

[0146] S2-3:将第二级变电站的待控负荷优先级和控制量汇总至第三级变电站(典型电压等级为220kV),统计第三级变电站各出线下不同优先级负荷的负荷量;

[0147] S2-4:将第三级变电站的待控负荷优先级和控制量汇总至第四级变电站(典型电压等级为500kV),统计第四级变电站各出线下不同优先级负荷的负荷量;

[0148] 经过S2-1~S2-4步骤后,各第四级变电站各条出线下所承载的不同优先级的负荷量即可确定,假定对于出线j,第一优先级的可控负荷量为 P_{c1} ,第k优先级的可控负荷量为 P_{ck} ,第 N_p 优先级的可控负荷量为 P_{cN_p} (第 N_p 优先级典型为三级)。

[0149] 步骤3:按照待控直流闭锁故障初步确定待控负荷集合;

[0150] 假定待控直流闭锁功率为 P_{DC} ,按照步骤S3-1~S3-4确定初步待控负荷集合:

[0151] S3-1:累加统计各第四级变电站出线第 N_p 级负荷的总量 $P_{cN_p-N_p}$,如果 $P_{cN_p-N_p} < P_{DC}$,那么进入下一步,否则退出待控负荷集合初步搜索;

[0152] S3-2:累加统计各第四级变电站出线第 N_{p-1} 和 N_p 级负荷的总量 $P_{cN_{p-1}-N_p}$,如果 $P_{cN_{p-1}-N_p} < P_{DC}$,那么进入下一步,否则退出待控负荷集合初步搜索;

[0153] S3-3:累加统计各第四级变电站出线第 N_{p-2} 至 N_p 级负荷的总量 $P_{cN_{p-2}-N_p}$,如果 $P_{cN_{p-2}-N_p} < P_{DC}$,那么进入下一步,否则退出待控负荷集合初步搜索;

[0154] S3-4:累加统计各第四级变电站出线第p至 N_p 级负荷的总量 P_{cp-N_p} ,如果 $P_{cp-N_p} < P_{DC}$,那么p减小1,并重复步骤S3-4,直至 $P_{cp-N_p} \geq P_{DC}$,退出待控负荷集合初步搜索。

[0155] 假定经上述搜索后,共需第p级至 N_p 级负荷进行控制方能满足 $P_{cp-N_p} \geq P_{DC}$,此时将所有第四级变电站的所有p至 N_p 级负荷总量分别统计出来,作为待控负荷集合。

[0156] 步骤4:确定多直流受端电网系统最大允许频率偏移量约束,包括最大允许暂态频率偏移约束和最大稳态频率偏移约束;

[0157] 可以根据实际电网的要求进行设定。

[0158] 一般情况下,可以选择系统第一轮低频减载的启动频率为最大允许暂态频率偏移约束,选择49.5Hz为系统允许最大稳态频率偏移约束。

[0159] 步骤5:确定多直流受端电网系统最大允许电压偏移约束;

[0160] 主要是最大允许暂态电压跌落约束。具体选择中,可以根据系统的各处的电压稳定极限电压确定;当系统各处的电压稳定极限电压无法确定时,可以选择0.7pu为系统最大允许电压偏移约束。步骤6:确定多直流受端电网系统各支路最大允许承载电流和功率;

[0161] 该数据需要综合考虑线路的热稳定约束、机械稳定约束和系统稳定约束等,通过各线路的设计参数获得其热稳定约束和机械稳定约束最大允许承载电流和功率,通过系统安全稳定分析确定各断面支路的最大允许承载电流和功率,将上述约束下的电压和功率上限取最小值,即可得到各支路最大允许承载电流和功率。

[0162] 步骤7:确定待比较过载量线路集合;

[0163] 为降低模型复杂度、提高综合负荷优化速度,可以对所有线路进行筛选,保留与直流闭锁故障相关的部分关键线路进行比较,从而减小待比较过载量线路集合规模。

[0164] 具体而言,可以采用步骤S7-1~S7-5进行确定:

[0165] S7-1:选择系统所有最高电压等级线路为待比较过载量线路,加入至集合;

[0166] S7-2:对于故障直流落点直接相连的非最高电压等级线路,全部加入至集合;

[0167] S7-3:对于与S7-2步所选线路的另一端母线直接相连的线路,全部加入至集合;

[0168] S7-4:对于与S7-3步所选线路的另一端母线直接相连的线路,全部加入至集合;

[0169] S7-5:对于常规安全稳定分析中构成系统关键断面的线路,全部加入至集合;如该线路已在S7-1~S7-4步中被选择,则该线路不重复加入集合。

[0170] 步骤8:建立多直流受端电网综合负荷优化控制模型:

[0171] 根据上述问题分析,本文以各变电站节点切负荷量为优化变量,以切负荷总量最小为优化目标,考虑机组功角、线路功率、母线电压等各类约束。具体优化模型如下:

$$[0172] \quad \min F = \sum_i P_i$$

$$[0173] \quad \text{s.t.} \begin{cases} \Delta \delta \leq \Delta \bar{\delta} \\ \mathbf{s} \leq \bar{\mathbf{s}} \\ \underline{\mathbf{v}} \leq \mathbf{v} \leq \bar{\mathbf{v}} \\ \underline{\mathbf{f}} \leq \mathbf{f} \\ \underline{\mathbf{P}} \leq \mathbf{P} \leq \bar{\mathbf{P}} \end{cases}$$

[0174] 其中, P_i 为第*i*个负荷的切负荷量, $\Delta \delta$ 为机组功角差向量, $\Delta \bar{\delta}$ 为机组最大功角差约束向量, \mathbf{s} 为线路视在功率向量, $\bar{\mathbf{s}}$ 为线路最大传输功率向量, \mathbf{v} 为节点电压向量, $\bar{\mathbf{v}}$ 和 $\underline{\mathbf{v}}$ 分别为节点电压的上下限约束向量, \mathbf{f} 为节点频率向量, $\underline{\mathbf{f}}$ 为各节点最低频率的门槛值向量, \mathbf{P} 为切负荷向量, $\bar{\mathbf{P}}$ 和 $\underline{\mathbf{P}}$ 分别为切负荷量的上下限约束向量。

[0175] 上述参数的进一步解释如下:切负荷向量 $\mathbf{P} = [P_1, P_2, \dots, P_N]^T$, N 为切负荷的节点数,节点频率向量 $\mathbf{f} = [f_1, f_2, \dots, f_N]^T$, f_i 为第*i*个节点频率,节点电压向量 $\mathbf{v} = [v_1, v_2, \dots, v_N]^T$, v_i 为第*i*个节点的电压值,线路功率向量 $\mathbf{s} = [s_1, s_2, \dots, s_L]^T$,其中, s_i 为第*i*条线路视在功率, L 为线路总数,功角差向量 $\Delta \delta = [\Delta \delta_1, \Delta \delta_2, \dots, \Delta \delta_{M-1}]^T$, $\Delta \delta_i$ 为第*i*台机组的功角差, M 为机组总数:

$$[0176] \quad \Delta \delta_i = \delta_i - \delta_s$$

[0177] 其中, δ_i 为第*i*台机组功角值, δ_s 为参考机组功角值。

[0178] 步骤9:生成初始粒子群。对于单一粒子的生成,粒子的初始位置是一个*N*维数组,与上面步骤中*N*的含义一致,表示步骤3中求得的待控负荷集合中变电站的个数。

[0179] 具体流程为:

[0180] S9-1:在各负荷的初始切除量 P_i ($i = 1, \dots, N$),的基础上,对各个负荷分别设置一个随机数 r_i ,且 $0.0 < r_i < 1.0$,具体生成时,以当前计算机时间为随机数种子生成上述序列;

[0181] S9-2:将 P_i 与 r_i 相乘,即得到各个负荷的切负荷量组合方案;

[0182] S9-3:重复S9-1和S9-2,直至生成 N_s 个切负荷量组合方案,即形成 N_s 个初始粒子。

[0183] 步骤10:执行机电暂态仿真,将每个粒子的位置作为一个负荷控制方案,利用电力系统仿真软件进行暂态仿真并得到仿真结果;

[0184] 以下通过一个具体仿真流程进行介绍,同样需要说明的是,目前主流电力系统仿真软件均可以获得本申请所需要的仿真结果,并满足技术方案的要求。

[0185] 在本申请的实施例中,对于每一个粒子,具体仿真流程为:

[0186] S10-1:导入仿真所需网络数据与动态数据;

[0187] S10-2:如网络参数为未收敛状态,执行潮流计算使潮流收敛;

[0188] S10-3:设置动态仿真步长为系统最小时间常数的0.5倍;

[0189] S10-4:设置动态仿真监视变量,包括各个母线频率、电压,各个同步发电机组的转子角,以及待比较过载量线路的电流和视在功率;

[0190] S10-5:执行动态仿真初始化,并仿真至0.0s时刻;

[0191] S10-6:设置直流闭锁故障,并切除直流无功补偿;

[0192] S10-7:仿真至40.0s。

[0193] 在本申请的另一个实施例中,参见附图3,为了为提高优化速度,采用并行方法对仿真流程进行并行化,具体方法为:

[0194] S10-1:采用软件并行工具multiprocessing创建并行池,并行池的并行数为所用仿真计算机的CPU核心数减一;

[0195] S10-2:向进程池中添加需要并行的暂态仿真子进程,数量为 N_s 个;

[0196] S10-3:关闭进程池,并利用multiprocessing并行执行进程池中的各个子程序,直至进程池中所有子程序均完成仿真。

[0197] 步骤11:计算粒子目标函数适应值,据步骤8建立的多直流受端电网综合负荷优化控制模型计算粒子目标函数适应值,当所有约束条件都满足时,适应值即为模型的优化目标;

[0198] 第 i 代粒子群的适应值 $F_i = [F_1, F_2, \dots, F_{N_s}]^T, i = 1, \dots, N_{\max}, N_{\max}$ 为粒子群算法的最大迭代次数。根据建立的多直流受端电网综合负荷优化控制模型,算法以切负荷总量为基础,将频率约束、电压约束和过载约束以罚函数的形式引入粒子的适应值,分析动态仿真结果,计算适应值。对功角差和切负荷量越限的方案直接予以排除,适应值计算如下:

$$[0199] \quad F = \sum_i P_i + \varepsilon_f \sum_j \Delta f_j / \sigma_j + \varepsilon_v \sum_k \Delta v_k K_v + \varepsilon_s \sum_l \Delta s_l$$

[0200] 其中, P_i 为第 i 个变电站的切负荷量, ε_f 为频率惩罚因子, Δf_j 为第 j 个机组母线频率的越限量, σ_j 为第 j 个机组的一次调频调差系数, ε_v 为电压惩罚因子, Δv_k 为第 k 个母线节点电压的越限量, K_v 为电压调节系数, ε_s 为功率惩罚因子, Δs_l 为第 l 条线路的功率越限量。当所有暂态约束都满足时,适应值即为模型的优化目标。

[0201] 其中,所述频率惩罚因子 ε_f 的取值范围为5000~10000;

[0202] 所述第 j 个机组的一次调频调差系数 σ_j 的取值为该机组的实际调差系数,一次调频调差系数 σ_j 能从优化模型数据库中获得。

[0203] 所述电压惩罚因子 ε_v 的取值范围是2000~5000;

[0204] 所述电压调节系数 K_v 的取值范围是0.5~5.0,在本申请优选实施例中,所述电压调节系数 K_v 优选为1。

[0205] 所述功率惩罚因子 ε_s 的取值范围是3000~5000。

[0206] 步骤12:更新粒子群,得到所有粒子迭代过程中最优适应值粒子的位置,以及每个粒子在迭代过程中最优适应值的位置;

[0207] 在本申请的步骤12中,使用经典的粒子群算法即可以计算得到每个粒子在迭代过程中最优适应值的位置。采用经典的粒子群算法完全能够实现本申请的技术方案,并能够解决现有技术中的问题,取得基本的技术效果。但是为了得到更快的收敛速度,本申请优选实施例从粒子群的生成和更新两个方面对紧急切负荷优化算法进行改进。具体包括以下内

容:

[0208] S12-1:构建群体档案库和个体档案库,用于储存粒子迭代过程中的历史信息,群体档案储存了所有粒子迭代过程中前 N_g 个最优适应值粒子的位置,个体档案储存了每个粒子在迭代过程中前 N_u 个最优适应值的位置。即 N_g 为群体档案库的大小, N_u 为个体档案库的大小,一般取 $N_g=N_u$ 。档案库大小不得大于粒子群个数,一般取设置粒子数的 1/2作为两档案库的大小;

[0209] 对传统粒子群算法进行改进,通过构建并监视群体档案和个体档案的状态,自适应调整粒子群算法的参数。群体档案和个体档案里的数据在初始生成时是空的,通过不断的迭代,将计算适应值后的粒子位置连同其适应值输入到库中,直至群体档案和个体档案信息储满。群体档案和个体档案都有一个大小 N_g 和 N_u ,用于储存粒子迭代过程中的历史信息。群体档案储存了所有粒子迭代过程中前 N_g 个最优适应值粒子的位置,个体档案储存了每个粒子在迭代过程中前 N_u 个最优适应值的位置。群体档案信息 R_g 和个体档案信息 R_u 的数据结构如下:

$$[0210] \quad \mathbf{R}_g = [\mathbf{p}_1, F_1] \quad [\mathbf{p}_2, F_2] \quad \dots \quad [\mathbf{p}_{N_g}, F_{N_g}]^T$$

$$[0211] \quad \mathbf{R}_u = \begin{bmatrix} [\mathbf{p}_1, F_1] \\ [\mathbf{p}_2, F_2] \\ \vdots \\ [\mathbf{p}_{N_u}, F_{N_u}] \end{bmatrix}_1 \quad \begin{bmatrix} [\mathbf{p}_1, F_1] \\ [\mathbf{p}_2, F_2] \\ \vdots \\ [\mathbf{p}_{N_u}, F_{N_u}] \end{bmatrix}_2 \quad \dots \quad \begin{bmatrix} [\mathbf{p}_1, F_1] \\ [\mathbf{p}_2, F_2] \\ \vdots \\ [\mathbf{p}_{N_u}, F_{N_u}] \end{bmatrix}_{N_s}$$

[0212] 其中, $[\mathbf{p}_i, F_i]$ 表示群体档案中储存在第 i 号位置的粒子位置和适应值构成的数据, $[\mathbf{p}_1, F_1] \quad [\mathbf{p}_2, F_2] \quad \dots \quad [\mathbf{p}_{N_u}, F_{N_u}]_j^T$ 表示个体档案中第 j 个粒子的前 N_u 个历史最优适应值与其粒子位置构成的数据。

[0213] S12-2:通过迭代过程更新粒子群;

[0214] 该算法中,单一粒子的位置向量为 \mathbf{P}_i ,速度向量为 \mathbf{v}_i ,其中, $\mathbf{P}_i = [P_1, P_2, \dots, P_N]^T \in \mathcal{R}^D$, $\mathbf{v}_i = [v_1, v_2, \dots, v_N]^T \in \mathcal{R}^D$, $i = 1, 2, \dots, N_s$, N_s 为粒子总数。对于第 i 个粒子的速度向量和位置向量,迭代过程中按如下公式更新:

$$[0215] \quad \begin{cases} \mathbf{v}(t) = \omega \mathbf{v}(t-1) + r_1 \lambda_g (\mathbf{P}_g - \mathbf{P}(t-1)) + r_2 \lambda_u (\mathbf{P}_{ui} - \mathbf{P}(t-1)) \\ \mathbf{P}(t) = \mathbf{P}(t-1) + \mathbf{v}(t) \end{cases}$$

[0216] 其中, t 为迭代次数, ω 为惯性系数, r_1 和 r_2 为 $[0, 1]$ 上均匀分布的随机数, λ_g 和 λ_u 为群体加速系数和个体加速系数, \mathbf{P}_g 为群体档案中最优适应值粒子的位置向量, \mathbf{P}_{ui} 为个体档案中第 i 个粒子历史最优适应值粒子的位置向量。

[0217] 其中,所述惯性系数 ω 取值范围是 $0 \sim 1$;

[0218] 所述群体加速系数 λ_g 取值范围是 $0.5 \sim 1$;

[0219] 所述个体加速系数 λ_u 取值范围是 $0 \sim 0.5$;

[0220] 其中群体加速系数 λ_g 与个体加速系数 λ_u 之和一般为1。

[0221] S12-3:每完成一次迭代后,更新群体档案库和个体档案库的状态。

[0222] 迭代过程中,需要不断对群体档案和个体档案进行维护。如果某些粒子的适应值

比档案数据中粒子的适应值小,则替换档案中的粒子信息,否则不进行替换。考虑群体档案的规模不大于个体档案的情况,迭代过程中,群体档案和个体档案的模式如附图2所示,:

[0223] (1) 群体档案信息被更优的粒子替换时,定义为模态一;

[0224] (2) 群体档案没有更新而个体档案发生更新时,定义为模态二;

[0225] (3) 个体档案没有发生更新时,定义为模态三;

[0226] (4) 群体档案的更新必然伴随个体档案更新,个体档案没有更新则群体档案一定也没有更新。

[0227] 本发明进一步包括:

[0228] S12-4:依据S12时获取状态的不同,对公式中的 ω 、 λ_g 和 λ_u 进行调整:(1)当演化处于状态一时,提高群体加速系数,使粒子群向收敛区域搜索,同时减小惯性系数,精确搜索且不易跳出收敛域;(2)演化处于状态二时,提高个体加速系数,使各粒子在其周围搜寻收敛域,扩大搜索范围;(3)演化处于状态三时,粒子群算法的寻优接近尾声,不做特殊处理。即参数调整公式如下:

$$[0229] \quad \omega(t) = \begin{cases} \omega(t-1) - s_\omega & \text{模态一} \\ \omega(t-1) + s_\omega & \text{模态二} \\ \omega(t-1) & \text{模态三} \end{cases}$$

$$[0230] \quad \lambda_g(t) = \begin{cases} \lambda_g(t-1) + s_\lambda & \text{模态一} \\ \lambda_g(t-1) - s_\lambda & \text{模态二} \\ \lambda_g(t-1) & \text{模态三} \end{cases}$$

$$[0231] \quad \lambda_u(t) = \begin{cases} \lambda_u(t-1) - s_\lambda & \text{模态一} \\ \lambda_u(t-1) + s_\lambda & \text{模态二} \\ \lambda_u(t-1) & \text{模态三} \end{cases}$$

[0232] 其中, $\omega(t)$ 为第t次迭代中粒子的惯性系数, $\lambda_g(t)$ 为第t次迭代中粒子的群体加速系数, $\lambda_u(t)$ 为第t次迭代中粒子的个体加速系数, s_ω 为惯性调节步长, s_λ 为速度调节步长。

[0233] 本发明优选实施例中初始惯性系数 ω 取0.2,初始群体加速系数 λ_g 和初始个体加速系数 λ_u 分别为0.7和0.3, s_ω 和 s_λ 一般取0.05,各系数的上下限都为[0,1]。

[0234] 步骤13:判断粒子群更新是否达到设定的最大迭代次数,如果没达到则返回步骤10;如果达到设定的最大迭代次数,则将适应值最小粒子的位置作为多直流受端电网综合负荷优化控制方法所得到的最优负荷控制方案。

[0235] 如附图4所示,本申请还提出了一种基于前述多直流受端电网综合负荷优化控制系统,所述综合负荷优化控制系统包括多直流受端电网系统基础数据获取单元、优化控制模型生成模块、并行仿真控制单元、初始粒子生成模块、群体档案库与个体档案库更新模块、最优负荷控制方案选择模块。

[0236] 所述基础数据获取单元通过与电力系统控制中心数据库以及电力交易市场数据库进行通信,获取电网基本信息并对优先级负荷进行统计汇总。

[0237] 其中,所述基础数据获取单元包括电力系统基础接线数据获取模块、电力系统用户负荷与优先级获取模块、电力系统用户负荷与优先级聚合整合模块、电力系统关键线路

及最大允许过载电流与容量获取模块;电力系统基础接线数据获取模块获取多直流受端电网系统中的接线结构,确定网络拓扑;所述电力系统用户负荷与优先级获取模块通过与多直流受端电网系统的控制中心以及电力交易数据库进行通信,获取多直流受端电网系统中各个负荷当前负荷量与优先级;所述电力系统用户负荷与优先级聚合整合模块变电站出线的各优先级负荷进行统计汇总;所述电力系统关键线路及最大允许过载电流与容量获取模块用于确定需要比较过载量的关键线路以及最大允许过载电流与容量。

[0238] 所述优化控制模型生成模块根据多直流受端电网系统基础数据获取单元上传的电网系统基础数据构建直流受端电网系统综合切负荷优化模型即优化控制模型,并上传至并行仿真控制单元。

[0239] 所述并行仿真控制单元包括暂态仿真模块、动态结果分析与适应值计算模块;

[0240] 其中,暂态仿真模块用于用于对各粒子生成的紧急切负荷方案进行暂态仿真,并输出仿真结果中的频率偏移、电压偏移、机组功角、线路功率等各种暂态指标;动态结果分析与适应值计算模块用于对暂态仿真模块中获得的暂态指标进行分析计算,并按步骤11中模型的优化目标即适应值的计算公式计算得到各粒子的适应值,优化目标为满足各约束条件下,适应值尽可能小。

[0241] 所述初始粒子生成模块生成初始粒子并上传至并行仿真控制单元,其中,初始粒子的初始位置为N维数组,N表示待控负荷集合中变电站的个数;所述并行仿真控制单元将每个粒子的位置作为一个负荷控制方案,利用电力系统仿真软件进行暂态仿真并得到仿真结果。

[0242] 所述群体档案库和个体档案库更新模块根据仿真结果更新群体档案和个体档案,并通过粒子群算法进行迭代;当达到设定的最大迭代次数后,迭代结束,将最新迭代后得到的仿真结果上传至最优负荷控制选择模块。

[0243] 所述最优负荷控制选择模块将适应值最小粒子的位置作为多直流受端电网系统的最优负荷控制方案。

[0244] 下面以图5所示的某省电网拓扑模型为例对本申请多直流受端电网综合负荷优化控制方法进行验证。附图5所示电网系统负荷为59.674GW,共有39台等值发电机和64个负荷,126条1000kV或500kV交流线路以及3条高压直流线路。针对某条直流双极闭锁导致损失9GW出力为例进行紧急切负荷优化控制。

[0245] 本申请优化控制方法的过程以及效果见下。

[0246] 设置迭代次数 $N_{\max}=15$,库容量 $N_L=10$ 为例,研究算法的并行效率。实验计算机搭载20个双核心的内核,可以同时进行40个线程的运算,创建进程池数 $m=40$ 。设置不同粒子数的仿真,监测每次迭代的耗时和算法总时长,并计算一次迭代的平均耗时。结果如表1所示。

[0247] 表1并行程程序的仿真时间

	粒子数	总时间(s)	迭代平均时间(s)
	1	447.20	22.36
	5	497.00	24.85
[0248]	10	638.00	31.90
	25	972.50	48.63
	30	1032.00	51.60
	40	1052.50	52.63

[0249] 结果表明,随着粒子数接近进程池数,迭代一次的耗时不断增长,当粒子数为40时,其迭代一次的耗时是粒子数为1时的2.35倍。即该并行方式下,随并行数的增加,内核的计算效率有所下降。就算法而言,采用并行方式能够明显提高效率。

[0250] 设置粒子数 $N_p=80$,迭代次数 $N_{max}=25$,库容量 $N_L=20$,进程池数 $m=40$,频率阈值49.25Hz,进行紧急切负荷优化。初始切负荷方案与部分优化结果如表2所示。其中,序号0为优化前的紧急切负荷方案,序号1~3分别为3次独立优化后的紧急切负荷方案。

[0251] 表2紧急切负荷的优化结果

	序号	最小适应值	切负荷量(MW)	最低频率 (Hz)	稳态频率(Hz)
	0	3277.51	2573.90	49.2571	49.7022
[0252]	1	2620.81	2560.41	49.2500	49.7005
	2	2618.85	2559.42	49.2500	49.7001
	3	2620.14	2560.07	49.2500	49.7004

[0253] 结果表明,该优化算法在满足各暂态稳定约束和不触发低频减载动作的条件下,对切负荷量进行了优化,且系统恢复后的稳态频率符合大容量系统的频率指标。

[0254] 申请人结合说明书附图对本发明的实施例做了详细的说明与描述,但是本领域技术人员应该理解,以上实施例仅为本发明的优选实施方案,详尽的说明只是为了帮助读者更好地理解本发明精神,而并非对本发明保护范围的限制,相反,任何基于本发明的发明精神所作的任何改进或修饰都应当落在本发明的保护范围之内。

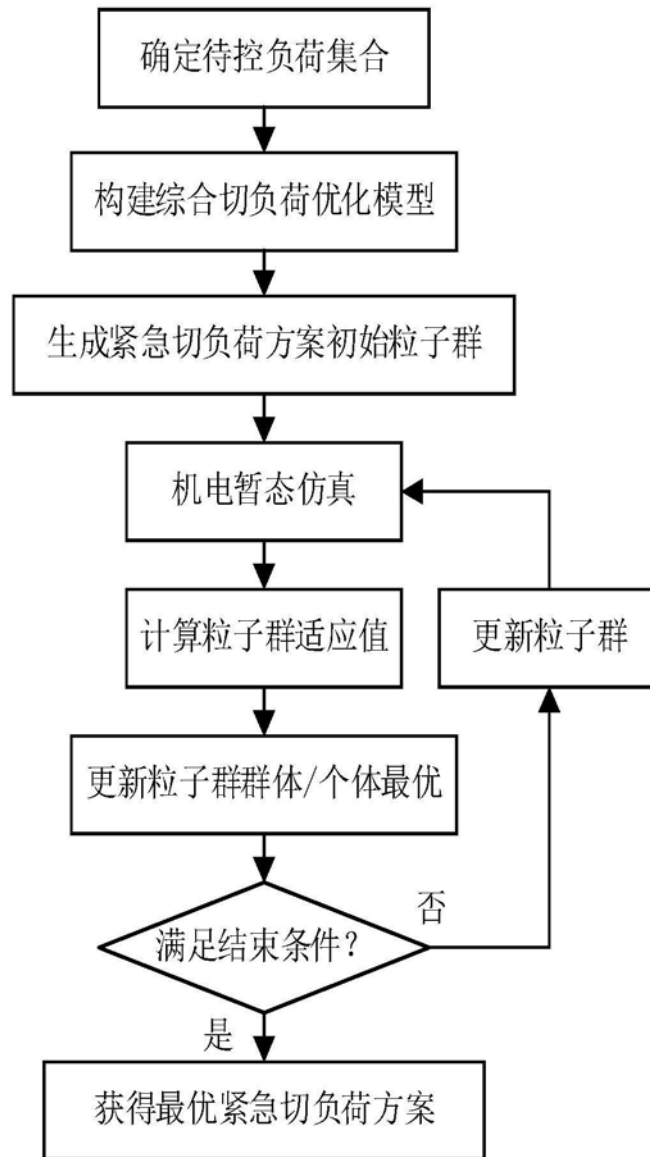


图1

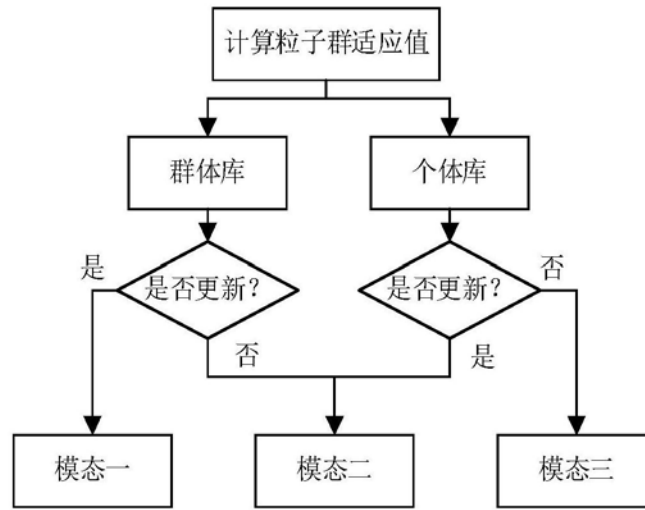


图2

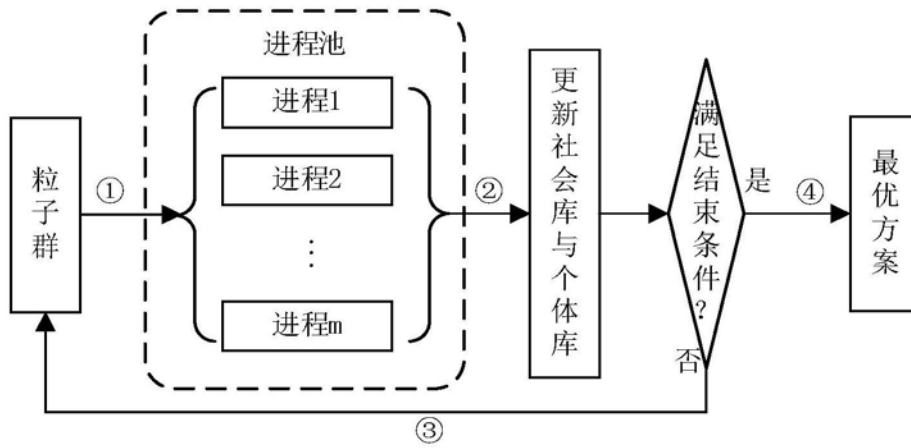


图3

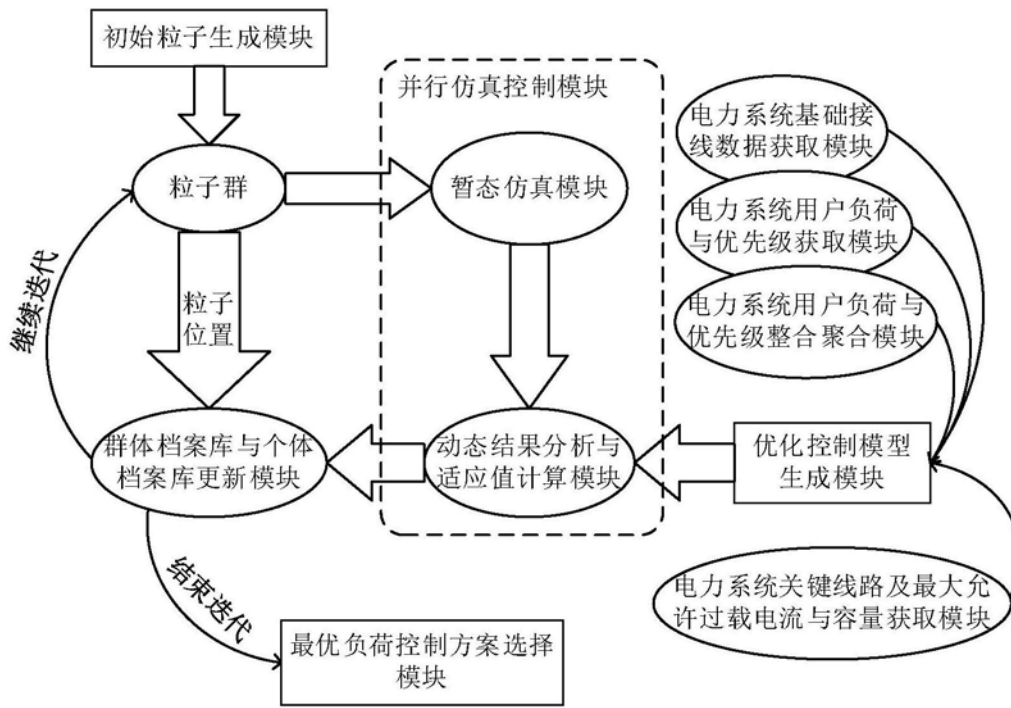


图4

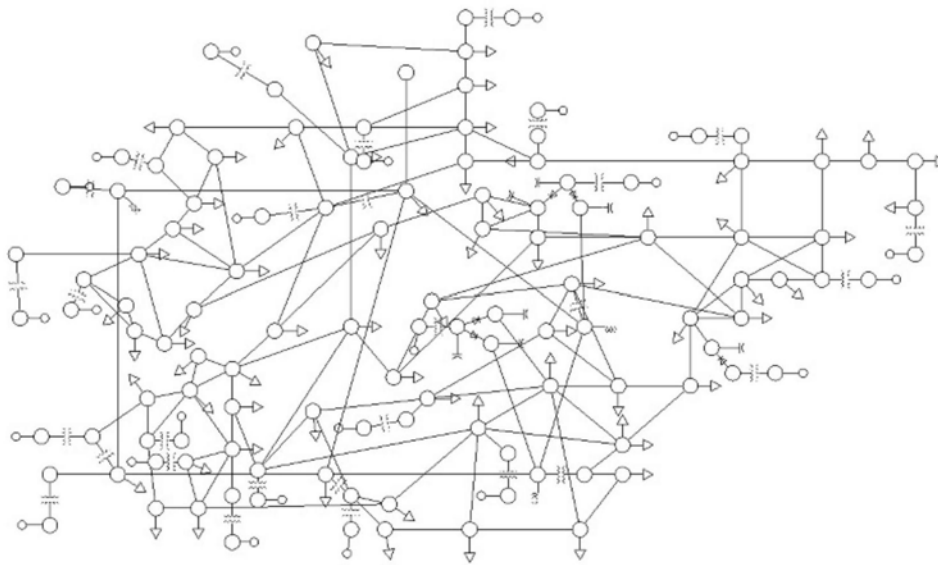


图5