

一种求解最小负荷裕度的混合算法

张峰¹,董晓明¹,梁军¹,韩学山¹,孙华²,刘宁³

(1. 山东大学 电气工程学院, 山东 济南 250061;

2. 山东劳动职业技术学院 电气及自动化系, 山东 济南 250022; 3. 山东德州供电公司, 山东 德州 253008)

摘要: 提出一种求解静态电压稳定约束条件下最小负荷裕度的混合算法。针对连续潮流算法, 提出一种快速有效的极限诱导型分岔识别方法, 计及无功补偿设备的投切对负荷裕度的影响, 利用负荷增量功率因数约束负荷增长方向, 计及发电机无功约束改进自适应步长控制策略。针对粒子群优化算法, 采用变权重系数和变学习因子策略, 提出一种早熟判据在一定的概率条件下对粒子进行变异, 结合模拟退火过程避免算法陷入局部最优。测试算例结果验证了算法的有效性。

关键词: 电力系统; 负荷裕度; 连续潮流; 模拟退火; 粒子群优化; 模型

图分类号: TM 711

文献标识码: A

DOI: 10.3969/j.issn.1006-6047.2013.09.004

0 引言

连续潮流^[1-14]CPF(Continuation Power Flow), 从已知潮流断面出发, 按照某一预先设定的模式增加发电与负荷, 计算负荷所能达到的静态电压稳定极限功率(下文称为负荷裕度), 能有效识别鞍节分岔点 SNB(Saddle Node Bifurcation)和极限诱导型分岔 LIB(Limit Induced Bifurcation), 同时计及无功调节设备的动作, 在静态电压稳定分析领域获得广泛的应用。

假设发电增长模式给定且不考虑有功限制, 则负荷裕度仅与负荷增长模式有关。文献[15]则利用 SNB 处负荷裕度与负荷增长模式的灵敏度, 修正 CPF 负荷增长方向, 计算 SNB 边界的最小负荷裕度。上述方法仅针对 SNB 边界进行了分析, 文献[16]在文献[17]的基础上进一步计及了 LIB, 综合计及 SNB 与 LIB 成为求取最小负荷裕度的算法要求。文献[18]从一个小节点算例中得到 SNB 边界非凸的结论, 针对非凸问题的全局寻优能力成为评价算法优劣的另一重要因素。

考虑到 CPF 算法在类型的识别与计及无功设备投切等方面的优势, 以及模拟退火粒子群优化^[19] SPSO(Simulated Annealing Particle Swarm Optimization)算法良好的全局寻优能力, 本文在分别对 CPF 以及 SPSO 算法进行改进的基础上, 提出了一种混合算法。在 CPF 模型中, 增加负荷增量功率因数作为负荷增长方向的约束条件; 计及无功补偿设备的投切; 提出一种 LIB 的识别算法; 改进步长控制策略。在 SPSO 算法中, 采用变权重系数^[19]与变学习因子^[19]策略; 提出基于功率增长方向夹角的早熟判据以及一种随机变异算法。在程序实现方面, 采用多线程并行技术, 充分利用计算资源提高计算速

度。算例分析表明了本文研究的有效性。

1 CPF 扩展潮流模型

CPF 扩展潮流方程如式(1)所示:

$$f_i(\mathbf{U}, \boldsymbol{\theta}, \lambda) = \begin{cases} P_{\text{B}i}(\mathbf{U}, \boldsymbol{\theta}) = P_{\text{G}i} - P_{\text{L}i} & i = 1, 2, \dots, n \\ Q_{\text{B}i}(\mathbf{U}, \boldsymbol{\theta}) = Q_{\text{G}i} - Q_{\text{L}i} \end{cases} \quad (1)$$

$$\begin{cases} P_{\text{G}i} = P_{\text{G}i(0)} + \lambda P'_{\text{G}i} \\ P_{\text{L}i} = S_{\text{L}i(0)} \cos \varphi_{\text{L}i(0)} + \lambda S'_{\text{L}i} \cos \varphi'_{\text{L}i} \\ Q_{\text{L}i} = S_{\text{L}i(0)} \sin \varphi_{\text{L}i(0)} + \lambda S'_{\text{L}i} \sin \varphi'_{\text{L}i} \end{cases} \quad (2)$$

其中, λ 反映功率增长水平; n 为除平衡节点外的节点总数; $P_{\text{B}i}$ 、 $Q_{\text{B}i}$ 为注入节点 i 的有功与无功功率; $P_{\text{G}i}$ 、 $Q_{\text{G}i}$ 为注入节点 i 的发电机有功以及无功功率; $P_{\text{L}i}$ 、 $Q_{\text{L}i}$ 为注入节点 i 的负荷有功以及无功功率; \mathbf{U} 和 $\boldsymbol{\theta}$ 分别为各节点电压幅值和相角组成的向量; $P'_{\text{G}i}$ 为节点 i 发电机有功增长比例; $S'_{\text{L}i}$ 与 $\varphi'_{\text{L}i}$ 分别为节点 i 负荷视在功率增长比例及负荷增量的功率因数角。

2 最小负荷增长模式

假设发电增长比例给定, 功率增长模式仅由负荷增长比例确定, 以负荷裕度最小为目标的优化模型如下所示:

$$\begin{aligned} \min h(\mathbf{S}, \boldsymbol{\varphi}) &= \sum_{i=1}^n \lambda_{\text{cr}i} S'_{\text{L}i} \cos \varphi'_{\text{L}i} \\ \text{s.t.} \quad \sum_{i=1}^n (S'_{\text{L}i})^2 &= 1 \end{aligned} \quad (3)$$

$$\varphi'_{\text{L}i \min} \leq \varphi'_{\text{L}i} \leq \varphi'_{\text{L}i \max}$$

$$\mathbf{S} = (S'_1 \quad S'_2 \quad \dots \quad S'_n) \quad (4)$$

$$\boldsymbol{\varphi} = (\varphi'_1 \quad \varphi'_2 \quad \dots \quad \varphi'_n) \quad (5)$$

其中, $\lambda_{\text{cr}i}$ 为分岔点对应的 λ 值; 目标函数 $h(\cdot)$ 表示负荷裕度; $\varphi'_{\text{L}i \max}$ 与 $\varphi'_{\text{L}i \min}$ 为负荷增量的功率因数角上、下限值。

为消除等式约束, 对优化模型作如下转化:

$$\begin{cases} S'_1 = \cos \omega_1 \\ S'_2 = \sin \omega_1 \cos \omega_2 \\ S'_3 = \sin \omega_1 \sin \omega_2 \cos \omega_3 \\ \vdots \\ S'_{n-1} = \sin \omega_1 \sin \omega_2 \cdots \sin \omega_{n-2} \cos \omega_{n-1} \\ S'_n = \sin \omega_1 \sin \omega_2 \cdots \sin \omega_{n-2} \sin \omega_{n-1} \end{cases} \quad (6)$$

式(4)被式(7)所示决策量替代。

$$\boldsymbol{\omega} = (\omega_1 \ \omega_2 \ \cdots \ \omega_{n-1}) \quad (7)$$

目标函数转换为:

$$\min \tilde{h}(\boldsymbol{X}) = \sum_{i=1}^n \lambda_{cr} S'_{Li} \cos \varphi'_{Li} \quad (8)$$

$$\text{s.t. } \varphi'_{Li \min} \leq \varphi'_{Li} \leq \varphi'_{Li \max}$$

$$\boldsymbol{X} = (\boldsymbol{\omega} \ \boldsymbol{\varphi}) = (x_1 \ x_2 \ \cdots \ x_{2n-1}) \quad (9)$$

3 CPF 计算过程

CPF 扩展潮流方程式(1),可简写为如下形式:

$$F(\boldsymbol{W}) = 0 \quad (10)$$

$$\boldsymbol{W} = (\boldsymbol{U} \ \boldsymbol{\theta} \ \lambda) \quad (11)$$

3.1 步长控制策略

采用切线预测方法计算预测点:

$$\boldsymbol{W}(i+1) = \boldsymbol{W}(i) + \alpha(i+1) \boldsymbol{d}_w(i) \quad (12)$$

其中, $\boldsymbol{W}(i)$ 为前一次校正过程收敛的潮流解; $\boldsymbol{d}_w(i)$ 为切线预测向量; α 为步长控制因子。

本文在文献[11]的基础上,提出如下步长控制策略:

$$\alpha(i+1) = \min \{ C(\alpha(i)), \max \{ \varepsilon_{\min}, \alpha_{\min} \} \} \quad (13)$$

其中, $C(\cdot)$ 表示文献[11]中的算法, α_{\min} 为 α 下限值。参数 ε 如式(14)所示。

$$\begin{cases} \varepsilon_{\min} = \min \{ \varepsilon_1, \varepsilon_2, \cdots, \varepsilon_v \} \\ \varepsilon_i = \frac{Q_{i \max} - Q_i}{Q_{i \max} - Q_{i(0)}} \quad i = 1, 2, \cdots, v \end{cases} \quad (14)$$

其中, v 为 PV 节点个数, $Q_{i \max}$ 、 Q_i 、 $Q_{i(0)}$ 分别为 PV 节点 i 无功的上限值、当前值、初始值。

3.2 LIB 的识别

式(12)中切向量的计算需要求解如下方程:

$$\tilde{\boldsymbol{J}} \boldsymbol{d}_w = \begin{bmatrix} \frac{\partial F}{\partial \boldsymbol{U}} & \frac{\partial F}{\partial \boldsymbol{\theta}} & \frac{\partial F}{\partial \lambda} \\ \boldsymbol{e}_{(k)} \end{bmatrix} \boldsymbol{d}_w = \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix} \quad (15)$$

其中, $\boldsymbol{e}_{(k)}$ 是第 k 个分量为 1、其余分量为零的向量,可根据文献[11]中的方法计算 k 值。常规潮流方程

雅可比矩阵 \boldsymbol{J} 为 $\tilde{\boldsymbol{J}}$ 的子阵,如式(16)所示。

$$\boldsymbol{J} = \begin{bmatrix} \frac{\partial F}{\partial \boldsymbol{U}} & \frac{\partial F}{\partial \boldsymbol{\theta}} \end{bmatrix} \quad (16)$$

对 $\tilde{\boldsymbol{J}}$ 进行 LU 分解,可得到:

$$\tilde{\boldsymbol{J}} = \begin{bmatrix} 1 & & & & \\ l_{21} & 1 & & & \\ \vdots & \vdots & \ddots & & \\ l_{n1} & l_{n2} & \cdots & 1 & \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_{11} & u_{12} & \cdots & u_{1n} \\ & u_{22} & \cdots & u_{2n} \\ & & \ddots & \vdots \\ & & & u_{nn} \end{bmatrix} \quad (17)$$

其中, l_{ij} 为下三角矩阵中元素, u_{ij} 为上三角矩阵中元素。

\boldsymbol{J} 的行列式可由下式得到:

$$\det(\boldsymbol{J}) = \frac{\det(\tilde{\boldsymbol{J}})}{u_{nn}} = \prod_{i=1}^{n-1} u_{ii} \quad (18)$$

当 PV 节点因无功限制转换为 PQ 节点后, \boldsymbol{J} 的维数增加,特征值数量增加。若出现正特征值,则转换前后 \boldsymbol{J} 的行列式如式(19)所示,出现 LIB。

$$\det(\boldsymbol{J}^{(i-1)}) \det(\boldsymbol{J}^{(i)}) > 0 \quad (19)$$

其中, $\boldsymbol{J}^{(i-1)}$ 、 $\boldsymbol{J}^{(i)}$ 分别为 PV 节点转换为 PQ 节点前、后潮流方程的雅可比矩阵。

3.3 无功补偿设备的投切

系统运行时,一般根据母线电压及功率因数是否越限调节无功补偿装置。可按如图 1 所示流程修正节点导纳矩阵。

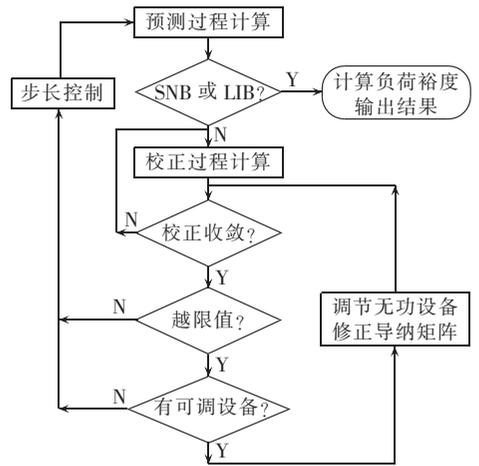


图 1 CPF 流程图

Fig.1 Flowchart of CPF

4 SAPSO 算法

对于 PSO 的每个粒子,被优化函数式(8)所决定的最小负荷裕度被称为粒子的适应值,如式(20)所示。

$$f(\boldsymbol{X}) = \min \tilde{h}(\boldsymbol{\omega}, \boldsymbol{\varphi}) \quad (20)$$

粒子 l 在 m 维空间的位置及其飞行速度可表示为式(21)与式(22)。

$$\boldsymbol{X}^l = (x_1^l \ x_2^l \ \cdots \ x_m^l) \quad (21)$$

$$\boldsymbol{V}^l = (v_1^l \ v_2^l \ \cdots \ v_m^l) \quad (22)$$

搜索过程中,粒子 l 所经历的最好的位置用式(23)表示。在总数为 q 的群体到目前为止发现的全局最优位置,用式(24)表示。

$$\boldsymbol{P}^l = (p_1^l \ p_2^l \ \cdots \ p_m^l) \quad l = 1, 2, \cdots, g, \cdots, q \quad (23)$$

$$\boldsymbol{P}^g = (p_1^g \ p_2^g \ \cdots \ p_m^g) \quad (24)$$

PSO 算法按式(25)生成粒子 $d+1$ 次迭代过程的新位置和速度。

$$\begin{cases} v_j^l(d+1) = w v_j^l(d) + c_1 r_1 [p_j^l - x_j^l(d)] + c_2 r_2 [p_j^g - x_j^l(d)] \\ x_j^l(d+1) = x_j^l(d) + v_j^l(d+1) \end{cases} \quad (25)$$

$$l=1,2,\dots,q;j=1,2,\dots,m$$

其中, w 为权重系数, c_1 和 c_2 为学习因子, r_1 和 r_2 为服从 $[0,1]$ 上均匀分布的随机数。

4.1 模拟退火操作

按式(26)定义适配值向量。

$$\begin{cases} \boldsymbol{\mu} = (\mu_1 \ \mu_2 \ \dots \ \mu_q) \\ \mu_l = \frac{e^{-\beta(f(\mathbf{P}^l) - f(\mathbf{P}^g)) / T}}{\sum_{l=1}^q e^{-\beta(f(\mathbf{P}^l) - f(\mathbf{P}^g)) / T}} \end{cases} \quad (26)$$

其中, T 为按式(27)计算的温度系数。

$$\begin{cases} T(0) = f(\mathbf{P}^g) / \ln 5 \\ T(d+1) = \beta T(d) \end{cases} \quad (27)$$

其中, β 为退火常数。

根据式(28), 选择粒子 l 的当前位置 \mathbf{X}^l 替换式(25)中的 \mathbf{P}^g , 计算粒子新的位置和速度, 其中 r 是服从 $[0,1]$ 上均匀分布的随机数。

$$\sum_{j=0}^l \mu_j \leq r \leq \sum_{j=0}^{l+1} \mu_j \quad (28)$$

在计算初始阶段, 模拟退火具有概率突跳的能力, 有效避免陷入局部最优; 在计算后期随着温度的下降, 主要围绕在全局最优粒子附近进行计算。

4.2 变权重系数与变学习因子

为提高算法的全局寻优能力, 本文采用了式(29)所示的线性递减权重方法以及式(30)所示的变学习因子算法。

$$w = w_{\max} + \frac{(w_{\min} - w_{\max})d}{d_{\max}} \quad (29)$$

$$\begin{cases} c_1 = c_{\max} + \frac{(c_{\min} - c_{\max})d}{d_{\max}} \\ c_2 = c_{\min} + \frac{(c_{\max} - c_{\min})d}{d_{\max}} \end{cases} \quad (30)$$

其中, w_{\max} 和 w_{\min} 分别为权重系数的上、下限值, c_{\max} 和 c_{\min} 分别为学习因子的上、下限值, d_{\max} 为粒子群最大迭代次数。

4.3 约束条件的处理

如果粒子 l 位置超越限值, 则保留 \mathbf{P}^l , 按照式(31)所示, 将越限分量设为上限(或下限)值, 同时将对应的粒子飞行速度分量设定为 0。

$$\begin{cases} x_j^l = x_{j\max} & x_j^l \geq x_{j\max} \\ v_j^l = 0 & \\ \\ x_j^l = x_{j\min} & x_j^l \leq x_{j\min} \\ v_j^l = 0 & \end{cases} \quad (31)$$

$$j=1,2,\dots,m$$

其中, $x_{j\max}$ 和 $x_{j\min}$ 对应式(3)中的 $\varphi'_{L,\max}$ 与 $\varphi'_{L,\min}$ 。

4.4 对于早熟的处理

$$\begin{cases} P_{Li}^l = S_{Li}^l \cos \varphi_{Li}^l \\ Q_{Li}^l = S_{Li}^l \sin \varphi_{Li}^l \end{cases} \quad (32)$$

通过式(32), 可以计算出与向量 \mathbf{X} 相对应的向

量 \mathbf{Y} , 如式(33)所示:

$$\begin{cases} \mathbf{Y} = (\mathbf{Y}_1 \ \mathbf{Y}_2) \\ \mathbf{Y}_1 = (P_{L1}^l \ P_{L2}^l \ \dots \ P_{Ln}^l) \\ \mathbf{Y}_2 = (Q_{L1}^l \ Q_{L2}^l \ \dots \ Q_{Ln}^l) \end{cases} \quad (33)$$

当式(34)所示指标 ρ 大于限值 ρ_{\max} 时, 则认为出现早熟。式(34)中, \mathbf{Y}^l 和 \mathbf{Y}^g 分别对应 \mathbf{X}^l 和 \mathbf{P}^g 。

$$\rho = \sum_{l=1}^n \frac{\mathbf{Y}^l \mathbf{Y}^g}{\|\mathbf{Y}^l\|_2 \|\mathbf{Y}^g\|_2} \quad (34)$$

若出现早熟, 则对各个粒子生成服从 $[0,1]$ 均匀分布的随机数 r' , 若 r' 满足式(35)则保留该粒子的个体最优解, 重新随机生成粒子 l 的位置和速度。

$$r' > \frac{d}{d_{\max}} \quad (35)$$

4.5 并行计算的处理

在 PSO 算法每次迭代过程中, 都需要对各粒子进行适应值计算, 如图 2 计算流程所示。常规方法是顺序循环执行粒子的计算任务, 而本文在程序设计时利用了各粒子的计算任务相对独立的特点, 为各粒子的计算分别建立线程, 由操作系统选择空闲 CPU 并发线程计算, 各线程以共享内存的形式分享粒子的个体经验和群体经验, 可以有效提高计算资源的占用, 节省计算时间。

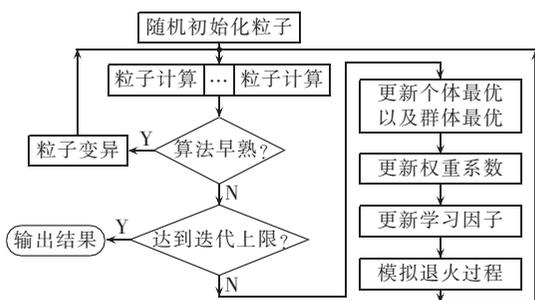


图 2 SAPSO 流程图

Fig.2 Flowchart of SAPSO

5 算例分析

5.1 环境参数

程序的编写、调试与运行的软、硬件环境如表 1 所示。

表 1 算例的软、硬件环境

Tab.1 Software and hardware environment of case study

| 软件 | 硬件 |
|--------------------------|--------------------------|
| 编程语言: C#.net | CPU: AMD X4 955(四核心) |
| 编程环境: Visual Studio 2010 | 内存: 8 G(主频 1333 Hz, 双通道) |
| 运行平台: .net Framework 4.0 | 硬盘: 5900 r/s, 缓存 32 M |
| 操作系统: Windows 7(64 位) | |

5.2 算例 1

图 3 为 IEEE 5 节点测试系统, 图中所有数据均与标么值(系统基准功率 100 MW)。

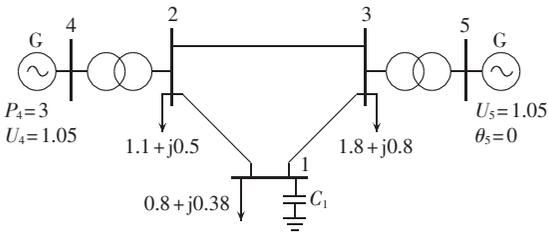


图 3 IEEE 5 节点测试系统接线图

Fig.3 Connection diagram of IEEE 5-bus test system

节点 5 是平衡节点;PV 节点 4 的有功功率保持恒定,无功功率上限 1.8 p.u.;并联电容器 C_1 ,容抗绝对值 0.018 p.u.,初始状态为切除。功率因数角约束如式(36)所示,其余计算参数如表 2 所示。

$$0.9\varphi_{Li(0)} \leq \Delta\varphi_{Li} \leq 1.1\varphi_{Li(0)} \quad (36)$$

表 2 计算参数

Tab.2 Calculation parameters

| w_{min} | w_{max} | c_{min} | c_{max} | ρ_{max} | q | d_{max} | β |
|-----------|-----------|-----------|-----------|--------------|-----|-----------|---------|
| 0.5 | 0.9 | 1.05 | 3.05 | 0.9 | 30 | 100 | 0.9 |

应用本文混合算法,反复计算 5 次的平均耗时为 4.6 s,算例表现出较好的收敛性,目标值随迭代次数的增加不断逼近最优值,如图 4 所示,图中最小负荷裕度为标么值。

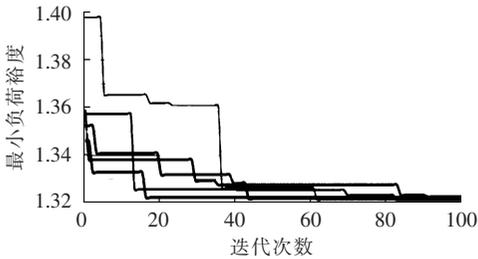


图 4 迭代计算过程

Fig.4 Process of iterative calculation

最小负荷裕度及其对应的负荷节点功率增量如表 3 所示,表中数据均为标么值。

表 3 负荷节点有功和无功增量

Tab.3 Active and reactive power increments of load buses

| 最小负荷裕度 | $\lambda_{cr}P'_i$ | $\lambda_{cr}Q'_i$ | $\lambda_{cr}P''_i$ |
|----------|--------------------|--------------------|---------------------|
| 1.322 75 | 1.321 62 | 0.000 14 | 0.000 99 |
| 1.321 95 | 1.321 00 | 0.000 52 | 0.000 43 |
| 1.321 49 | 1.321 04 | 0.000 17 | 0.000 28 |
| 1.322 42 | 1.321 02 | 0.000 83 | 0.000 57 |
| 1.321 44 | 1.321 03 | 0.000 23 | 0.000 18 |

比较并行计算方法和常规计算方法的运算速度及其对多核 CPU 的平均占用率,如图 5 所示。

由于采用并行策略,充分利用冗余的计算资源,运算速度获得了明显的提升。

5.3 算例 2

图 6 所示系统,PV 节点有功都恒等于初始值,负荷有功增量仅由平衡节点承担,利用本文方法进

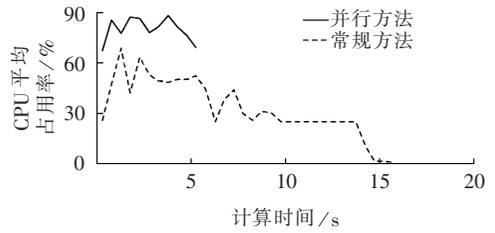


图 5 CPU 平均占用率

Fig.5 Average rate of CPU occupancy

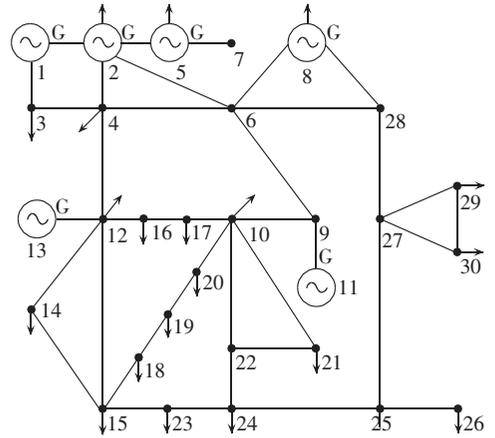


图 6 IEEE 30 节点测试系统接线图

Fig.6 Connection diagram of IEEE 30-bus test system

行最小负荷裕度分析。

计算时间 8 分 17 秒,PV 节点 2、5、8、11 和 13 由 PV 节点转换为 PQ 节点,采用本文方法对其进行识别,均未见 LIB。最终计算得到最小负荷裕度为 0.5932 p.u.(临界点类型为 SNB)。

由于篇幅限制,表 4 中仅列出负荷变化较多的部分节点的计算结果,表中数据均为标么值。可见,以节点 29 与节点 30 为首的负荷增长模式,是计及静态电压稳定的最“危险”增长模式。

表 4 最小负荷裕度对应的负荷变化

Tab.4 Load variation along with minimum load margin

| 节点编号 | $\lambda_{cr}P'_i$ | $\lambda_{cr}Q'_i$ |
|------|--------------------|--------------------|
| 30 | 0.153 9 | 0.027 8 |
| 29 | 0.111 6 | 0.046 5 |
| 12 | 0.071 4 | 0.041 9 |
| 4 | 0.045 9 | 0.010 7 |
| 20 | 0.042 8 | 0.012 2 |
| 10 | 0.042 2 | 0.013 0 |
| 24 | 0.039 3 | 0.026 3 |
| 26 | 0.038 4 | 0.024 3 |
| 14 | 0.037 0 | 0.010 2 |

6 结论

SAPSO 算法是一种实用性较强的随机搜索进化算法,能有效地避免搜索过程陷入局部极值,具有较好的全局寻优能力;CPF 算法模拟电力系统负荷增长的过程,可以有效识别各种分岔类型以及计

及无功设备的动作。本文有机结合2种算法的优势,混合算法表现出良好的收敛性,并行计算充分利用计算资源,最大限度提升算法的应用性能,算例验证了本文算法的有效性。

参考文献:

- [1] 李增国,王锐,邢卫荣. 基于连续潮流和模态分析的电压稳定分析[J]. 电力自动化设备,2009,29(9):81-84.
LI Zengguo,WANG Rui,XING Weirong. Voltage stability analysis based on continuation power flow and modal analysis [J]. Electric Power Automation Equipment,2009,29(9):81-84.
- [2] 牟晓明,李志民. 一种计算电压稳定边界的两阶段潮流方法[J]. 电力自动化设备,2013,33(3):72-77.
MOU Xiaoming,LI Zhimin. Two-stage power flow method for calculating voltage stability margin[J]. Electric Power Automation Equipment,2013,33(3):72-77.
- [3] 邱革非,束洪春,于继来. 一种提高断面功率传输能力的无功补偿方法[J]. 电力自动化设备,2009,29(1):19-23.
QIU Gefei,SHU Hongchun,YU Jilai. Var compensation enhancing interface power transmission[J]. Electric Power Automation Equipment,2009,29(1):19-23.
- [4] 随慧斌,赵建国,李可军,等. 考虑不均衡区域负荷增长的在线电压稳定评估[J]. 电力自动化设备,2011,31(3):57-61.
SUI Huibin,ZHAO Jianguo,LI Kejun,et al. On-line voltage stability assessment considering uneven growth of regional load[J]. Electric Power Automation Equipment,2011,31(3):57-61.
- [5] 许琦. “N-1”预想事故下满足静态电压稳定约束的快速ATC算法[J]. 电力自动化设备,2011,31(8):81-85.
XU Qi. Fast ATC algorithm with voltage stability constraint for N-1 contingency[J]. Electric Power Automation Equipment,2011,31(8):81-85.
- [6] 文学鸿,袁越,鞠平. 静态电压稳定负荷裕度分析方法比较[J]. 电力自动化设备,2008,28(5):59-62.
WEN Xuehong,YUAN Yue,JU Ping. Comparison between CPF and PDIP for voltage stability margin evaluation [J]. Electric Power Automation Equipment,2008,28(5):59-62.
- [7] FLUECK A J,DONDETI J R. A new continuation power flow tool for investigating the nonlinear effects of transmission branch parameter variations[J]. IEEE Trans on Power Systems,2000,15(1):223-227.
- [8] ALVES D A,da SILVA L C P,CASTRO C A,et al. Continuation fast decoupled power flow with secant predictor[J]. IEEE Trans on Power Systems,2003,18(3):1078-1085.
- [9] 王锡凡,方万良,杜正春. 现代电力系统分析[M]. 北京:科学出版社,2003.
- [10] 周双喜,朱凌志,郭锡玖,等. 电力系统电压稳定及其控制[M]. 北京:中国电力出版社,2003.
- [11] 董晓明,梁军,韩学山,等. 连续潮流参数选择及步长控制的分析与改进[J]. 电力系统自动化,2011,35(13):49-53.
DONG Xiaoming,LIANG Jun,HAN Xueshan,et al. Analysis and improvement on parameter selection strategy and step size controlling in continuation power flow[J]. Automation of Electric Power Systems,2011,35(13):49-53.
- [12] 赵晋泉,江晓东,张伯明. 一种用于静态稳定临界点的识别和计算方法[J]. 电力系统自动化,2004,28(23):28-32.
ZHAO Jinqun,JIANG Xiaodong,ZHANG Boming. Approach for identification and computation of static voltage stability critical point[J]. Automation of Electric Power Systems,2004,28(23):28-32.
- [13] 赵晋泉,张伯明. 连续潮流及其在电力系统静态稳定分析中的应用[J]. 电力系统自动化,2005,29(11):91-97.
ZHAO Jinqun,ZHANG Boming. Summarization of continuation power flow and its applications in static stability analysis of power system [J]. Automation of Electric Power Systems,2005,29(11):91-97.
- [14] 赵晋泉,王毅,李可文,等. 一种基于连续潮流的在线静态稳定综合评估方法[J]. 电力系统自动化,2010,34(4):18-22.
ZHAO Jinqun,WANG Yi,LI Kewen,et al. An on-line voltage stability composite assessment method based on continuation power flow[J]. Automation of Electric Power Systems,2010,34(4):18-22.
- [15] 陈得治,张伯明. 一种计算最小负荷裕度的实用方法[J]. 电力系统自动化,2008,32(16):1-5.
CHEN Dezhi,ZHANG Boming. A practical method for calculating minimum load power margin[J]. Automation of Electric Power Systems,2008,32(16):1-5.
- [16] 胡泽春,王锡凡,程浩忠. 最近电压稳定临界点的两层规划模型和信赖域算法[J]. 中国电机工程学报,2008,28(1):6-11.
HU Zechun,WANG Xifan,CHENG Haozhong. A bilevel programming formulation and trust region approach for closest critical point of voltage stability[J]. Proceedings of the CSEE,2008,28(1):6-11.
- [17] 胡泽春,王锡凡. 基于最优乘子潮流确定静态电压稳定临界点[J]. 电力系统自动化,2006,30(6):6-11.
HU Zechun,WANG Xifan. Determination of static voltage critical point based on load flow method with optimal multiplier[J]. Automation of Electric Power Systems,2006,30(6):6-11.
- [18] HISKENS I A,MAKAROV Y V T. Calculation of power system critical loading conditions[C]//Proceeding of Electrical Engineering Congress. Sydney,Australia:[s.n.],1994:185-190.
- [19] 龚纯,王正林. 精通MATLAB最优化计算[M]. 北京:电子工业出版社,2009.

作者简介:

张峰(1983-),男,山东莱芜人,讲师,博士,主要研究方向为电力系统运行与分析(E-mail:fengzhang@sdu.edu.cn);

董晓明(1980-),男,山东济南人,通讯作者,博士研究生,主要研究方向为电力系统运行与分析(E-mail:dongxiaoming@126.com);

梁军(1956-),男,山东龙口人,教授,博士研究生导师,主要研究方向为电力系统运行与分析(E-mail:liangjun@sdu.edu.cn)。

一种新型动态电压恢复器的仿真与实验

王宝安¹, 孟庆刚¹, 商 姣¹, 黄学良¹, 刘 伟²

(1. 东南大学 电气工程学院, 江苏 南京 210096; 2. 南京南瑞继保电气有限公司, 江苏 南京 211102)

摘要: 提出一种新型可连续运行动态电压恢复器, 主电路采用级联多电平结构, 电网电压经过各隔离变压器后分别进行整流, 给逆变单元的直流电容供电, 通过电容耦合方式串入电网与负载之间; 采用同相补偿法对电网电压进行幅值补偿, 并引入改进的 dq 变换直接在线计算出补偿电压。利用 PSIM 软件进行仿真分析, 并研制了实验样机。仿真及实验结果表明, 该动态电压恢复器能够快速、有效补偿电网电压跌落以及电网电压谐波, 保证了负载侧的用电质量。

关键词: 可连续运行动态电压恢复器; 级联多电平; 同相补偿法; 改进的 dq 变换; 补偿; 电压控制

中图分类号: TM 761

文献标识码: A

DOI: 10.3969/j.issn.1006-6047.2013.09.005

0 引言

随着现代工业的不断发展, 以电弧炉、电力机车为代表的各种冲击性负载大量涌现。一方面, 这些负载会带来电压跌落、电压谐波、三相不平衡等电压质量问题; 另一方面, 一些敏感负载(如电信、医疗、军事、金融等行业的微处理器、计算机)对电网电压的波动十分敏感, 若处理不当, 将会造成重大的经济损失和不良的社会影响^[1]。动态电压恢复器 DVR^[2] (Dynamic Voltage Restorer) 是一种串联型电能质量补偿装置, 能够有效减小电网电压跌落、电压谐波、三相不平衡等电压质量问题对负载造成的影响。

从 1996 年第一台 DVR 投运以来, DVR 在储能单元、逆变单元、耦合单元等主电路拓扑结构上有了很大的发展^[3]。文献[4]提出一种可连续运行的 DVR, 其直流电压通过与电网相连的 PWM 整流器

提供, 可以连续对电网电压进行补偿, 该装置采用耦合变压器和电网连接, 逆变单元产生的高次谐波会增加变压器的设计难度, 变压器的瞬间涌流问题也会给系统带来安全威胁^[5]。随着 DVR 在中高压配电网中的应用需求升级, 中高压大容量拓扑——级联 H 桥逆变单元因结构简单、易于模块化、输出电压谐波小等优点而受到青睐, 文献[6]提出一种应用于高压场合的 DVR, 逆变单元由 H 桥级联而成, 各 H 桥直流侧采用分立储能元件供电, DVR 的补偿能力会受分立储能元件的容量限制; 文献[7]研究的 DVR 拓扑, 逆变单元同样采用级联 H 桥, 三相电网电压经多绕组变压器后进行整流, 给各 H 桥直流侧供电, 这种拓扑结构不需要多余的储能元件, 但随着级联单元数的增多, 多绕组变压器的设计将变得困难。这 2 种 DVR 拓扑的逆变单元均通过电容耦合方式接入电网, 有利于节省成本以及提高系统可靠性。

本文结合现有 DVR 拓扑结构的优点, 提出一种

收稿日期: 2012-10-30; 修回日期: 2013-06-26

Hybrid algorithm to calculate minimum load margin

ZHANG Feng¹, DONG Xiaoming¹, LIANG Jun¹, HAN Xueshan¹, SUN Hua², LIU Ning³

(1. School of Electrical Engineering, Shandong University, Ji'nan 250061, China;

2. Department of Electrical and Automation, Shandong Labor Vocational and Technical College, Ji'nan 250022, China;

3. Dezhou Power Supply Company of Shandong, Dezhou 253008, China)

Abstract: A hybrid algorithm is proposed to calculate the minimum load margin under the constraint of static voltage stability. A fast and efficient method is proposed to identify the limit induced bifurcation for the continuation power flow method, which considers the impact of reactive compensation device switching on load margin, applies the power factor of load increment to constrain the direction of load growth, and takes the generator reactive constraint into account to improve the adaptive step control strategy. A variable weight coefficient and variable learning factor strategy is adopted for the particle swarm optimization method, which applies a precocity criterion to carry out the particle variance with a certain probability and combines with the simulated annealing process to prevent local optimization. Case test verifies the effectiveness of the proposed algorithm.

Key words: electric power systems; load margin; continuation power flow; simulated annealing; particle swarm optimization; models