

# 基于遗传算法的变电站电压无功综合控制

苏永春<sup>1,2</sup>, 陈星莺<sup>1</sup>, 刘存凯<sup>3</sup>

(1. 河海大学电气学院, 江苏 南京 210098; 2. 许继电气股份有限公司, 河南 许昌 461000;

3. 新乡电力勘察设计院, 河南 新乡 453002)

**摘要:** 采用常规方法进行变电站电压无功控制时, 往往使二次侧电压过于接近边界而导致系统承受负荷波动的能力大大下降, 成为系统安全运行的隐患。该文在负荷预测的基础上把遗传算法应用于变电站电压无功控制, 使主变中流过的无功功率及主变二次侧电压偏移最小。首先建立无功电压控制的求解模型, 针对其计算空间过大的特点, 引入遗传算法在全局范围内求最优解。对实例计算结果表明, 所提算法较传统方法能更有效地搜索到最优控制策略, 并使二次侧电压合格裕度有较大增加。

**关键词:** 遗传算法; 变电站; 电压无功控制

中图分类号: TM761.1 文献标识码: A 文章编号: 1003 - 4987(2002)12-0011-04

## 1 引言

变电站中的电压无功综合控制(VQC)目前已经得到了广泛的应用, 它对于在负荷和电压波动的情况下向用户提供合格的电能、最大限度地降低从系统吸收的无功从而降低网损具有重要的意义。

就目前已投入运行的设备或软件而言, 原理大多数基于固定边界或模糊边界的九域图原理法<sup>[1-2]</sup>。由于其控制判据对电压越限因素的识别能力不充分而导致自动调节判据缺陷, 因而影响整体调节性能。随着国内变电站自动化水平日益提高, 有关历史数据已可以很好地保存, 从而可进行较好的短期负荷预测, 文献[3~5]利用了历史数据进行预测来指导其控制, 改善了调节性能, 但仍无法保证其控制策略为全局最优。本文在负荷预测的基础上, 建立无功电压控制的求解模型, 利用遗传算法在全局范围内的寻优能力求取电压无功最优控制策略, 并在最后进行了算例研究和比较。

## 2 数学模型

图1中示出一个110 kV变电站的一台主变的接线图, 主变可有载调压。忽略主变的电阻与电导, 可由图2的数学模型来表征, 其中:  $Z_T$  为主变的阻抗,  $Z_C$  为电容器阻抗,  $V_1$  和  $V_2$  为主变高低压侧母线电压,  $t$  为变压器变比,  $P_b$  和  $Q_b$  为负荷有功及无功功率,  $P_T$  和  $Q_T$  为主变流出的有功及无功功率,  $Q_C$  为电容器无功功率。若  $V_2$  已知, 由图2可推导出变比  $t$  的计算公式<sup>[4]</sup>:

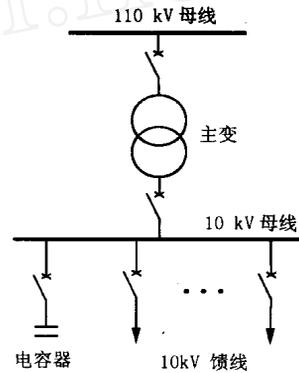


图1 一台主变的接线图

Fig. 1 Connection of one transformer

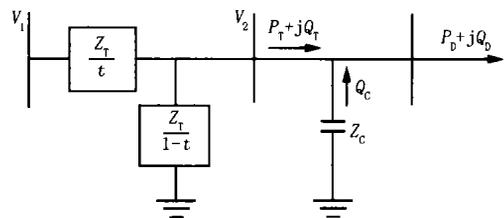


图2 主变和电容器的数学模型

Fig. 2 The mathematic model of transformer and capacitor

$$t = \left\{ \frac{|Z_T|^2}{|V_1|^2 |V_2|^2} \left[ \left( Q_b + \frac{|V_2|^2}{k|Z_T|} \right)^2 + P_b^2 \right] \right\}^{1/2} \quad (1)$$

若  $t$  为已知, 可推导出  $V_2$  的计算公式:

$$|V_2|^2 = \frac{1}{2} (k t)^2 |V_1|^2 - (k|Z_T|) Q_b + \left[ \frac{1}{4} (k t)^4 |V_1|^4 - (k|Z_T|)^2 P_b^2 - (k t)^2 (k|Z_T|) Q_b |V_1|^2 \right]^{1/2} \quad (2)$$

$$\text{式(1)、(2)中, } k = |Z_C| / (|Z_C| - |Z_T|) \quad (3)$$

当电容器断开时,  $k$  的值取 1。当变压器分接头的位置变化一档, 高压侧电压改变  $1.25\%U_N$  时, 可得到变比  $t$  与分接头档位  $TAP$  的关系式:

$$t = 1 + 0.0125 * TAP \quad (4)$$

### 3 利用遗传算法求取最优控制策略

首先建立求解模型。将研究时段一天划分为 24 个阶段, 在每一阶段引入两个控制变量  $x_i$  和  $TAP_i$  ( $i = 1, 2, \dots, 24$ ), 定义电容器的状态与分时  $x_i$  的值分别为 1 和 0。定义  $TAP_i$  为分接头的档位, 对于一个有 17 档的主变而言,  $TAP_i$  的值在  $[-8, 8]$  内取整数值。这样, 所研究的电压无功控制问题已转化为在  $x_i$ 、 $TAP_i$  可能的取值空间内的寻优问题。求解目标为: 二次侧电压  $V_{2i}$  ( $i = 1, 2, \dots, 24$ ) 尽量靠近理想值  $V_{2i}^{ideal}$ , 流经主变的无功功率尽可能小。约束条件为: 二次侧电压的限值约束、分接头及电容器的最大动作次数约束。由于求解空间非常大, 共有  $34^{24}$  种策略, 为此引入遗传算法, 利用其寻优能力求最优解。

#### 3.1 适应度函数

将二次侧电压、无功功率以及约束条件模糊化, 并把对无功的评价转化为对功率因数的评价, 定义适应度函数  $F$  为:

$$F = \sum_{i=1}^{24} \mu_{\tilde{v}_{2i}} + \sum_{i=1}^{24} \mu_{\cos_i} + \sum_{i=1}^{24} \mu_{N_{TAP}} + \sum_{i=1}^{24} \mu_{N_C} \quad (5)$$

式(5)中  $\mu_{\tilde{v}_{2i}}$ 、 $\mu_{\cos_i}$ 、 $\mu_{N_{TAP}}$ 、 $\mu_{N_C}$  为权重系数,  $\mu_{\tilde{v}_{2i}}$ 、 $\mu_{\cos_i}$ 、 $\mu_{N_{TAP}}$ 、 $\mu_{N_C}$  为隶属函数, 此时已经去掉了约束条件。

本文采用线性隶属函数, 具体如下:

模糊变量  $V_{2i}$  的隶属函数:

$$\mu_{\tilde{v}_{2i}}(x) = \begin{cases} 1 - x/V_{\max} & x < 0.05 \\ 0 & x \geq 0.05 \end{cases}$$

式中,  $V_{2i}$  为低压侧电压偏差,  $V_{\max}$  为低压侧最大允许电压偏差。

模糊变量  $\cos_i$  的隶属函数:

$$\mu_{\cos_i}(x) = \begin{cases} 5x - 4 & x > 0.8 \\ 0 & x \leq 0.8 \end{cases}$$

式中,  $\cos_i$  为主变的功率因数。

模糊变量  $N_{TAP}$  的隶属函数:

$$\mu_{N_{TAP}}(x) = \begin{cases} 1 & x < 7 \\ \frac{N_{TAP_{\max}} - x}{N_{TAP_{\max}} - 7} & 7 \leq x \leq N_{TAP_{\max}} \\ 0 & x > N_{TAP_{\max}} \end{cases}$$

式中,  $N_{TAP}$  为分接头总动作次数,  $N_{TAP_{\max}}$  为分接头最

大允许总动作次数。

模糊变量  $N_C$  的隶属函数:

$$\mu_{N_C}(x) = \begin{cases} 1 & x < 2 \\ \frac{N_{C_{\max}} - x}{N_{C_{\max}} - 2} & 2 \leq x \leq N_{C_{\max}} \\ 0 & x > N_{C_{\max}} \end{cases}$$

式中,  $N_C$  为电容器总动作次数,  $N_{C_{\max}}$  为电容器最大允许总动作次数。

#### 3.2 计算流程

首先, 对控制变量进行编码, 电容器状态采用二进制编码, 二进制数 0 和 1 代表电容器的分合, 分接头档位采取整数编码。例如, 一台主变有 17 档, 当在区间  $[1, 17]$  取均匀分布的随机整数时, 控制变量  $TAP_i$  在区间  $[-8, 8]$  内的相应位置取档位数, 计算流程如下:

- 给定每代的染色体个数、遗传代数, 以及各种变异和交叉的概率。
- 初始化, 输入变电站各种原始数据, 生成初始种群。
- 按式(6)给出的适应度函数计算群体中每一个染色体的适应度并排序。
- 判敛, 采用最优个体保留代数与最大遗传代数相结合作为中止进化判据。若收敛则输出结果, 否则继续下一步。
- 选择: 根据各染色体适应度的大小选择繁殖下一代的母体。
- 交叉: 采用模板交叉<sup>[6]</sup>。在用于繁殖的母体群中, 随机选取两个染色体, 再生成一个随机模板进行交叉。
- 变异: 对电容器基因和档位基因进行不同的处理。对于档位基因, 以一定的概率在档位基因中随机选取一个, 将该基因值变异为其取值空间上的随机整数。对电容器, 采用较小的变异概率进行同样的变异。
- 转步骤 c。

本文 GA 参数为: 初始群体规模为 200, 交叉的概率为 1, 档位基因变异的概率为 0.5, 电容器基因变异的概率为 0.1%, 结束迭代判据中最优个体保留代数为 8。

### 4 进一步减少寻优时间的几点改进措施

压缩求解空间: 按式(1)求出每一时段使二次电压保持在 1.0p.u. 的理想变比, 按式(3)求出理想档位值, 只保留与理想档位最接近的三个档位值。进

一步放大求解空间所得的最优解,与压缩后的最优解相同,表明该压缩方法是有效的。

考察无功预测数据,对于无功负荷明显大于电容器容量的时段,可把一部分原始染色体中相应的电容器基因置为 1,以改良寻优方向。

用每一代适应值最高的几个个体,替换下一代中适应值最差的几个个体,用于加速提高群体的整体适应度。

在进化初期,可采用较大的群体规模来扩大寻优方向,在进化的中后期再压缩群体规模来减少迭代时间。

在迭代初期,  $x_1、x_2$  取较小的数值,  $x_3、x_4$  取较大的数值,用于限制控制变量动作次数不超限,在迭

代后期,  $x_1、x_2$  取较大的数值,  $x_3、x_4$  取较小的数值,用于提高功率因数和促使二次侧电压偏差尽量小。

### 5 算例

变电站中各数据如下,部分数据取自文献[4]:主变容量为 40 MVA,阻抗为0.153(标么值),电容器容量为 9 Mvar,分接头最大允许总动作次数  $N_{TA Pmax}$  为 25,电容器最大允许总动作次数  $N_{Cmax}$  为 8,二次侧最大电压容许偏差为  $\pm 5\%$ ,权重系数最后取值为  $w_1 = w_2 = 5, w_3 = w_4 = 1$ ,侧重点为使主变低压侧电压保持在 1.0 p. u. 的同时主变中流过的无功尽可能小。预测的 24 h 主变高压侧电压  $V_1$ ,24 h 有功和无功负荷  $P、Q$  示于表 1 中。

表 1 算例所用的数据及计算结果

Tab.1 Used data and calculated

时段	$V_1/kV$	$P/MW$	$Q/Mvar$	$X_i$				$TAP_i$		$V_2$		COS		F	
				C		P		C	P	C	P	P	P	C	
1	108.02	6.452	- 1.697	0	0	- 1	1	0.952	1.000	0.967	4.368	9.160			
2	108.24	5.995	- 1.930	0	0	- 1	1	0.957	1.006	0.952	8.912	17.369			
3	108.57	5.657	- 2.104	0	0	- 1	0	0.965	0.989	0.937	13.797	24.676			
4	108.68	5.379	- 2.253	0	0	- 1	0	0.968	0.922	0.922	18.612	31.916			
5	108.57	5.273	- 2.214	0	0	- 1	0	0.965	0.990	0.922	23.199	38.924			
6	108.68	5.289	- 2.167	0	0	- 1	0	0.967	0.991	0.925	28.027	46.180			
7	108.47	7.047	- 1.248	0	0	0	2	0.963	1.011	0.985	33.922	54.684			
8	108.79	11.568	1.170	0	0	0	1	0.968	0.993	0.995	40.592	63.819			
9	110.44	20.398	6.136	1	1	0	- 1	1.025	0.998	0.990	47.871	73.364			
10	110.66	24.538	8.377	1	1	0	0	1.009	1.009	0.9997	56.916	82.409			
11	110.66	26.855	9.630	1	1	0	0	0.998	0.998	0.9997	66.726	92.219			
12	111.88	27.922	10.027	1	1	0	0	0.999	0.999	0.9993	76.574	102.067			
13	111.10	27.335	9.793	1	1	0	0	1.005	1.005	0.9996	86.037	111.530			
14	111.21	26.997	9.411	1	1	0	0	0.995	0.995	0.9999	95.576	121.069			
15	111.10	27.754	9.667	1	1	0	0	1.005	1.006	0.9997	104.977	130.470			
16	111.21	27.719	9.750	1	1	0	0	1.007	1.007	0.9996	114.219	139.712			
17	111.76	27.016	9.788	1	1	0	- 1	1.019	0.991	0.9995	122.342	148.798			
18	111.87	22.649	7.941	1	1	0	- 1	1.038	1.010	0.999	128.519	157.739			
19	110.99	19.615	6.151	1	1	0	- 1	1.036	1.009	0.990	134.670	166.605			
20	111.32	17.565	4.791	0	1	0	- 2	0.986	0.999	0.972	142.348	175.863			
21	111.43	16.116	4.154	0	0	0	0	0.993	0.993	0.968	150.847	184.363			
22	109.01	12.556	1.879	0	0	0	1	0.967	0.991	0.989	157.223	193.214			
23	108.02	9.039	0.419	0	0	0	1	0.966	0.991	0.999	163.819	202.240			
24	107.91	7.687	- 1.366	0	0	0	1	0.971	0.996	0.985	172.566	213.132			

根据所提出的方法求取最优策略也示于表 1 中,用 P 表示。为了便于比较,在表中同时列出了采用“十七区图”方法得出的控制策略,用 C 表示。由表 1 可知,用传统方法控制得出的主变低压侧电压在较多时段内偏移理想值较大,比较接近合格边

界,这主要是由于主变分接头没有处于最优位置的缘故。由于电压太接近边界将导致系统承受负荷波动的能力大大下降,可能造成无功电压调节设备频繁动作,这不仅增加系统的运行损耗,而且增加调度人员工作负担,成为系统安全经济运行的隐患。采

用所提出方法进行控制时,电压的偏离被控制在  $\pm 1.5\% U_N$  之内,电压质量得到了很好地保证。功率因数也保持在较高的数值,变压器分接头在一天中的总调节次数为 12,电容器的总动作次数为 2,均满足最大动作次数的约束。采用 Pentium III 计算机,找到全局最优解的迭代收敛时间平均约为 3 s。

## 6 结论

本文在短期负荷预测的基础上,提出使用遗传算法求取变电站无功电压最优控制策略。算例的结果表明了该方法在全局范围内搜索最优解的时效性和鲁棒性较传统方法更优。由于有历史数据的指导以及遗传算法强大的寻优能力,采用所提方法进行控制时,使电压合格裕度较大,从而系统的安全经济性能更高。

## 参考文献:

- [1] 周邨飞,赵金荣.电压无功控制软件及其应用[J].电力系统自动化,2000,24(9):56-59.
- [2] 孙淑信,游志成,等.大型变电站微机自动调压系统的研究[J].电力系统自动化,1995,19(7):50-54.
- [3] 杨争林,孙雅明.基于 ANN 的变电站电压和无功综合自动控制[J].电力系统自动化,1999,23(13):10-13.
- [4] Lu F C, Hsu Y Y. Reactive power/voltage control in a distribution substation using dynamic programming[J]. IEE Proceedings(Part C),1995,142(6):639-645.
- [5] Lu F C, Hsu Y Y. Fuzzy dynamic programming approach to reactive power/voltage control in a distribution substation[J]. IEEE Trans on PWRS,1997,12(2):681-688.
- [6] 周双喜,蔡虎.应用于电力系统无功优化的改进遗传算法[J].电网技术,1997,21(12):1-3.
- [7] 文劲宇,江振华,等.基于遗传算法的无功优化在鄂州电网中的实现[J].电力系统自动化,2000,24(2):45-47.

收稿日期: 2002-05-26; 改回日期: 2002-07-13

作者简介:

苏永春(1973-),男,硕士,主要从事配网无功方面电力产品的研究开发;

陈星莺(1964-),女,博士,副教授,副院长,主要从事配网自动化的研究、开发及教学工作;

刘存凯(1973-),男,工程师,主要从事 220kV 及以下变电站二次设计。

## Reactive power/voltage control in the substation based on GA

SU Yong-chun<sup>1,2</sup>, CHEN Xing-ying<sup>1</sup>, LIU Cun-kai<sup>3</sup>

(1. XI group company, Xuchang 461000, China; 2. Electric College of HoHai Univ, Nanjing 210098, China;

3. Xinxiang Electric Power Bureau, Xinxiang 453002, China

**Abstract:** Reactive power/volt control in a substation using general approach usually results in the volt in the secondary side on being too close to the boundary. It will make the ability of enduring the variation of load in a system decrease a lot and become the threat of the system. Based on the short term load-forecast, this article firstly uses genetic algorithm to calculate the optimal control schedule in a substation. The purpose is minimizing the reactive power through the transformer and the deviation of the secondary bus voltage. It constructs a model of the reactive power and volt control problem firstly and uses genetic algorithm to calculate the optimal control. An instance indicates that the proposed approach can find the optimal control more effectively than general approach and make the margin of appropriate volt in the second side increase much.

**Key words:** genetic algorithm; substation; reactive power/volt control

## 世界上第一座水下潮汐电站将在挪威投运

据《北京青年报》报道,今年 11 月底或 12 月初,世界上第一座水下潮汐发电站将在挪威的哈默菲斯特正式投入运行,届时,哈默菲斯特将成为全球第一个利用潮汐电站的城镇。该电站的投运使人类利用潮汐的梦想变成现实。