

基于改进差异进化算法的地区电网 无功/电压实时优化控制研究

潘家和, 廖丹妮

(宜宾电业局, 四川 宜宾 644000)

摘要: 结合无功/电压实时优化控制模型提出了一种基于改进差异进化算法的地区电网无功/电压实时优化控制实现方法。该方法将差异进化算法与无功/电压控制特点相结合以改善初始种群质量、缩小寻优空间、进行“约束指导”与分群寻优提高算法的计算速度和效率。以某一实际地区电网为例进行无功/电压实时优化仿真计算,结果表明,所提算法和策略是可行、有效和实用的。

关键词: 地区电网; 无功/电压; 改进差异进化算法; 优化控制

Abstract: An approach for regional real-time var/voltage optimization control based on modified differential evolution algorithm is presented according to the real-time optimization model. Differential evolution and the characteristics of var/voltage control are combined in order to improve the quality of the initialized population, to decrease the optimization space and to improve the speed and efficiency of calculation with guide of some constraints and sub-swarm search for optimization. The proposed approach is evaluated in an actual regional power grid, and the simulation results show the feasibility and availability of the proposed algorithm and strategy.

Key words: regional power grid; voltage and reactive power; modified differential evolution; optimization control

中图分类号: TM761 文献标志码: A 文章编号: 1003-6954(2013)02-0001-05

0 引言

地区电网无功/电压实时优化控制作为智能调度的重要部分正日益受到重视。实时优化中变压器档位和电容器以整数表示,而发电机端电压以实数表示,是一个典型非线性混合整数优化问题,处理此类问题通常有两类方法:一为解析法,包括梯度法、内点法等,这些算法原理简单、求解速度快,但因其主要依靠问题的凸性寻找优化解,当系统本身不存在可行解时不能保证算法收敛,同时离散变量很难直接处理,因此对于非线性与非凸的无功/电压优化控制问题这些算法不能保证找到全局最优或次优解;二为进化算法,包括遗传算法、粒子群算法等,其克服了解析法的上述缺点,但求解时间过长和易于早熟^[1]。由 Storn R 和 Price K 于 1995 年提出的差异进化算法(differential evolution, DE)与其他进化算法相比,更为简单,计算量更小,鲁棒性更好,已被证明对实数值、多目标函数优化问题等具有很好的寻优效果^[2],为无功/电压优化问题的解决提供了

新的方法^[3-6]。

在对母线预测负荷动态分段和根据启动增量控制优化程序启停的基础上,结合地区电网无功/电压控制特点改进基本差异进化算法,运用其快速随机搜索能力进行“约束指导”与分群寻优,以期快速给出在满足运行约束条件下实现无功/电压实时控制的优化解,一天中控制设备的动作次数得到有效控制和合理分配,更适合工程应用。仿真分析某一实际地区电网,证明所提方法的可行性、有效性和实用性。

1 无功/电压实时控制模型

1.1 无功/电压实时控制数学模型

地区电网无功/电压实时控制的目标函数为

$$\min F = P_{\text{loss}}(V_G, T, Q_C) \quad (1)$$

式中 P_{loss} 为电网有功损耗; V_G 为机端电压; T 为变压器档位; Q_C 为电容器容量。约束条件为潮流约束和以下不等式约束。

$$\begin{cases} T_{j\min} \leq T_{jt} \leq T_{j\max}, j \in N_T \\ Q_{Ck\min} \leq Q_{Ckt} \leq Q_{Ck\max}, Q_{Ckt} = M_{Ck} D_{Ck}, k \in N_C \\ V_{i\min} \leq V_{it} \leq V_{i\max}, i \in N \\ Q_{Gr\min} \leq Q_{Grt} \leq Q_{Gr\max}, r \in N_G \\ S_{lw} \leq S_{lwt}, w \in N_l \end{cases} \quad (2)$$

式中 N_T 、 N_C 、 N 、 N_G 、 N_l 分别为变压器总台数、可投切电容器数、系统节点数、发电机数和输电线路数; T_{jt} 、 Q_{Ckt} 、 M_{Ck} 、 V_{it} 、 Q_{Grt} 、 S_{lwt} 分别为 t 时刻变压器 j 的档位、电容器 k 的投入容量、投入组数、节点 i 的电压幅值、发电机 r 的无功出力和输电线路 w 的视在功率。

根据无功分层分区平衡原则,地区电网与上级电网间的无功交换要受约束,因此还应加入以下不等式约束。

$$\cos\varphi_{s\min} \leq \cos\varphi_{st} \leq \cos\varphi_{s\max} \quad (3)$$

式中 $\cos\varphi_{st}$ 、 $\cos\varphi_{s\max}$ 、 $\cos\varphi_{s\min}$ 分别为 t 时刻的关口功率因数、关口功率因数上下限值。

离散型控制设备由于受制造工艺等因素限制在一天中的动作次数受到约束,而地区电网实时无功/电压优化控制存在的问题之一就在于离散型控制设备动作过于频繁。但这一约束并不严格,因此建议“有限动作次数”作为约束条件即一天中动作次数需满足如下“软约束”条件。

$$\begin{cases} \sum_{t=1}^{N_S} |M_{kt} - M_{k,t-1}| \leq M_{Ck} \\ \sum_{t=1}^{N_S} |T_{kt} - T_{k,t-1}| \leq T_{Tk} \end{cases} \quad (4)$$

式中 N_S 为当日无功/电压实时控制的启动次数; M_{kt} 为 t 时刻电容器 k 投入的电容器组数; M_{Ck} 为电容器 k 在一天中允许投切的总次数; T_{kt} 为变压器 k 第 t 时刻变压器档位, T_{Tk} 为变压器 k 在一天中允许调节的总次数。“软约束”使无功/电压实时优化控制问题变得更为复杂,成为一个具有时间与空间复杂性的非线性优化问题。

1.2 增量启动策略

无功节点集为电容器所在节点和通过变压器与其直接相连的各节点的集合,如图1中电容器 C 的无功节点集为 $\{5, 3\}$ 。电压节点集为变压器所控制的节点和与这些节点经非变压器支路相连节点的集合,如变压器 T 的电压节点集为 $\{5\}$ 。增量启动策略即为通过对各无功节点集负荷的动态融合分段求

出反应控制设备动作次数分配和各母线负荷情况的启动增量,根据各自的启动增量控制优化程序的启停。当无功节点集的无功负荷变化超过启动增量时,优化程序启动。

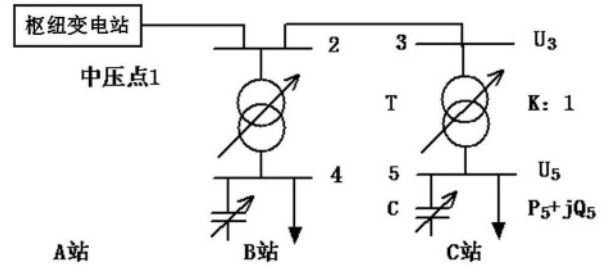


图1 电网示意图

1.3 模糊控制成本

综合考虑优化时刻所处负荷水平、控制设备动作占分配动作次数的比例、动作出现振荡的程度等因素,通过模糊推理使控制成本模糊化,更加合理地限制和分配设备的动作次数。采用以总负荷水平、动作比例和反应动作振荡程度的限振系数为输入量,而以模糊控制成本为输出量的模糊逻辑控制器,如图2所示。将单位模糊控制成本与动作次数相乘加入到目标函数中可以合理限制和分配控制设备在各控制点与各控制时段的动作次数。

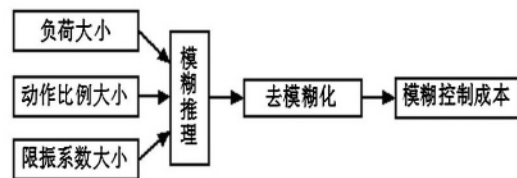


图2 模糊逻辑控制器

2 改进差异进化算法

2.1 标准 DE 算法模型

DE 算法是一种通过模拟生物进化现象(选择、杂交、变异)来表现复杂现象的概率搜索方法。Price K 推荐的首选方法为将杂交和变异直接结合起来,形成一种简洁的完整 DE 形式,如式(5)所示。

$$\begin{aligned} u'_{ij}[k] &= u_{ij}[k] + K(u_{r_3j}[k] - u_{ij}[k]) \\ &+ F(u_{r_1j}[k] - u_{r_2j}[k]) \end{aligned} \quad (5)$$

该繁衍规则虽然简单,但其为 DE 算法赋予了自适应调整和保持旋转不变性的能力。采用一种从上式的基础上衍生出来的更为简单的 DE 算法,其第 k 代繁衍规则为

$$u'_{ij}[k] = u_{ij}[k] + K(u_{bestj}[k] - u_{ij}[k]) + F(u_{r_1j}[k] - u_{r_2j}[k]) \quad (6)$$

式中 r_1, r_2 为互不相等且不等于 i 的整数, 从 $1 \sim N$ 中随机选取; K 和 F 为杂交系数和缩放系数, 通常在 $[0, 1]$ 间取值; $u_{bestj}[k]$ 标记到当前为止的最佳个体的第 j 维分量。式(6)可以认为是式(5)的“贪婪”版, 因为它引入当前最佳个体的信息来产生新个体, 指导后续搜索。虽然 $K(u_{bestj}[k] - u_{ij}[k])$ 产生的“收缩效应”可能使进化过程早熟, 但此效应也可由 $F(u_{r_1j}[k] - u_{r_2j}[k])$ 项提供的“发散效应”来平衡, 故整体上仍能保持全局搜索能力。

2.2 适应度函数

DE 算法中个体的好坏由适应度来评价, 因此适应度函数的选取至关重要。DE 在解空间是一种无约束搜索, 控制变量通过解的限制而自动满足, 等式约束则通过潮流方程得到满足。母线电压、关口功率因数等作为状态变量, 通过在目标函数中增加二次罚函数来实现。根据地区电网无功/电压实时优化控制要求, 在优化网损等的同时也应使一天中控制设备动作次数满足“软约束”要求。因此, 将表征控制设备动作代价的模糊控制成本加入目标函数, 新目标函数为

$$\begin{aligned} \min F = & P_{\text{loss}} + \lambda_1 \sum_{i=1}^N (U_{i,t} - U_{\text{lim},t})^2 \\ & + \lambda_2 \sum_{i=1}^{N_C} (Q_{i,t} - Q_{\text{lim},t})^2 + \lambda_3 \sum_{i=1}^{N_I} (S_{i,t} - S_{\text{lim},t})^2 \\ & + \lambda_4 (\cos\varphi_{s,t} - \cos\varphi_{\text{lim},t})^2 + \sum_{i=1}^{N_T} FCC_{i,t} (T_{i,t} - T_{i,t-1})^2 \\ & + \sum_{i=1}^{N_C} FCC_{i,t} (M_{i,t} - M_{i,t-1})^2 \end{aligned} \quad (7)$$

式中, $\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3, \lambda_4$ 分别为母线电压、发电机无功输出、线路潮流和关口功率因数越限罚系数; $FCC_{i,t}$ 为 t 时刻控制设备的模糊控制成本; 式(7)中 $x_{\text{lim},t}$ 由以下表达式定义。

$$x_{\text{lim},t} = \begin{cases} x_{i,t}^{\max} & \text{if } x_{i,t} > x_{i,t}^{\max} \\ x_{i,t}^{\min} & \text{if } x_{i,t} < x_{i,t}^{\min} \end{cases} \quad (8)$$

在 DE 求解中, DE 搜索具有最大适应度的解, 因此, 将最小目标函数转换成一个最大适应度函数。

$$f = K/F \quad (9)$$

式中, K 为一很大常数, 用来放大通常很小的 $1/F$ 使得个体的适应度值在一个较大范围内。

2.3 种群选取

2.3.1 定制初始种群

DE 算法初始化群体采用完全随机的方法。采

用混合编码, 将控制设备的动作量作为个体分量, 此时刻的任何动作都是在上一时段的基础上发生的, 相当于记忆了上一时段控制设备状态。因此 0 作为一个初始个体可以使 DE 记忆上一时段控制设备的优良信息。为加快 DE 算法的收敛速度, 基于无功就地平衡思想, 将无功节点集无功负荷前后时段之差分别赋值给个体中电容器分量得到 N_C 个初始个体。地区电网无功/电压控制中要求变压器档位一次调档一般不超过 3 档, 同时希望动作次数不宜过多, 故采用分别赋值给个体中变压器分量得到个初始个体。剩余个体采用 DE 方法随机初始化。

2.3.2 个体评价

地区电网属于中高压配电网, 一般不满足的条件, 故不适于高压输电网的有功无功解耦算法; 其也不完全满足辐射电网等低压配电网特征, 低压配电网的前推后代等算法也不适于地区电网的潮流计算, 故推荐使用牛顿法进行潮流计算。潮流计算时间占了智能算法时间的大半, 为提高算法效率对每一个体进行简要评价, 若合格则进入下步运算, 否则根据公式重新生成。

(1) 根据无功分层分区要求, 关口不允许向上级电网大量倒送无功, 合格个体应满足关口功率因数约束, 即满足式(10)。

$$Q_{\text{stack min}} \leq \sum_{k=1}^{N_C} Q_{Ck} \leq Q_{\text{stack}} \quad (10)$$

式中, $Q_{\text{stack min}}$ 为满足关口功率因数下限值必须提供的无功补偿量; Q_{Ck} 为电容器 k 投入的容量; Q_{stack} 为关口无功功率。

(2) 根据控制设备动作后对本地影响最大的经验对母线电压做出预估计。

如图 1 所示, 若变电站 C 的进线无功为 Q_3 , 设电容器的补偿容量为 ΔQ , V_3 近似保持不变, 忽略变压器励磁回路, 则补偿前后 V'_5 和 V_5 如式(11)和(12)所示。

$$V_5 = (V_3 - \frac{P_5 R_{T3} + Q_5 X_{T3}}{V_3}) / K_3 \quad (11)$$

$$V'_5 = (V_3 - \frac{P_5 R_{T3} + (Q_5 - \Delta Q_C) X_{T3}}{V_3}) / K'_3 \quad (12)$$

式中, R_{T3} 和 X_{T3} 为变压器支路的电阻和电抗; K'_3 为变压器调节后的变比; V'_5 为调节后的低压母线估计值。一个合格个体应满足

$$V_{i \min} - \varepsilon < V'_i < V_{i \max} + \varepsilon \quad (13)$$

式中, ε 为考虑到电压估计值误差而适当放宽电压

限值的裕度。

(3) 假设电容器 i 的单组容量为 D_C , 上时刻动作为 $x_{i,t-1}$, 无功节点集此时刻的无功负荷为 $Q_{L,t}$, 下一时刻预测负荷为 $Q_{L,t+1}$, 一般无功负荷增量主要由本地补偿, 因此下个时刻的补偿组数估计值为

$$\Delta Q_{C,t+1} = (Q_{L,t+1} - Q_{L,t}) / D_C \quad (14)$$

如果式(15)成立, 则表明电容器动作存在较大振荡, 从而认定该个体不合格。

$$\text{sgn}(x_{i,t-1}) \times \text{sgn}(x_i) = -1 \quad \text{and}$$

$$\text{sgn}(x_i) \times \text{sgn}(\Delta Q_{C,t+1}) = -1 \quad (15)$$

(4) DE 进化中后期个体差异性变小, 当个体出现在相同位置或者差异度小于 ε_x 时, 利用具有遍历与随机性的混沌算子直接初始化个体。

2.4 “约束指导”寻优

由于 DE 进化前期大量个体的随机分布使不少个体处于非可行解位置, 为了避免个体过多的在无效空间搜索, 对于造成状态变量越限的个体在式(6)中引入一个“约束指导”分量如式(16)所示。如无功节点集中的节点电压过高, 则按照就地控制原则切除一组电容器, 电压节点集中的节点电压过高则降低一档变压器档位, 反之亦然。约束指导分量快速把个体拉回到可行解空间内, 加快了 DE 的收敛。

$$u'_{ij}[k] = u'_{ij}[k] + \text{round}(\text{rand}) \times \text{sgn}(dx_j) \quad (16)$$

式中 round 为四舍五入函数; rand 为 $[0, 1]$ 内的随机数; sgn 为符号函数; dx 为“约束指导”分量。

2.5 分群寻优

为更好地解决算法的收敛性以及真正做到在各种情况下给出确定解, 这里设计了分级约束分群求解的方法, 即将约束条件分为3级, 分别为严格约束级、约束级和松弛级, 如节点电压在 $1 \sim 1.05$ p.u. 为严格约束级, 在此基础上扩大 0.02 p.u. 的电压值为约束级, 在约束级范围外即为松弛级, 如图3所示。

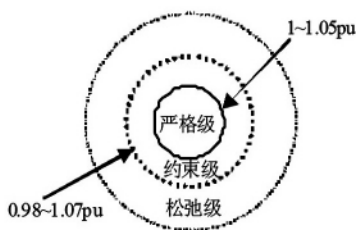


图3 分群示意图

根据不同的群体采用不同的策略以减少潮流计算量。对严格约束级, 采用高精度的潮流计算如计算误差到 10^{-5} ; 对于约束级, 则考虑低精度的潮流

计算如误差 0.5×10^{-3} ; 而对于松弛级则采用灵敏度算法^[7]。考虑到灵敏度计算为线性近似计算, 可能在某些节点出现较大的电压偏差, 故对其输出的节点电压结果利用式(12)进行简单评估, 取它们靠近约束级的电压值。通过对属于松弛级群体的个体运用灵敏度计算减少了大量的潮流计算, 提高了算法求解无功/电压优化问题的速度。

从 DE 繁衍规则可以看出, 差异项是由当前种群中随机选取的两个个体之间的差异构成的, 每一个体的变异方向是有限的, 故 DE 在繁衍中缺乏真正的随机变异操作。通过将松弛级群体中的最差个体, 直接运用混沌函数进行重新初始化操作, 利用混沌的遍历性和无规律性向群体中引入新的个体, 带来新的“差异”, 克服 DE 算法变异方向的有限性问题。

3 算例及其分析

为验证所提方法的可行性与有效性, 将某地区电网作测试, 该电网有一个 220 kV 枢纽变电站和 7 个 110 kV 变电站, 其控制范围从变电站 220 kV 进线端到 10 kV 出线端, 母线电压的上下限值分别为 1.07 和 0.97 p.u., 基准值为 100 MVA, 控制设备配置情况见表1。用 VB 语言编写程序, 在奔腾 3 G、 512 M 内存的计算机上进行仿真。优化控制前系统有功网损为 28.04 MW。应用 DE 算法和所提出的 MDE 算法进行无功/电压实时优化控制计算。由于 DE 固有的随机搜索特性导致各次计算结果可能有所不同, 因此在连续运行 20 次后给出下面的典型运行结果, 如表2所示。

表1 控制设备配置情况

| 变电站名称 | 电容器 /组 | 每组容量 /p.u. | 抽头档位范围 |
|-------|--------|------------|-----------------------|
| 古城站 | 8 | 0.096 | $8 \times \pm 1.5\%$ |
| 三星堆站 | 4 | 0.03 | $8 \times \pm 1.25\%$ |
| 向阳站 | 2 | 0.033 | $8 \times \pm 1.25\%$ |
| 雒城站 | 2 | 0.024 | $8 \times \pm 1.25\%$ |
| 大塘站 | 2 | 0.024 | $8 \times \pm 1.25\%$ |
| 广汉站 | 2 | 0.042 | $8 \times \pm 1.25\%$ |
| 炳灵宫站 | 2 | 0.036 | $3 \times \pm 2.5\%$ |
| 连山站 | 2 | 0.024 | $8 \times \pm 1.25\%$ |

从表2可以看出所提出的 MDE 算法比 DE 算法网损下降率高 3.94% , 其平均计算时间不到 20 s, 基本可以满足实时运行控制的需要。一天中电容器和变压器档位动作次数从上百次减少到十多次, 有效控制了设备的动作。另外, 设备动作次数的减少相应缩

表2 优化结果比较

| 方法 | 优化前 | DE | MDE |
|-----------------------------------|-----|-------|-------|
| 电压越限次数 (次·天 ⁻¹) | 28 | 0 | 0 |
| 功率因数越限次数 (次·天 ⁻¹) | 1 | 0 | 0 |
| 网损下降率/% | - | 12.48 | 16.42 |
| 电容器最大动作次数 (次·天 ⁻¹) | 0 | 34 | 4 |
| 电容器总动作次数 (次·天 ⁻¹) | 0 | 172 | 17 |
| 变压器最大动作次数 (次·天 ⁻¹) | 0 | 78 | 4 |
| 电容器总动作次数 (次·天 ⁻¹) | 0 | 405 | 15 |
| 计算时间/s | - | 28.40 | 15.33 |

短了实时控制中的执行时间,从而部分补偿由于采用群体智能算法而多耗费的时间。图4列出了某一电容器24时刻的投切情况,从中可以看到动作次数明显减少。图5显示了某一变压器档位调节曲线,从中也可以看到动作次数得到了有效限制。从图6可以看出MDE求出的网损曲线更低,效果更好。

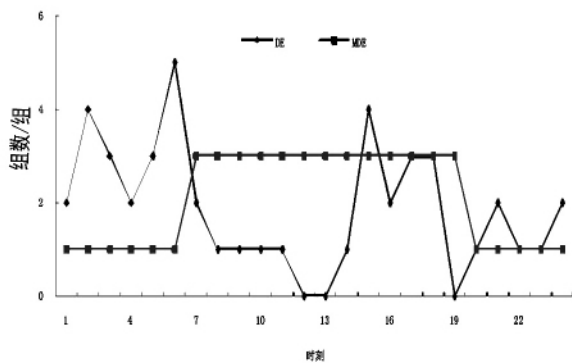


图4 电容器投入组数

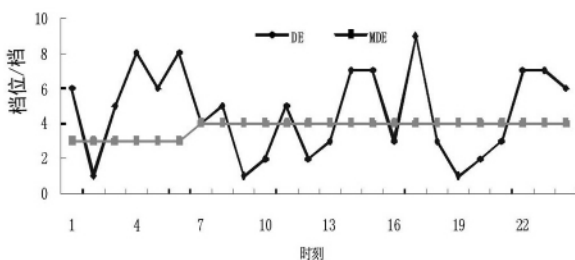


图5 变压器分接头档位动作曲线

4 结 语

(1) 将DE算法与地区电网无功/电压控制特点紧密结合进行“约束指导”和分群寻优,能加快计算

速度,提高收敛效率,合理约束控制设备动作次数。

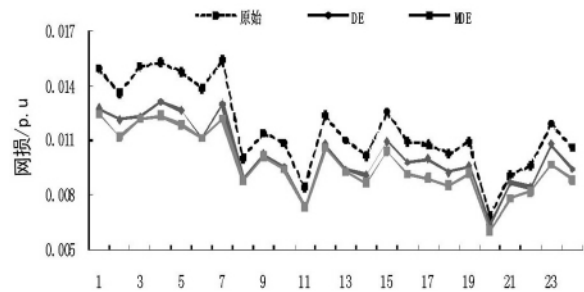


图6 网损曲线

(2) 以一天24时段负荷为例进行计算,所提方法可以轻易推广到目前电力企业所广泛采用的96甚至更多时段中。如何进一步挖掘历史和预测数据进行优化计算以进一步缩短算法时间和有效分配控制设备动作次数将是无功/电压实时优化控制今后研究的方向之一。

参 考 文 献

- [1] 许文超,郭伟. 电力系统无功优化的模型及算法综述[J]. 电力系统及其自动化学报, 2003, 15(3): 100-104.
- [2] Vesterstrom J, Thomsen R. A Comparative Study of Differential Evolution, Particle Swarm Optimization, and Evolutionary Algorithms on Numerical Benchmark Problems [C]. Congress on Evolutionary Computation, Portland, USA 2004: 1980-1987.
- [3] Alireza A, Iman T, Seyed H H. Optimal Reactive Power Dispatch in Electricity Markets Using a Multi-agent Based Differential Evolution Algorithm [C]. IEEE International Conference on Power Engineering, Energy and Electrical Drives, Setubal, Portugal 2007: 249-254.
- [4] 张丰田,宋家骅,李鉴,等. 基于混合差异进化优化算法的电力系统无功优化[J]. 电网技术, 2007, 31(9): 33-37.
- [5] Bakare G A, Krost G, Venayagamoorthy G. K, et al. Differential Evolution Approach for Reactive Power Optimization of Nigerian Grid System [C]. IEEE Power Engineering Society General Meeting, Tampa, USA 2007: 1-6.
- [6] 苏盛,段献忠,梁才浩,等. 基于差异进化算法的并行容错无功优化[J]. 电力系统自动化, 2007, 31(21): 15-19.
- [7] 刘明波,陈学军,程劲晖. 三种无功优化线性规划建模方法的比较[J]. 电力系统及其自动化学报, 1999, 11(2): 31-36.

作者简介:

潘家和(1982),男,工学硕士,工程师,主要从事电网安全稳定管理工作;

廖丹妮(1985),女,工学学士,助理工程师,主要从事电网调度工作。

(收稿日期:2012-12-19)