

电力市场环境下的输电网扩展规划

胡 骅¹, 虞海泓², 赵 良³, 朱炳铨³

(1. 浙江大学电气工程学院, 浙江 杭州 310027; 2. 浙江省电力设计院, 浙江 杭州 310014;
3. 浙江省电力调度通信中心, 浙江 杭州 310007)

摘要: 随着电力体制改革的深入和电力市场化的发展,大量非电力系统电源要求接入系统运行,由于传统的电网规划和建设中没有考虑到该因素,因此系统运行的可靠性和经济性上存在着隐患。针对这种情况,提出了一种基于多场景下系统运行最优化的电网扩展规划方法,不仅可以得出一个有较好适应性的规划方案,而且通过对非电力系统电源的不同出力下限的讨论,可在求得最经济的电网扩展规划方案的同时得出非电力系统电源的最大允许出力下限。算例证明了本文算法的可行性和有效性。

关键词: 电网规划; 电力市场; 场景分析; 最优潮流; 禁忌算法

中图分类号: TM73; F123.9 **文献标识码:** A **文章编号:** 1003-4897(2006)06-0039-05

0 引言

随着电力体制改革的发展和深入,形成开放的电力市场是市场化改革的必然趋势。在开放的电力市场中,所有联网成员可以共同分享全系统的发电资源和网络资源,实现系统的充分开放和完全竞争,以达到资源配置的最优化。另一方面,开放的电力市场允许用户自由选择发电商,进行双边交易,这在体现市场自由竞争的同时,会给电力系统的统一调度带来诸多困难,其中最突出的问题是电网阻塞问题,另外还有诸如无功平衡、电压等问题^[1]。

在开放的电力市场中,大量非电力系统电源(独立发电商 - Independent Power Producer, 分布式电源 - Distributed Generation)要求接入系统并参与电力市场运行,而传统的电网规划和建设并没有考虑到这些系统末端处的电源建设,由于这些电源的接入,系统可能会发生超过输电能力的潮流状态、电压越限等影响系统安全运行的情况,因此电网规划时需要灵活地考虑上述电源接入的影响,从而保证在市场环境下实现系统运行的可靠性和经济性^[2-4]。

针对上述问题,本文提出了一种基于多场景下系统运行最优化的电网扩展规划方法,不仅可以得出有较好适应性的规划方案,而且通过对非电力系统电源的不同出力下限的讨论,可以在求得最经济的电网扩展规划方案的同时得出非电力系统电源的最大允许出力下限。

1 问题的提出

一个灵活和适应性强的电网规划应该考虑负荷变化、电源位置·容量·投运·停运时期、经济发展和环境影响等诸多不确定因素,本文选取有代表性的负荷变化、非电力系统电源的出力变化作为不确定因素,通过对系统正常情况及输电线路 $N-1$ 情况下的运行分析,得出满足各项约束条件且最经济的电网扩展规划方案。

【目标函数】

$$\min F = L_{\text{cost}} + V_{\text{cost}} + \sum_{l \in S_L} d^l \text{ploss}^l \quad (1)$$

$$L_{\text{cost}} = \sum_{i \in S_T} C_i x_i \quad (2)$$

$$V_{\text{cost}} = \sum_{i \in S_B} (C_i^C C_i^{\text{new}} + C_i^C k_i^C + R_i^R R_i^{\text{new}} + R_i^R k_i^R) \quad (3)$$

$$k_i^C = \begin{cases} \left\{ \begin{array}{l} C_i^{\text{exist}} > 0 \\ C_i^{\text{exist}} = 0 \\ C_i^{\text{new}} > 0 \end{array} \right\}, & k_i^R = \begin{cases} \left\{ \begin{array}{l} R_i^{\text{exist}} > 0 \\ R_i^{\text{exist}} = 0 \\ R_i^{\text{new}} > 0 \end{array} \right\} \end{cases} \quad (4)$$

【约束条件】

$$\underline{P}_i \leq P_i^l \leq \overline{P}_i \quad (i \in S_T) \quad (5)$$

$$\underline{V}_i \leq V_i^l \leq \overline{V}_i \quad (i \in S_B) \quad (6)$$

$$(V_i^l, I_i^l) = 0 \quad (i \in S_B) \quad (7)$$

$$\underline{G}_i \leq G_i^l \leq \overline{G}_i \quad (i \in S_G) \quad (8)$$

$$\underline{T}_i \leq T_i^l \leq \overline{T}_i \quad (i \in S_F) \quad (9)$$

$$0 \leq C_i^{\text{new}} \leq C_i \quad (i \in S_B) \quad (10)$$

$$0 \leq C_i^l \leq C_i^{\text{exist}} + C_i^{\text{new}} \quad (i \in S_B) \quad (11)$$

$$0 \leq R_i^{\text{new}} \leq R_i \quad (i \in S_B) \quad (12)$$

$$0 \leq R_i^l \leq R_i^{\text{exist}} + R_i^{\text{new}} \quad (i \in S_B) \quad (13)$$

基金项目:浙江省科技攻关计划项目(2004C31023)

其中: $S_L, S_r, S_B, S_G, S_T, S_F$ 为负荷水平、候选线路、节点、发电机、线路、变压器集合; L_{cost}, V_{cost} 为增设线路、无功设备总费用; P_{loss}^l 为负荷水平 l 时网损、 d 为单位电量成本、规划期、负荷水平 l 所占规划期的比例; c_i, x_i 为候选线路 i 的建设成本、候选线路 i 的 0-1 决策变量 (1 表示该线路在规划方案中被选中), C_i^C, R_i^R 为节点 i 上设置单位容量电容器、电抗器的可变成本, C_i^C, R_i^R 为节点 i 上设置电容器、电抗器的固定成本; C_i^{new}, R_i^{new} 为规划前节点 i 上增设的电容器、电抗器容量, C_i^{exist}, R_i^{exist} 为规划前节点 i 上已有的电容器、电抗器容量; P_i^l 为负荷水平 l 时线路 i 的潮流; V_i^l, θ_i^l 为潮流方程、负荷水平 l 时节点 i 电压大小、相位; G_i^l 为负荷水平 l 时发电机有功/无功出力; T_i^l 为负荷水平 l 时变压器 i 分接头位置; C_i^l, R_i^l 为负荷水平 l 时节点 i 的电容器、电抗器的投运量; $\underline{\cdot}, \bar{\cdot}$ 为下限、上限。

2 问题的解法

我们可以看到定义的规划问题中包含了系统运行问题, 对此本文提出在对每一规划候选方案实施多场景下系统运行最优化的基础上来确定电网最优扩展方案的方法。为了便于说明, 把确定最优扩展方案的过程称为“规划层”, 而把每一场景下系统运行最优化的过程称为“运行层”, 因此每“层”问题均为一个混合整数优化的问题。

关于电网的规划和运行问题开展了很多研究, 提出了很多算法^[3-8]。本文提出的算法为分开考虑离散变量和连续变量的决策, 即应用禁忌探索对候选线路决策变量、调相设备增设容量 (规划层) / 调相设备投运容量、变压器分接头位置 (运行层) 等离散变量进行搜索求解的同时, 对发电机出力、节点电压等连续变量 (运行层) 则采用了内嵌斯坦福大学非线性优化工具软件 MNOS^[9] 进行求解。算法流程如图 1, 需要说明的是, 为节省篇幅, 图 1 把“规划层”和“运行层”计算流程中表述相同的步骤作了形式上的合并。

2.1 规划层

2.1.1 目标函数和约束条件

为了尽可能保证系统运行时不发生潮流、电压越限的情况, 通过引入如式 (15)、(16) 所定义的两个约束条件越限惩罚项 V_{vio}^l, P_{vio}^l (为取值较大的正数), 从而把目标函数转换成式 (14) 的形式 (C_{cost} 为总设备费), 同时约束条件为式 (7) ~ (13)。

$$\min E = C_{cost} + \sum_{l, S_L} (d^l ploss^l + V_{vio}^l + P_{vio}^l) \quad (14)$$

$$V_{vio}^l = \sum_{i \in S_B} \left\{ \max\{0, (V_i^l - \bar{V}_i^l), (\bar{V}_i^l - V_i^l)\} \right\}^2 \quad (15)$$

$$P_{vio}^l = \sum_{i \in S_T} \left\{ \max\{0, (P_i^l - \bar{P}_i^l), (\bar{P}_i^l - P_i^l)\} \right\}^2 \quad (16)$$

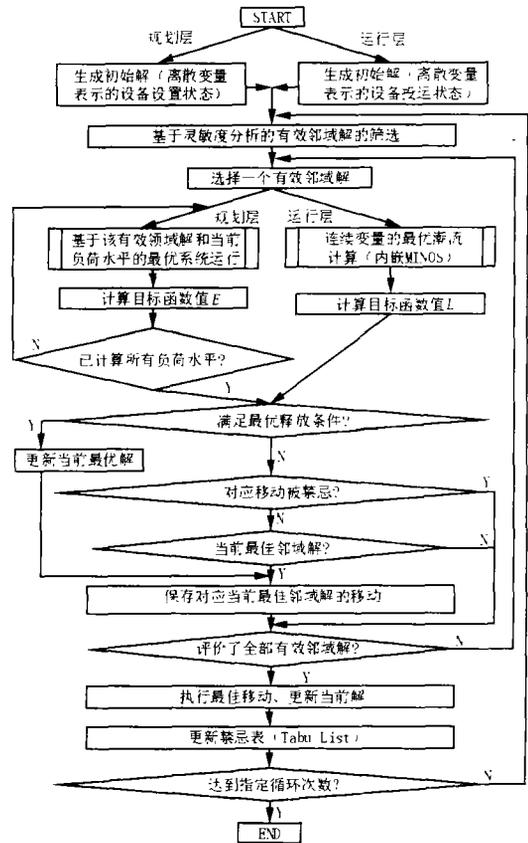


图 1 输电网扩展规划的计算流程

Fig 1 Algorithm of transmission network expansion planning

2.1.2 解和邻域的定义

我们把候选线路决策变量、调相设备增设容量作为增设设备向量 $u_{planning}$ 定义为解。另外, 定义一个和 $u_{planning}$ 同维的单位向量 e_m , 按照式 (19)、(20) 定义解的邻域。

$$u_{planning} = [x^T C^{newT} R^{newT}] \quad (17)$$

$$e_m = [0, \dots, 0, 1, 0, \dots, 0]^T \quad (18)$$

$$u_{planning}^{trial} = u_{planning}^{current} \pm e_m \quad (19)$$

$$u_{planning}^{trial} = u_{planning}^{current} + e_m - e_n \quad (m \neq n) \quad (20)$$

2.2 运行层

2.2.1 目标函数和约束条件

如前所述, 则对应于负荷水平 l 时系统运行的最优化问题可如式 (21) 定义, 同时约束条件为式

(7) ~ (13)。需要说明的是,计算时分别考虑了系统正常运行和输电线路 $(N - 1)$ 的情况。

$$\min L^i = d^i \text{loss}^i + V_{\text{vio}}^i + P_{\text{vio}}^i \quad (21)$$

2.2.2 解和邻域的定义

我们把负荷水平 i 时各节点调相设备的投运容量和变压器分接头位置作为设备运行向量 $u_{\text{operation}}^i$ 定义为解。另外,类似式 (18) ~ (20) 定义解的邻域。

$$u_{\text{operation}}^i = [C^T \quad R^T \quad T^T]^T \quad (22)$$

2.3 灵敏度分析

邻域解 (或称为试验解) 随着系统规模的增大而迅速增加,对所有邻域解都进行精确评价有困难。为了提高计算效率,通过灵敏度分析对邻域解进行事先评价,从邻域解中筛选出几个对降低目标函数值“贡献较大的”解,然后通过精确评价再从中选取最佳邻域解。以存在电压越限为例说明在“运行层”求解时如何筛选邻域解。

调相设备投运容量单位变化时,通过近似为对应节点注入无功的变化,按式 (23) ~ (26) 计算电压越限的消除量,从而选取消除越限效果好的邻域解。

$$W_k^i = \sum_{i \in S_B} w_i^i \quad (23)$$

$$w_i^i = \begin{cases} \max\{ \underline{V}_i - V_i^i, (V_i^i - \bar{V}_i), 0 \}, & (V_i^i < \underline{V}_i + V_{ik}^i - \bar{V}_i) \\ \max\{ V_{ik}^i, (V_i^i + V_{ik}^i - \bar{V}_i) \}, & (V_i^i + V_{ik}^i > \bar{V}_i) \\ \max\{ -V_{ik}^i, (V_i^i - V_i^i - V_{ik}^i) \}, & (V_i^i + V_{ik}^i < \bar{V}_i) \end{cases} \quad (24)$$

$$V_k^i = J_4^{i-1} Q_k^i \quad (25)$$

$$\begin{bmatrix} \bar{P} \\ Q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\partial P}{\partial V} & \frac{\partial P}{\partial \theta} \\ \frac{\partial Q}{\partial V} & \frac{\partial Q}{\partial \theta} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta V \\ \Delta \theta \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} J_1 & J_3 \\ J_2 & J_4 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta V \\ \Delta \theta \end{bmatrix} \quad (26)$$

其中: V_{ik}^i 为调相设备或变压器分接头 k 单位变化时节点 i 的电压变化量; V_i^i 为当前解对应的节点 i 的电压; V_{ik}^i 、 Q_k^i 为调相设备或变压器分接头 k 单位变化时节点电压变化向量、节点注入无功变化向量; J_4 为当前解对应的雅可比矩阵 $(Q - U)$ 。上标 i 则表示对应的负荷水平及系统状况。

3 禁忌算法

禁忌算法^[10] (Tabu Search) 是一种高效启发式优化方法,研究表明该算法能有效地求得组合优化问题的最优解或次优解。其基本思想是通过建立禁忌表 (Tabu List)、即记录解的搜索更新过程,以控制后续解的搜索,这既可避免陷入局部最优解,又具有很强的“爬山”能力。算法的基本原理如图 2。

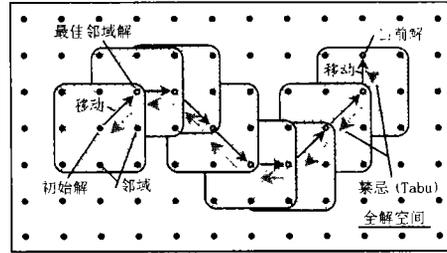


图 2 禁忌算法原理

Fig 2 Sketch of Tabu search's algorithm

1) 算法通过一组定义的“移动”(move)对当前解或初始解进行操作,产生一组邻域解(试验解),以算出的“最佳邻域解”更新“当前解”而完成一次局部搜索(即使最佳邻域解不如当前解),并记录此“移动”。“移动”方法有很多,如式 (19) 所示的“单一移动”,式 (20) 所示的“交换移动”等。

2) 如 1) 中所述,则在 1) 之后的若干次搜索过程中,与 1) 中所记录的“移动”的“反方向移动”将被禁止 (Tabu),以避免算法重访或陷入在最近若干次迭代过程中已经访问过的解群。如何确立禁忌表的规模和管理“禁忌保留期”对于寻优过程有重要的影响。

3) 为了尽可能不错过产生最优解的移动,算法还采用了“释放准则”(aspiration criteria)策略,即对禁忌表中的“禁忌移动”赋予一个释放水平。如果一个“禁忌移动”达到了释放水平,则该“移动”不被限制。释放水平的作用是为了在搜索过程中能实现最有价值的“移动”,从而突破“禁忌”所造成的搜索限制,增强搜索的鲁棒性。

4 算例

算例系统为图 3 所示的 6 节点系统,可增设线路及其建设成本如表 1 (注:文中均采用虚拟货币单位),无功补偿设备的设置和调节参数以及变压器分接头的调节参数如表 2。

表 1 可增设线路及其建设成本

Tab 1 Candidate transmission lines and construction costs

增设对象	成本	增设对象	成本
节点 1-4 间线路	5 000	节点 2-5 间线路	2 000
节点 1-6 间线路	5 000	节点 3-5 间线路	4 000
节点 2-3 间线路	2 000	节点 4-6 间线路	5 000

另外,各节点电压允许变化范围均为 0.95 ~ 1.05。规划期为 1 年,单位电量价格为 0.06,规划期内考虑 2 个负荷水平,分别为图 3 中所示负荷的 0.8、1.0 倍;系统事故考虑为已有输电线路 $(N - 1)$

情况。

节点 2 的非电力系统电源的有功出力的下限 P_{G_2} 分别考虑为 0、0.1、0.2、0.3、0.4 等 5 种情况。

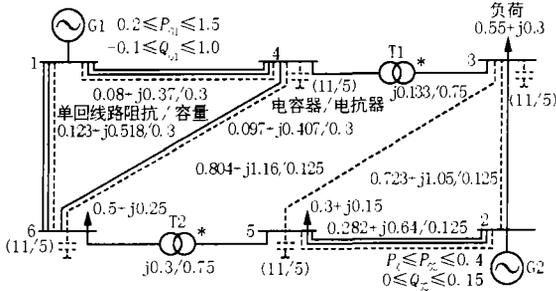


图 3 算例系统图

Fig 3 Diagram of 6-node system

表 2 无功补偿设备及变压器分接头装设和控制参数

Tab 2 Installation and regulation parameters of VAR facilities & transformer's tap

类别	设置范围	控制调整容量	单位设置固定成本	单位容量可变成本
电容器	0 ~ 11	0.02	20	20
电抗器	0 ~ 5	0.02	20	20
分接头	- 10 ~ 10	0.005	-	-

计算结果如表 3 和图 4~6 所示,对电网公司而言,从设备投资和网损来看,节点 2 的电源出力下限保持在 0.1 及以下最为经济;而对于非电力系统电源而言,出力下限的限制对投资收益的影响大,也就是说对节点 2 电源来说,出力始终允许保持在 0.4 是最理想的,而此时系统的设备投资最大、网损也最大,是一种欠经济的选择。

表 3 不同出力下限 (P_{G_2}) 时电网扩展规划的比较

Tab 3 Comparison of network expansion schemes with diverse lower limits of P_{G_2}

P_{G_2} 下限	0, 0.1	0.2	0.3	0.4
目标函数值	11 585.27	13 488.73	13 544.22	15 637.37
线路费	10 000	12 000	12 000	14 000
无功设备费	160	0	0	0
网损费	1 425.27	1 488.73	1 544.22	1 637.37

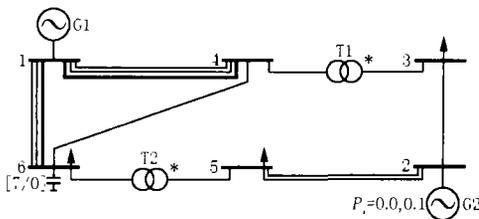


图 4 输电网扩展规划接线图 (G_2 下限为 0、0.1 时)

Fig 4 Layout of transmission network expansion scheme when the lower limit of P_{G_2} is 0 or 0.1

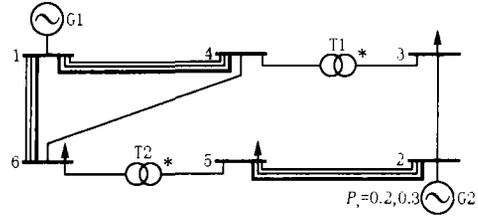


图 5 输电网扩展规划接线图 (G_2 下限为 0.2、0.3 时)

Fig 5 Layout of transmission network expansion scheme when the lower limit of P_{G_2} is 0.2 or 0.3

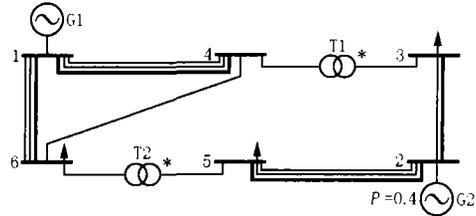


图 6 输电网扩展规划接线图 (G_2 下限为 0.4 时)

Fig 6 Layout of transmission network expansion scheme when the lower limit of P_{G_2} is 0.4

5 结语

电力工业的市场化改革改变了原来的垄断局面,输电、发电环节的分离、能源紧张、环保问题以及当前缺电的形势等,使得输电网规划问题更加复杂化。

针对非电力系统电源可能接入系统的问题,本文提出了一种基于多场景下系统运行最优化的电网扩展规划方法,利用该方法求得的规划方案有较好的适应性,而且通过对非电力系统电源的不同出力下限的讨论,可以在求得最经济的电网扩展规划方案的同时确定非电力系统电源的最大允许出力下限。通过算例验证了该方法的可行性和有效性。

参考文献:

- [1] 韩祯祥,甘德强. 2004年国际大电网会议系列报导——电力市场热点问题探讨[J]. 电力系统自动化, 2005, 29(2): 1-4. HAN Zhen-xiang, GAN De-qiang. A Review of 2004 CIGRE on Important Issues in Electricity Markets[J]. Automation of Electric Power Systems, 2005, 29(2): 1-4.
- [2] Okada K, Asano H, et al. Reliability-based Impact Analysis of Independent Power Producers for Power System Operations Under Deregulation[A]. Proceedings of the 1999 IEEE Canadian Conference on Electrical and Computer Engineering. Piscataway (NJ): 1999. 1325-1330.
- [3] 杨宁,文福拴. 电力市场环境下的输电系统规划方法初探[J]. 电网技术, 2004, 28(17): 47-52. YANG Ning, WEN Fu-shuan. A Preliminary Research on Trans-

- mission System Planning Methodology in Electricity Market Environment[J]. Power System Technology, 2004, 28(17): 47-52.
- [4] SEL, JMAO, et al Transmission Network Expansion Planning Under a Tabu Search Approach[J]. IEEE Trans on Power Systems, 2001, 16(1): 62-68.
- [5] 朱海峰,程浩忠,等.考虑线路被选概率的电网灵活规划方法[J].电力系统自动化,2000,24(17):20-24.
ZHU Hai-feng, CHENG Hao-zhong, et al A Novel Method of Electric Power Network Flexible Planning Considering the Selected Probability of Transmission Line[J]. Automation of Electric Power Systems, 2000, 24(17): 20-24.
- [6] Lin W M, Cheng F S, et al An Improved Tabu Search for Economic Dispatch with Multiple Minima[J]. IEEE Trans on Power Systems, 2002, 17(1): 108-112.
- [7] Momoh J A, et al A Review of Selected Optimal Power Flow Literature to 1993 Part I, Part [J]. IEEE Trans on Power Systems, 1999, 14(1): 96-104, 105-111.
- [8] 丁晓莺,王锡凡,等.一种求解最优潮流的组合算法[J].中国电机工程学报,2002,22(12):11-16.
- DING Xiao-ying, WANG Xi-fan, et al A Combined Algorithm for Optimal Power Flow [J]. Proceedings of the CSEE, 2002, 22(12): 11-16.
- [9] Murtagh B A, Saunders M A. MNOS 5.5 User's Guide, Technical Report SOL 83-20R [R]. Stanford: Stanford University, 1998.
- [10] Laguna M. Tabu Search in Modern Heuristics Techniques for Combinatorial Problems[M]. London (UK): McGraw-Hill Int, 1995. 70-141.

收稿日期: 2005-08-11; 修回日期: 2005-09-08

作者简介:

胡 骅 (1971 -),男,讲师,在职博士,研究方向为电力系统控制及优化; Email: huhua@zju.edu.cn

虞海泓 (1971 -),男,工程师,从事电力系统规划和设计工作;

朱炳铨 (1965 -),男,高级工程师,主要从事继电保护、自动化运行和管理管理工作。

A transmission network expansion planning method in electricity market environment

HU Hua¹, YU Hai-hong², ZHAO Liang³, ZHU Bing-quan³

(1. Dept of Electrical Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China; 2 Zhejiang Provincial Electric Power Design Institute, Hangzhou 310014, China; 3 Zhejiang Electric Power Dispatching and Communication Center, Hangzhou 310007, China)

Abstract: In an open electricity market, a large number of unplanned independent power producers or distributed generators require to be connected to the power system, which could cause serious hidden troubles of the reliability and economy of system operation for the sake of the unexpected generators are not taken into account in the past planning. To avoid such a situation, a new transmission network expansion planning method by the optimization of system operation under multiple scenarios is proposed in the paper. The method is proposed to achieve an expansion scheme with more flexibility. And the most economic expansion scheme and the maximum lower limits of the unexpected generators' outputs are obtained as well by the comparison of various lower limits of the unexpected generators' outputs. The numerical results of a 6-node system are provided to demonstrate the validity of the proposed method.

Key words: transmission planning; electricity market; scenarios analysis; optimal power flow; Tabu search

(上接第 28 页 continued from page 28)

Abstract: This paper applies Electronic Power Transformer (EPT) into the distribution network to optimize and control the voltage and reactive power synthetically. EPT is superior to DLTC with the advantages of high controllability to generate or absorb reactive power, keeping output voltage of secondary side constant in amplitude regardless of load changing, and being adjusted continuously and power factor of primary and secondary side of EPT are adjustable. However, different from conventional OLTC, during the reactive power optimization including EPT, genetic algorithm outputs control variables which are PWM modulation coefficients and phase angles of the primary and secondary VSC of EPT. In order to improve the speed of the optimization, this paper has improved simple GA to ultimately improve the convergence property of the algorithm. Analysis of test example indicates EPT in place of traditional OLTC in the distribution networks can lower power loss effectively, improve voltage quality of distribution networks and reduce the expense of the reactive-load compensation equipment to better satisfy the need of the electric customer to power quality.

Key words: EPT; genetic algorithm; reactive power optimization; distribution networks