

# 基于万有引力搜索算法的电力系统电压无功控制策略研究

陈梓铭

(美国密歇根大学,美国 密歇根)

**摘要:** 电力系统的电压水平是供电质量的重要考核指标,而系统的电压水平受无功潮流分布影响较大。首先通过公式推导分析了发电机电压、变压器变比、母线负荷、无功补偿对系统电压的影响;其次以最小网损为目标函数,将电压水平作为约束条件,建立了电力系统电压无功控制的数学模型,并引入万有引力搜索算法(GSA)用于求解该模型;最后,以 IEEE-14 节点系统为例,分正常运行方式、负荷较重情况、机组发生故障 3 种工况进行了算例分析,结果表明提出的方法行之有效,可以为优化系统潮流分布、提高系统供电电压质量提供支持。

**关键词:** 万有引力搜索算法;电压无功控制;无功优化;控制策略

中图分类号: TM714

文献标志码: A

文章编号: 1009-0665(2016)01-0061-05

电力系统的建设与运行中,对无功电压的控制可以改善电力系统的电压稳定性与运行经济性,保证系统的供电质量,防止系统发生电压崩溃。针对电力系统中电压质量薄弱环节,开展系统性的调整与配置,着重对无功电压控制进行分区与无功优化改造,可以保证电力系统电压稳定运行,提高供电电压质量,改善电力系统整体运行经济性。国内外专家在电力系统电压无功控制领域展开了大量的研究工作<sup>[1]</sup>,提出了各种解决方案,为推进电力系统电压无功控制、提高电力系统电压合格率做出了巨大贡献。目前,电力系统电压无功控制策略主要从发电厂<sup>[2]</sup>、变电站<sup>[3,4]</sup>级和系统级<sup>[5-7]</sup>两方面展开,但系统中变压器分接头调整和无功补偿投切均为离散变量,传统的优化方法无法解决这种含离散变量和连续变量的高维非线性规划问题。针对上述问题,不少研究人员根据近年来发展迅速的人工智能算法,提出了基于粒子群<sup>[8]</sup>、遗传<sup>[9]</sup>、差分进化<sup>[10]</sup>等算法的电压无功优化,进一步推进了电压无功控制策略的优化。万有引力搜索算法(GSA)是由 Esmat Rashedi 教授于 2009 年提出的,它以万有引力定律和牛顿第二运动定律为基础,在全局范围内搜索最优解,目前该算法在励磁系统控制<sup>[11]</sup>、电力系统最优潮流<sup>[12]</sup>、水电机组预测控制<sup>[13]</sup>等方面得到有效应用,说明其具备较高实用性和适应性。因此文中尝试利用 GSA 求解电力系统电压无功控制问题,以优化电力系统无功潮流分布,从而提高电力系统电压质量。

## 1 电力系统电压影响因素分析

在电力系统中,影响电压的主要因素有发电机端电压、变压器变比、负荷容量、无功补偿容量等,以图 1 所示的 3 节点系统为例,采用控制变量法,分析各因素对电压的影响。

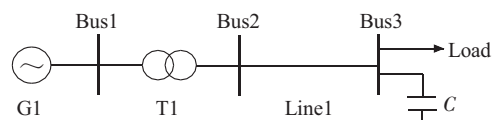


图 1 3 节点测试系统

### 1.1 发电机电压对系统电压的影响分析

此处只考虑机组出力变化对电压稳定性的影响,因此变压器变比、无功补偿、线路阻抗均维持不变,则图 1 的系统可以等效为图 2 的系统。

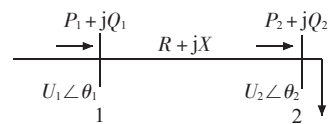


图 2 等效系统图 1

已知末端功率  $\dot{S}_2 = P_2 + jQ_2$  (将无功补偿等效到末端功率中),首端电压  $\dot{U}_1 = U_1 \angle \theta_1 = 1.05 \angle 0^\circ$ ,线路阻抗  $R + jX$ ;监测对象为末端电压  $\dot{U}_2 = U_2 \angle \theta_2$ 。这种情况下,如果想要通过已知条件求得末端电压,只能通过近似求解或者迭代求解,推导相关公式的目的是为了理清末端电压的影响因素,因此只做近似计算。

由已知条件可得线路 1-2 的电流为:

$$I = \left( \frac{\dot{S}_2}{\dot{U}_2} \right)^* \quad (1)$$

式中上标“\*”表示共轭。而线路压降可由下式表示:

$$d\dot{U} = \dot{U}_1 - \dot{U}_2 = I(R + jX) \quad (2)$$

将式(1)代入(2),可得:

$$d\dot{U} = \dot{U}_1 - \dot{U}_2 = \frac{\dot{S}_2}{\dot{U}_2} (R + jX) \quad (3)$$

为简化计算,将  $\dot{U}_2$  作为参考量,即  $\dot{U}_2 = U_2 \angle 0^\circ$ ,则式(3)可变换得到如下表达式:

$$d\dot{U} = \frac{\dot{S}_2^*}{U_2} (R+jX) = \frac{P_2-jQ_2}{U_2} (R+jX) = \frac{P_2R+Q_2X}{U_2} + j \frac{P_2X-Q_2R}{U_2} \quad (4)$$

需要说明的是,这里仅仅是为简化计算将 $\dot{U}_2$ 作为参考量,目的在于计算出 $\dot{U}_2$ 与 $\dot{U}_1$ 幅值之间的关系,在后面的潮流分析中依然会以 $\dot{U}_1$ 为参考量。

由于输电网中 $R \ll X$ ,而且功率因数一般在0.8以上,因此在计算电压幅值降落时,可以近似认为 $d\dot{U}$ 的虚部不产生影响,即得到式(5):

$$U_1 \approx U_2 + \frac{P_2R+Q_2X}{U_2} \quad (5)$$

而 $U_1, P_2, Q_2, R, X$ 均为已知量,因此可以得到关于 $U_2$ 的一元二次方程:

$$U_2^2 - U_1U_2 + P_2R + Q_2X \approx 0 \quad (6)$$

求解该一元二次方程,可得: $U_2 \approx U_1/2 \pm \sqrt{U_1^2 - 4(P_2R+Q_2X)}/2$ ,可知 $U_2$ 的解应为:

$$U_2 \approx U_1/2 + \sqrt{U_1^2 - 4(P_2R+Q_2X)}/2 \quad (7)$$

可见,主要影响 $U_2$ 的变量为 $U_1$ , $U_1$ 升高则 $U_2$ 升高,反之则降低。

## 1.2 负荷波动对系统电压的影响

同样采用控制变量法,仅调节负荷容量,研究其对系统电压产生的影响。

由式(7)可知,末端负荷功率 $\dot{S}_2 = P_2 + jQ_2$ 升高将导致末端电压 $U_2$ 降低,而且一般输电系统中 $R \ll X$ ,所以无功对电压的影响起主要作用。

## 1.3 变压器分接头调整对系统电压的影响

变压器电阻忽略不计,因此变压器变比使母线2的电压幅值变为 $KU_1$ ,但由于电抗的存在,相角变为 $\theta_2$ ,所以图1的系统可以等效为图3。

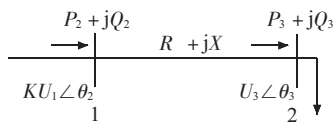


图3 等效系统图2

参照式(7),可得系统中 $U_3$ 为:

$$U_3 \approx KU_1/2 + \sqrt{K^2U_1^2 - 4(P_3R+Q_3X)}/2 \quad (8)$$

因此变比的升高,将使母线3的电压升高。

## 1.4 无功补偿变化对系统电压的影响

无功补偿的投入将会在当地消纳一部分无功负荷,实际上相当于降低了母线3的无功负荷,而由式(7)可知,末端无功负荷降低将导致末端电压 $U_2$ 升高。

## 2 GSA 简介

### 2.1 算法原理概述

GSA是在万有引力定律和牛顿第二运动定律的基础上提出的,搜索粒子由于彼此之间相互吸引而向一起聚集,从而在解空间内搜索最优解。实验结果表明,GSA在求解各种非线性问题时具有很高的优越性。

根据万有引力定律的定义,可知2个质量分别 $M_1, M_2$ ,距离 $R$ 的物体之间,存在着如下的引力:

$$F = G \frac{M_1M_2}{R^2} \quad (9)$$

式中: $F$ 表示两物体间万有引力的大小; $G$ 为引力常数。

根据牛顿第二运动定律的定义,当质量为 $M$ 的物体受到大小为 $F$ 的作用力时,将产生如下的加速度:

$$a = \frac{F}{M} \quad (10)$$

将式(9)、(10)所述的引力作用推广到多个物体之间的引力作用,物体 $M_j$ 对 $M_i$ 产生的引力为 $F_j$ ,且在多个物体的引力作用下的合力 $F = \sum F_j$ ,该合力作用下 $M_i$ 的加速度为 $a$ 。

### 2.2 算法数学描述

假设解空间为 $D$ 维空间,在该空间内生成 $N$ 个物体,用于搜索解空间内的最优解。这 $N$ 个物体的位置为 $X_i = (x_{i1}, x_{i2}, \dots, x_{iD})$ 。在时刻 $t$ ,物体 $j$ 作用在物体 $i$ 上的万有引力大小如下:

$$F_{ij}^d(t) = G(t) \frac{M_i(t) \times M_j(t)}{R_{ij}^d(t) + \varepsilon} [x_j^d(t) - x_i^d(t)] \quad (11)$$

其中 $G(t)$ 为 $t$ 时刻的万有引力常数,它随着时间发生变化,变化规律如下:

$$G(t) = G_0 e^{-\alpha \frac{t}{T}} \quad (12)$$

式中: $\alpha$ 为一个大于0的常数; $M_i(t), M_j(t)$ 分别为 $t$ 时刻物体 $i, j$ 的质量; $x_i^d(t)$ 表示 $t$ 时刻第 $i$ 个物体的第 $d$ 个分量; $\varepsilon$ 为一个比较小的常数; $R_{ij}^d(t)$ 为 $t$ 时刻物体 $i, j$ 之间的距离,其定义如下:

$$R_{ij}^d(t) = \|X_i(t) - X_j(t)\|_2 \quad (13)$$

物体所受的合力一般采用其他各物体对其引力作用的随机加权和表示:

$$F_i^d(t) = \sum_{j=1, j \neq i}^N \text{rand} g F_{ij}^d \quad (14)$$

其中 $\text{rand}$ 为0~1之间的随机数。实践发现用 $\text{rand}$ 函数可以增加物体在解空间内的搜索范围,有利于跳出局部最优解,在全局范围内寻找最优解。

得到物体 $i$ 第 $d$ 个分量 $t$ 时刻所受合力后,根据牛

顿第二定律,可以求得其在  $t$  时刻的加速度:

$$a_i^d(t) = \frac{F_i^d(t)}{M_i(t)} \quad (15)$$

其中  $M_i(t)$  为物体  $i$  在  $t$  时刻的质量,在 GSA 中,它的大小由物体的适应值求得,具体公式如下:

$$m_i(t) = \frac{f(t)_i - f_{\text{worst}}(t)}{f_{\text{best}}(t) - f_{\text{worst}}(t)} \quad (16)$$

$$M_i(t) = \frac{m_i(t)}{\sum_{j=1}^N m_j(t)} \quad (17)$$

式中:  $f_{\text{worst}}(t)$  为种群中最差个体的适应值;  $f_{\text{best}}(t)$  为最好个体的适应值。可见物体的适应值越接近最优值,其质量就越大,对其他物体的吸引力也就越大。通过式(16)、(17)计算得到的物体质量分布更加均匀合理。

类似粒子群算法的速度更新机制,根据物体的加速度对其速度进行更新:

$$v_i^d(t+1) = \text{rand} \times v_i^d(t) + a_i^d(t) \quad (18)$$

对物体的位置进行更新:

$$x_i^d(t+1) = x_i^d(t) + v_i^d(t+1) \quad (19)$$

### 3 基于 GSA 的电压无功控制

#### 3.1 数学模型

电力系统的电压无功控制问题可以看做如下的非线性规划问题:

$$\begin{cases} \min. f(x) \\ \text{s.t. } h(x) = 0 \\ \underline{g} \leq g(x) \leq \bar{g} \end{cases} \quad (20)$$

其中:  $x = [V_G, K_T, Q_C]$  为控制变量,包括发电机端电压、有载调压变压器变比、无功补偿容量;  $f(x)$  为目标函数;  $h(x)$  为等式约束;  $g(x)$  为不等式约束;  $\underline{g}, \bar{g}$  分别为不等式约束的上下限。

##### 3.1.1 目标函数

有文献将电压波动最小作为目标函数进行电压无功优化,该模型虽然在电压水平治理上取得了不错的成效,但却忽视了系统网损的优化,文中将电压水平作为约束条件处理,以有功网损最小作为目标函数,其表达式如下:

$$\min f_{\text{loss}} = \min \sum_{i \in N_G} P_{Gi} - \sum_{j \in N_B} P_{Dj} \quad (21)$$

式中:  $f_{\text{loss}}$  表示系统的有功网损;  $N_G$  为发电机编号集合;  $N_B$  为母线编号集合;  $i \in N_G$  表示  $i$  取自集合  $N_G$ ;  $j \in N_B$  表示  $j$  取自集合  $N_B$ ;  $P_{Gi}$  为发电机有功出力;  $P_{Dj}$  为母线负荷。

##### 3.1.2 等式约束

等式约束包括系统各母线的有功、无功潮流平衡方程:

$$\begin{cases} \Delta P_i = P_{Gi} - P_{Di} - V_i \sum_{j \in i} V_j (G_{ij} \cos \theta_{ij} + B_{ij} \sin \theta_{ij}) \\ \Delta Q_i = Q_{Gi} - Q_{Di} + Q_{Ci} - V_i \sum_{j \in i} V_j (G_{ij} \sin \theta_{ij} - B_{ij} \cos \theta_{ij}) \end{cases} \quad (22)$$

式中:  $j \in i$  表示母线  $i, j$  之间存在支路;  $Q_{Di}$  为母线  $i$  的负荷功率;  $V_i, V_j$  分别为母线  $i, j$  的电压幅值;  $G_{ij}, B_{ij}$  分别为母线  $i, j$  间的电导、电纳;  $\theta_{ij}$  为节点  $i, j$  的电压相角差;  $Q_{Ci}$  为节点  $i$  的无功补偿容量。

##### 3.1.3 不等式约束

不等式约束条件有发电机有功、无功出力约束、电压幅值约束和线路传输功率约束:

$$\begin{cases} \underline{P}_{Gi} \leq P_{Gi} \leq \bar{P}_{Gi} & i \in N_G \\ \underline{Q}_{Gi} \leq Q_{Gi} \leq \bar{Q}_{Gi} & i \in N_G \\ \underline{V}_i \leq V_i \leq \bar{V}_i & i \in N_B \\ \underline{P}_{bri} \leq P_{bri} \leq \bar{P}_{bri} & i \in N_{BR} \end{cases} \quad (23)$$

式中:  $P_{bri}$  为支路有功功率;  $N_{BR}$  为支路编号集合。变量符号上方的“—”和下方的“—”分别为上限和下限。

##### 3.1.4 离散变量约束

有载调压变压器变比和无功补偿容量等离散变量需要满足其运行特性,有载调压变压器的变比集合为  $1.0 \pm 1.25\% \times 8$ ,无功补偿容量范围为  $0 \sim 50$  Mvar,调节步长为 1 Mvar。

#### 3.2 求解流程

将 GSA 应用于求解 3.1 的数学模型,其具体步骤如下所示。

(1) 设定 GSA 的种群大小  $N$ 、引力常数  $G_0$ 、引力变化系数  $\alpha$ 、最终作用粒子个数  $N_{\text{final}}$  以及最大迭代次数  $K$ 。

(2) 以  $x = [V_G, K_T, Q_C]$  为求解变量,生成大小为  $N$  的种群,对每个解分别进行潮流分析,并以 3.1 中的目标函数为适应度评估函数,得到全局最优解的初值,置迭代次数  $k=0$ 。

(3) 置迭代次数  $k=k+1$ ,判断  $k < K$  是否成立,若是则继续,否则输出计算结果,退出程序。

(4) 找出种群中的最好、最差粒子适应值  $f_{\text{min}}$  和  $f_{\text{max}}$ ,按照式(16)、(17)计算个体质量。

(5) 根据式(12)求出第  $k$  次迭代时的引力常数  $G(k)$ 、式(13)计算个体间的距离、式(14)计算所有个体所受的合力。

(6) 根据式(15)计算各粒子的加速度,并根据式(18)、(19)更新粒子的速度和位置。

(7) 以各个体的位置作为控制变量进行潮流计算,以式(21)作为适应度指标计算粒子适应值,更新最优解。转(3)。

## 4 算例分析

为验证 GSA 在电压无功控制问题中的求解效果,以 IEEE-14 节点系统为例,进行算例仿真分析。IEEE-14 节点系统拓扑如图 4 所示,系统参数及初始潮流分布见文献[14]。

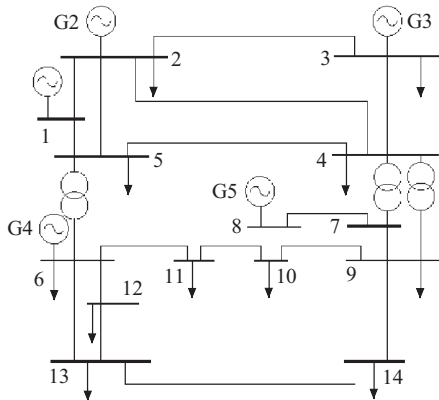


图 4 IEEE-14 节点系统拓扑

### 4.1 正常运行方式

系统运行参数、各控制变量以文献[14]参数为初值,进行正常运行方式下的电压控制策略分析。为满足系统电压水平要求,根据国网公司规定设定各母线电压约束,GSA 收敛曲线如图 5 所示。

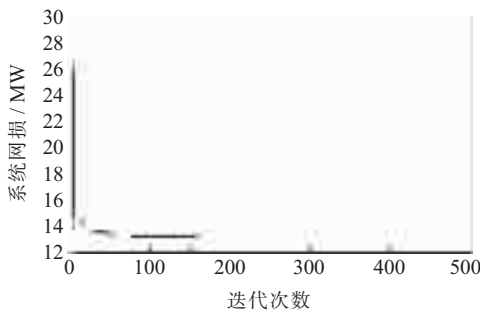


图 5 万有引力算法收敛曲线(正常运行方式)

优化前后系统各母线电压如图 6 所示,各控制变量参数如表 1 所示。

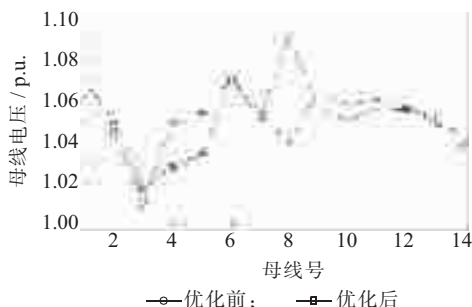


图 6 优化前后各母线电压(正常运行方式)

优化后,母线 8 的电压从 1.090 0 p.u.降为 1.070 0 p.u.,符合国网规定的电压水平要求,此外,系统网损也

表 1 优化前后各控制变量计算结果

项目	优化前	优化后
$V_{G1}/p.u.$	1.060 0	1.070 0
$V_{G2}/p.u.$	1.045 0	1.049 1
$V_{G3}/p.u.$	1.010 0	1.019 2
$V_{G4}/p.u.$	1.070 0	1.070 0
$V_{G5}/p.u.$	1.090 0	1.040 9
$K_{\alpha 1}/p.u.$	1.000 0	0.987 5
$K_{\alpha 2}/p.u.$	1.000 0	0.962 5
$K_{\alpha 3}/p.u.$	1.000 0	0.987 5
$Q_{G1}/Mvar$	19.000 0	20.000 0

从 13.385 9 MW 降低为 13.090 3 MW。可见 GSA 具备较强的寻优能力,文中提出的电压无功控制数学模型也是合理的。

### 4.2 负荷较重情况

为体现文中提出的电压无功控制策略的优势,将 IEEE-14 节点系统各母线负荷增加为初始值的 2 倍,进行算例分析。优化前后各母线电压对比如图 7 所示。

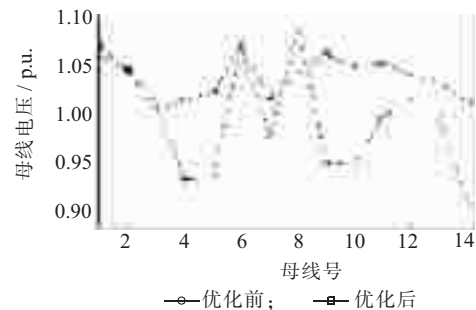


图 7 优化前后各母线电压(负荷较重情况)

优化前,母线 8 电压超过额定值的 107%,母线 14 的电压低于额定值的 93%,而经过 GSA 的优化,系统电压均处在  $(1.0 \pm 0.7)\%$  之间,且系统网损由 184.310 9 MW 降低为 67.725 7 MW,运行经济性得到较大程度的改善。

### 4.3 机组发生故障

在负荷较重的情况下,进一步考虑机组故障情况下的电压控制效果。由于 4.1、4.2 中,3 至 5 号机组处于停机状态<sup>[14]</sup>,仅 1、2 号机组发电,此时模拟机组故障无法说明问题,因此假设系统中 5 台发电机有功出力较为均衡,2 至 5 号机组有功出力均为 110 MW,1 号机组作为平衡机。分别将 2 至 5 号机组逐一停运,进行潮流计算,4 种情况下各母线电压如图 8 所示。

可见 4 号机组故障时母线电压受影响最大,因此在 4.2 节的负荷较重情况下,考虑 4 号机组故障,进行电压无功控制算例分析,电压优化结果如图 9 所示。

可见经过文中所提算法的优化,系统电压水平有了较大幅度的改善,母线 12、13、14 等不符合供电电压水平要求的现象全部得到了改善,且系统网损从 16.093 6 MW 降低为 14.218 1 MW。

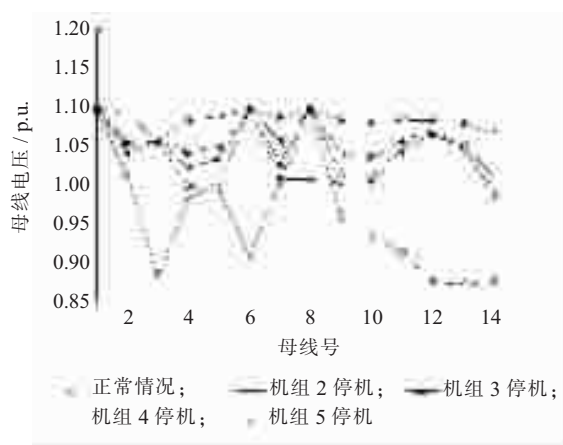


图 8 4 号机组故障前后各母线电压

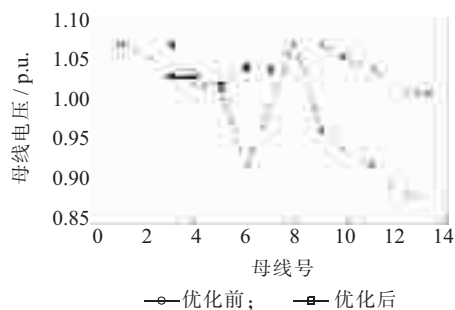


图 9 4 号机组故障时优化前后各母线电压

## 5 结束语

电力系统的电压水平关系到供电质量的好坏,而无功潮流的分布是影响电压水平的直接因素。从系统电压的影响因素入手,开展了以下工作:结合公式推导,分析了发电机电压、负荷波动、变压器分接头调整和无功补偿变化对系统电压的影响;结合影响因素分析,提出了电压无功控制策略的数学模型,引入 GSA 实现了文中所提模型的求解;以 IEEE-14 节点系统为例,对正常运行方式、负荷较重情况、机组发生故障 3 种工况进行了电压无功控制优化的算例分析,结果表明文中所提的方法效果较好、适应性强,可以为电力系统运行分析提供数据参考。

### 参考文献:

- [1] 余涛,周斌. 电力系统电压/无功控制策略研究综述[J]. 继电器,2008,36(6):79-85.
- [2] 景乾明,郝飞,刘吉臻,等. 基于厂级调度的发电厂优化控制[J]. 江苏电机工程,2012,31(1):5-8.
- [3] 张玉珠,徐文忠,付红艳,等. 结合灵敏度分析的变电站电压无功控制策略[J]. 电力系统保护与控制,2009,37(2):37-42.
- [4] 陈树恒,李兴源,刘群英,等. 基于变电站逻辑自适应的主站电压/无功控制系统[J]. 电力自动化设备,2009,29(5):57-60.
- [5] 王平,童颀,李国柱,等. 基于分布式结构的电压无功协调控制系统[J]. 江苏电机工程,2006,25(4):15-17.
- [6] 董洁,赵国伟,杜红卫,等. 配网电压无功治理技术与发展趋势[C]//中国电机工程学会电力系统自动化专业委员会第三届三次会议暨 2013 年学术交流会论文集. 2013:1-5.
- [7] 汪洋,苏义荣,张少杰,等. 一种适用于地县级电网的电压无功结合控制模式[J]. 江苏电机工程,2007,26(2):40-43.
- [8] 唐锋,谢开贵,徐锐,等. 基于粒子群和 16 控制区的无功电压优化控制技术及其应用[J]. 制造业自动化,2012,34(16):20-23,60.
- [9] 韩文庆,周志勇,王毅,等. 基于负荷预测的区域变电站电压无功综合控制的研究[J]. 电力系统保护与控制,2012,40(8):68-72.
- [10] 邱威,张建华,刘念,等. 自适应多目标差分进化算法在计及电压稳定性的无功优化中的应用[J]. 电网技术,2011,35(8):81-87.
- [11] 李超顺,周建中,肖剑,等. 基于改进引力搜索算法的励磁控制 PID 参数优化[J]. 华中科技大学学报:自然科学版,2012,40(10):119-122.
- [12] 肖儿良,林蔚,毛海军,等. 基于权值的引力搜索算法在电力系统最优潮流计算中的应用[J]. 电工电能新技术,2014,33(7):62-66.
- [13] 李超顺,周建中,肖汉,等. 基于引力搜索模糊模型辨识的水电机组预测控制[J]. 水力发电学报,2013,32(6):272-277.
- [14] ZIMMERMAN R D, MURILLO-SANCHEZ C E, GAN D D. MATPOWER: A MATLAB Power System Simulation Package [EB/OL]. <http://www.pserc.cornell.edu/matpower/>. 2015-9-17.

作者简介:

陈梓铭(1991),男,江苏泰州人,硕士在读,研究方向为电力系统自动化专业。

## Gravitational Search Algorithm Based Voltage Reactive Power Control Strategy Research

CHEN Ziming

(Automation of Electrical Power System Department, University of Michigan)

**Abstract:** The voltage level of power system is an important index to assess the quality of power supply, and is greatly influenced by the distribution of reactive power flow. Firstly, the influence of generator voltage, transformer voltage ratio, bus load and reactive power compensation on system voltage was analyzed through formula deduction. Secondly, the mathematical model of voltage/reactive power control of power system was constructed with the objective function of minimum power loss and voltage level constraint, and gravitational search algorithm was introduced to solve the model. Finally, taking IEEE-14 bus system as an example, the normal operation mode, heavy load mode and generator failure mode were analyzed, and test results showed that GSA was effective. The research achievements can provide supports for the optimization of power flow distribution and improve the quality of power supply.

**Key words:** gravitational search algorithm; voltage/reactive power control; reactive power optimization; voltage control strategy