

基于电子电力变压器的配电网电压无功综合优化控制

崔艳艳, 毛承雄, 陆继明, 王丹

(华中科技大学电气与电子工程学院, 湖北 武汉 430074)

摘要: 将电子电力变压器 EPT(Electronic Power Transformer)用于配电网,进行电压无功综合优化控制。电子电力变压器具有如下优点:可以发出和吸收无功,具有高度可控性;可以始终保持副方输出电压幅值恒定,不随负载变化且平滑可调;原方功率因数可调等等,这些都是常规的有载调压变压器(OLTC)所不具有的。但是,与常规 OLTC的仿真研究不同,在含 EPT的配电网无功优化中,遗传算法输出的控制变量是 EPT原副方 VSC的 PWM调制系数和调制相角。另外,为了提高优化速度,文中还对简单遗传算法做了改进,改善了算法的收敛特性。算例分析表明,EPT取代配电网中常规的 OLTC可有效降低网损,改善副方电压质量,大大减少无功补偿设备的投资费用,从而更好地满足用户对电能质量的要求。

关键词: 电子电力变压器; 遗传算法; 电压无功优化; 配电网

中图分类号: TM73 **文献标识码:** A **文章编号:** 1003-4897(2006)06-0024-05

0 引言

电压质量是衡量电力系统电能质量的重要指标之一,它的好坏主要取决于电力系统无功潮流分布是否合理。若无功电源容量不足,系统运行电压将难以保证。我国配电网长期以来无功匮乏,由其造成的网损严重,因此,解决好配电网无功补偿的问题,能够有效地维持系统的电压水平,提高系统的电压稳定性,避免大量无功功率的远距离传输,从而降低有功网损,减少发电费用,对电网的安全和降损节能有着重要的意义。

配电系统中,无功优化的控制手段主要包括调节投切电容器和改变有载调压变压器(OLTC)的分接头,由于 OLTC采用的分接开关动作相对频繁,给变压器运行增加了事故几率,严重影响设备和系统的安全运行。特别是世界上几次大的停电事故(如日本、法国、美国等)都是由于无功容量不足调节分接头造成的^[1]。鉴于此,本文提出将电子电力变压器^[2,3]应用于配电网电压无功优化控制。由于电子电力变压器具有以下显著的优点:可以发出和吸收无功,不仅可以作为无功负荷吸收无功防止由于无功倒送所带来的电网污染;更重要的是它还可以充当无功源,可以减小负荷向系统索取大量无功功率,实现无功负荷就地(或就近)平衡,使得由于无功功率的长距离输送所造成的有功功率损耗减小,从而使整个电网的线损率降低,同时大大减少了电

容器投切所带来的投资费用;运行时可以始终保持副方输出电压幅值恒定,不随负载变化且平滑可调,从而可以有效克服常规 OLTC分接头只能分级调节的缺点。

配电网的无功优化问题是一个多变量、多约束的混合非线性规划问题,从而使得优化过程十分复杂。现有的理论分析方法有:线性规划法、非线性规划法、混合整数规划法及动态规划法等。这些规划法都容易陷入局部最优解而非全局最优解。配电网无功优化中变压器分接头和补偿电容器的分组投切,客观上具备了控制变量离散的条件,为遗传算法的应用奠定了基础。针对常规遗传算法收敛速度慢的缺点,本文从编码形式、遗传算子和惩罚因子等几个方面对简单遗传算法做了改进,从而提高了计算速度,改善了算法收敛特性。

1 电子电力变压器应用于配电网无功优化

1.1 EPT的工作原理^[2]

电子电力变压器的设计思路来自于一种具有高频连接的 AC/AC变换电路^[4],其基本工作原理框图如图 1所示。其中高频变压器起隔离和变压作用,由于铁芯式变压器的体积与频率成反比,所以高频变压器的体积远小于常规工频变压器,同时其整体效率高。从目前的研究成果看,EPT的具体实现方案又可分为两种形式:一种是在变换过程中不含直流环节,即直接 AC/AC变换,其原理是:在高频变压器原方进行高频调制,在副方同步解调;另一种是在变换过程中存在直流环节,通常是在变压器原方

基金项目:新世纪优秀人才支持计划资助

进行 AC/DC 变换,将直流调制为高频信号经高频变压器耦合到副方后,在副方进行 DC/AC 变换。两种方案相比较,由于后一种方式具备良好的控制特性,通过 PWM 波形调制技术可实现变压器原副方电压、电流和功率的灵活控制,有望成为今后的发展方向。

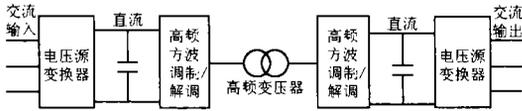


图 1 EPT的基本工作原理框图

Fig 1 Basic operation principle diagram of EPT

1.2 EPT在配电网中的控制策略

图 2 是 EPT 接入电网的简化模型。图 2 中, X_1 、 X_2 分别为两侧等效换相电抗, C 为直流环节电容, P_1 、 Q_1 为 EPT 高压侧与系统交换的有功和无功功率, P_2 、 Q_2 为 EPT 输出的有功和无功功率, U_1 、 U_2 为 EPT 原副方 VSC 变换器的交流侧电压, U_s 、 U_0 为系统和 EPT 的输出电压。

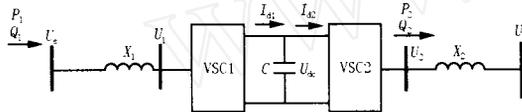


图 2 EPT接入电网的模型

Fig 2 Simple model of EPT in the network

EPT 的控制量分别为:原方和副方 VSC 的 PWM 调制系数和相角 M_1 、 α_1 和 M_2 、 α_2 。在 EPT 原方采用定直流电压控制方式,同时控制 EPT 从高压侧吸收的无功功率;在 EPT 副方采用定输出交流电压控制方式,同时控制 EPT 发出的无功功率。

在 EPT 原方,根据 PWM 调制原理,有下式成立:

$$U_1 = M_1 U_{dc} \sqrt{2} \quad (1)$$

高压侧输送的功率为:

$$P_1 = U_s U_1 \sin \alpha_1 / X_1 \quad (2)$$

$$Q_1 = U_s (U_s - U_1 \cos \alpha_1) / X_1 \quad (3)$$

联立式 (1)、(2) 消去 U_1 可以得到以下关系:

$$U_{dc} = \sqrt{2} P_1 X_1 / M_1 U_s \sin \alpha_1 \quad (4)$$

再将式 (1) 代入式 (3) 可得到以下关系:

$$Q_1 = U_s (U_s - M_1 U_{dc} \sqrt{2} \cos \alpha_1) / X_1 \quad (5)$$

考虑到定电压换流站运行于安全稳定范围时,有 α_1 小于 45° ,在此条件下令 U_{dc} 和 Q_1 分别对 M_1 和 α_1 求偏导可知: $\partial U_{dc} / \partial M_1 < 0$, $\partial Q_1 / \partial \alpha_1 > 0$,即 U_{dc} 与 M_1 之间、 Q_1 与 α_1 之间存在近似的单调函数关系,可以实现近似的解耦控制。即:用 M_1 来控制

U_{dc} , α_1 来控制 Q_1 。

在 EPT 副方,副方输出电压 U_2 与直流电压 U_{dc} 的关系为:

$$U_2 = M_2 U_{dc} \sqrt{2} \quad (6)$$

副方输出的功率为:

$$P_2 = P_L = U_2 U_0 \sin \alpha_2 / \sqrt{2} X_2 \quad (7)$$

$$Q_2 = U_0 (U_2 \cos \alpha_2 - U_0) / X_2 \quad (8)$$

由于 EPT 原方控制器可使得直流电压 U_{dc} 维持稳定,这样由式 (6)、(7) 联立解得:

$$U_0 = \sqrt{2} P_L X_2 / M_2 U_{dc} \sin \alpha_2 \quad (9)$$

再将 (6) 式代入 (8) 式可得:

$$Q_2 = U_0 (M_2 U_{dc} \cos \alpha_2 \sqrt{2} - U_0) / X_2 \quad (10)$$

与原方分析类似,可以得到副方的控制策略为:用 M_2 来控制 U_0 , α_2 来控制 Q_2 。

2 基于 EPT 的配电网无功优化数学模型

配电网电压无功综合优化的目的是在满足电压合格率最高和运行网损最小的情况下,对已有的变压器和无功补偿装置进行配合调节,使其满足安全运行。

2.1 目标函数

配电网无功优化的目标函数可以用下式来表示:

$$F = \min \left[P_{\text{loss}} + \sum_{i=1}^n \left| \frac{V_i}{V_m} \right|^2 \right] \quad (11)$$

其中: V_m 为电压越界惩罚因子。

电压越界量的计算如下:

$$V_i = \begin{cases} V_{\min} - V_i, & V_i < V_{\min} \\ 0, & V_{\min} \leq V_i \leq V_{\max} \\ V_i - V_{\max}, & V_i > V_{\max} \end{cases} \quad (12)$$

$$V_m = V_{\max} - V_{\min} \quad (13)$$

$$P = \sum_{i=1}^n V_i \sum_j V_j (G_{ij} \cos \theta_{ij} + B_{ij} \sin \theta_{ij}) \quad (14)$$

式中: n 为配电网节点总数; V_i 是 i 节点电压; G_{ij} 、 B_{ij} 、 θ_{ij} 是节点 i 和节点 j 之间的支路电导、电纳和相角差。

2.2 约束条件

无功优化的约束条件包含等式约束条件和不等式约束条件两部分,等式约束条件是负荷节点的无功功率平衡约束。

$$Q_i = V_i \sum_{j=1}^n V_j (G_{ij} \sin \theta_{ij} - B_{ij} \cos \theta_{ij}) \quad (15)$$

式中: Q_i 是节点 i 的注入无功功率,在无功优化中,

由于网络有功潮流和电压变化关系很弱,因而认为有功潮流不随控制变量的变化而变化。

不等式约束条件由控制变量和状态变量的不等式约束两部分组成。

控制变量不等式约束为

$$\begin{cases} 0 & M_1, M_2 & 1 \\ -45^\circ & \theta_1, \theta_2 & 45^\circ \end{cases} \quad (16)$$

式中: M_1 、 θ_1 和 M_2 、 θ_2 分别为 EPT 原方和副方 VSC 的 PWM 调制系数和调制相角。

而传统的含有载调压变压器 (OLTC) 的配电网无功优化模型中采用的控制变量通常为 C_i 和 T_i , 其控制变量不等式约束为

$$\begin{cases} C_{\min} < C_i < C_{\max} \\ T_{\min} < T_i < T_{\max} \end{cases} \quad (17)$$

式中: C_i 是无功补偿装置的投入组数; T_i 是变压器档位。

状态变量不等式约束为

$$V_{\min} \leq V_i \leq V_{\max} \quad (18)$$

其中: V_i 是 i 节点的电压。

3 改进遗传算法用于无功优化

3.1 遗传算法简介

遗传算法是基于自然选择和基因遗传原理的搜索算法。它将实际问题的变量进行编码形成染色体,对应于相应一组变量值的目标函数经过某种变换后作为个体的适应度函数。首先随机产生一组初始潮流解,受各种约束条件限制,通过目标函数值评价优劣,评价低的被抛弃,只有评价高的才有机会将其特征遗传到下一代,然后对变量进行带有遗传信息的编码,执行基本的遗传操作(选择、交叉、变异)后,进行重新组合,以产生更为优秀的个体,这个个体对应的解将趋于最优。如此重复上述过程,直到找到最优的方案为止。

本文对简单遗传算法作了改进,在加快计算速度的同时也改善了算法的收敛性,以使之更加适用于无功优化问题。

3.2 改进遗传算法

1) 编码的处理

采用二进制编码时,随着系统规模的扩大控制变量的数目也随之增加,其编码串会很长,使得遗传算法的搜索空间急剧扩大,因此,针对含有 OLTC 的传统配电网和 EPT 取代 OLTC 后的新型配电网,本文分别采用十进制整数编码和实数编码两种编码形式,可以大大缩小搜索空间,加快搜索过程。

2) 保存最优个体^[9]

为防止在进化过程中得到的最优个体在以后的进化中丢失,因此增加记录最优个体的策略。若某代中适应度最高的个体优于以往的最优个体,则记录下来,且不参与下一代竞争选择。

3) 自适应交叉率和变异率

引用文献 [9] 的自适应遗传算法,其中 P_c 和 P_m 基于个体的适应度值自适应地进行改变。当群体有陷入局部最优解的趋势时,就相应地提高 P_c 和 P_m ; 当群体在解空间发散时,就降低 P_c 和 P_m 。

自适应遗传算法的交叉率和变异率的公式如下:

$$P_c = \begin{cases} P_{c1} - \frac{P_{c1} - P_{c2}}{f_{\max} - f_{\text{avg}}}, & f > f_{\text{avg}} \\ P_{c1}, & f < f_{\text{avg}} \end{cases} \quad (19)$$

$$P_m = \begin{cases} P_{m1} - \frac{P_{m1} - P_{m2}}{f_{\max} - f_{\text{avg}}}, & f > f_{\text{avg}} \\ P_{m1}, & f < f_{\text{avg}} \end{cases} \quad (20)$$

式中: f_{\max} 代表群体中最大的适应值, f_{avg} 代表每代群体的平均适应度值, f_i 代表要交叉的两个个体中较大的适应度值。

4) 惩罚因子自适应调整

惩罚因子采用自适应调整,在群体进化早期,取值较小,网损 P_{loss} 在目标函数中占的比重较大,可以促进群体向 P_{loss} 较小取值的区域进化,以加快收敛速度;在进化后期,随着取值的增大,含有越限状态量的解的目标函数值就会变差,这就有可能得到既满足越限要求、又具有最小 P_{loss} 值的解。

自适应惩罚因子的公式如下^[12]:

$$= \begin{cases} t^{-1} + \text{step}, & t < \text{max} \\ \text{max}, & t \geq \text{max} \end{cases} \quad (21)$$

式中: t 为进化代数。

3.3 改进遗传算法无功优化步骤

1) 读入系统网络节点参数、控制变量、状态变量、约束条件等原始数据,设置遗传算法的操作参数。

2) 随机产生一组控制变量,即一组初始解。

3) 以当前控制变量去修改原始数据中相应的部分。进行潮流计算,得到各节点的有功、无功和电压。

4) 根据适应函数评价各个个体。

5) 进行遗传操作,形成新一代个体。

6) 判断是否满足收敛准则。若满足收敛条件则输出结果,不满足则返回 3)。

4 算例分析

本节在相同条件下,用 EPT取代电网中传统的 OLTC后,对 IEEE33节点配电网标准算例^[17]和某市实际电网算例^[18]进行无功优化,并对比了整个电网无功优化后的效果。由于 EPT的效率计算大约为 94%,故计算过程中 EPT本身的损耗按照常规 OLTC 的 4倍损耗来考虑。改进遗传算法的参数设置中,种群数取 50,终止代数取 50。自适应的交叉率和变异率上下限分别为 $P_{c1} = 0.9, P_{c2} = 0.6, P_{m1} = 0.1, P_{m2} = 0.001$ 。罚因子上限 $\max = 50$,下限 $\min = 5$,步长取 1。

表 1 系统部分参数

Tab 1 Some parameters of systems

	节点数	支路数	分接头可调	
			变压器数	无功补偿节点数
IEEE33 节点算例	33	32	7	33
某市实际电网算例	42	41	19	8

对于 IEEE33节点标准算例,假设 33个节点均有可投切电容器组,其中 7条支路为变压器支路。从表 2可以看出,采用改进遗传算法优化 IEEE33节点标准算例,优化前后电压质量有了明显的改善,优化后电压合格率为 100%,从而证明了改进遗传算法解决无功优化问题的有效性。

表 2 IEEE33节点算例优化前后电压情况比较

Tab 2 The voltage comparison of pre/post optimization about IEEE 33 nodes test

节点号	电压幅值		节点号	电压幅值	
	优化前	优化后		优化前	优化后
0	1.00	1.00	16	0.879 873	0.958 103
1	0.995 492 3	0.997 482	17	0.879 125 9	0.957 530
2	0.974 492 2	0.985 050	18	0.994 655 7	0.997 502
3	0.963 670 9	0.979 281	19	0.989 015 1	0.998 589
4	0.953 132 6	0.973 719	20	0.987 908 5	0.999 382
5	0.927 530 4	0.964 928	21	0.986 908 7	0.999 984
6	0.922 676 5	0.968 746	22	0.969 075 7	0.980 928
7	0.916 125 9	0.964 931	23	0.959 098	0.972 531
8	0.907 730 8	0.964 400	24	0.954 177 9	0.968 885
9	0.899 995 1	0.963 457	25	0.924 927 2	0.963 133
10	0.898 886 7	0.962 786	26	0.921 488	0.960 616
11	0.896 936 5	0.961 649	27	0.906 37	0.950 338
12	0.888 937 7	0.959 417	29	0.891 22	0.942 899
13	0.885 944 8	0.959 476	30	0.885 982 9	0.939 094
14	0.884 073 3	0.959 384	31	0.884 827 9	0.936 099
15	0.882 375 7	0.959 292	32	0.884 473 7	0.935 177

表 3 42节点算例网损和无功补偿情况比较

Tab 3 Comparison of power loss and reactive compensation of 42 nodes test

重负荷情况	有功损耗 /kW		损耗下降 /kW	下降百分比 / (%)	无功补偿总量 /kvar
	优化前	优化后			
传统 OLTC	73.3	45.5	27.8	37.9	870
采用 EPT	76.9	46.5	30.4	39.5	0

表 3结果表明采用改进遗传算法优化后网损大幅度降低,证明了该算法解决优化问题的有效性。同时从表 3的比较中看出,尽管采用 EPT在网损方面略高于常规的 OLTC,但是从整个电网的损耗下降百分比来看,采用 EPT降低网损的效果要好一些,而且随着大功率电力电子器件的飞速发展,器件损耗必然大大降低,EPT的效率自然会提高;另外,从表 3还可以看出,由于 EPT本身可以充当无功源发出无功,大大节省了无功补偿设备的投资费用。

表 4 42节点算例电压随负荷变化的节点分布情况

Tab 4 Nodes distribution in condition that voltage change with bad changing of 42 nodes test

电压区段	采用传统 OLTC		采用 EPT	
	正常负荷	重负荷	正常负荷	重负荷
0.96 ~ 0.97	0	1	0	0
0.97 ~ 0.98	0	5	0	0
0.98 ~ 0.99	8	8	0	0
0.99 ~ 1.00	34	28	42	42

从表 4的结果对比可以看出在没有采用 EPT的情况下,随着无功负荷的增加,电压质量明显下降;若将 EPT代替常规 OLTC用于配电网,由于其原副方功率因数可调,可以作为无功源发出无功,因此随着负荷的增加可以相应地发出适当的无功量,从而使得在负载变化的情况下电网电压基本维持恒定,提高了电网的电压稳定性,更好地满足了不同用户对电压质量越来越高的要求。

5 结论

本文首先阐述了 EPT的工作原理和 EPT在配电网中的控制策略,建立了包含 EPT的配电网无功优化数学模型,并对优化时采用的遗传算法进行了一些改进,最后通过两个配电网算例,对基于 EPT的配电网电压和无功进行了优化。算例结果对比表明,EPT具有良好的特性,它可以充当无功源,使得电网中传送的无功功率大大减少,有效降低了网损,同时也减少了无功补偿设备的投资费用;特别是能够始终保持电网电压稳定,不随负载变化且平滑可调,保证了电网和用户侧的电能质量,较好地达到配电网系统电压无功综合优化控制的目的。

参考文献:

- [1] 刘鹏,吴刚.世界范围内两起典型电压崩溃事故分析[J].国际电力,2003,7(5):35-37.
LU Peng, WU Gang Analysis of Two Typical Voltage Collapse Incidents Worldwide [J]. Power Network Technology, 2003, 7(5): 35-37.
- [2] 毛承雄,范澍,王丹,等.电力电子变压器的理论及其应用(一)[J].高压技术,2003,29(10):4-6
MAO Cheng-xiong, FAN Shu, WANG Dan, et al Theory of Power Electronic Transformer and Its Application(一)[J]. High Voltage Engineering, 2003, 29(10): 4-6
- [3] 毛承雄,范澍,陆继明,等.电力电子变压器的理论及其应用(二)[J].高压技术,2003,29(12):1-3
MAO Cheng-xiong, FAN Shu, LU Jiming, et al Theory of Power Electronic Transformer and Its Application(二)[J]. High Voltage Engineering, 2003, 29(12): 1-3
- [4] McMurray W. Power Converter Circuits Having a High-frequency Link [P]. U. S. Patent 3517300, 1970.
- [5] 黄贻焯,毛承雄,陆继明,等.电力电子变压器在输电系统中的控制策略研究[J].继电器,2004,32(6):35-39.
HUANG Yi-zhuo, MAO Cheng-xiong, LU Jiming, et al Study on Control Strategy for Power Electronic Transformer in Power System [J]. Relay, 2004, 32(6): 35-39.
- [6] Kang M, Enjeti P N, Pitel I J. Analysis and Design of Electronic Transformers for Electric Power Distribution System [J]. IEEE Trans on Power Electronics, 1999, 14(6): 1133-1141.
- [7] Ronan E R, Sudhoff S D, Glover S F, et al A Power Electronic-based Distribution Transformer [J]. IEEE Trans on Power Delivery, 2002, 17(2): 537-543.
- [8] 张桂斌,徐政,王广柱.基于VSC的直流输电系统的稳态建模及其非线性控制[J].中国电机工程学报,2002,22(1):17-22
ZHANG Gui-bin, XU Zheng, WANG Guang-zhu Steady-state Model and Its Nonlinear Control of VSC HVDC System [J]. Proceedings of the CSEE, 2002, 22(1): 17-22
- [9] 段玉倩,贺家李.遗传算法及其改进[J].电力系统及其自动化学报,1998,10(1):39-52
DUAN Yu-qian, HE Jia-li Genetic Algorithm and Its Modification [J]. Proceedings of the EPSA, 1998, 10(1): 39-52
- [10] 张粒子,舒隽,林宪枢,等.基于遗传算法的无功规划优化[J].中国电机工程学报,2000,20(6):5-8
ZHANG Li-zi, SHU Jun, LIN Xian-shu, et al Reactive Power Planning Based on Genetic Algorithm [J]. Proceedings of the CSEE, 2000, 20(6): 5-8
- [11] 潘哲龙,张伯明,孙红斌,等.分布计算的遗传算法在无功优化中的应用[J].电力系统自动化,2001,25(12):37-41.
PAN Zhe-long, ZHANG Bo-ming, SUN Hong-bin, et al A Distributed Genetic Algorithm for Reactive Power Optimization [J]. Automation of Electric Power Systems, 2001, 25(12): 37-41.
- [12] 文劲宇,江振华,姜霞,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.
WEN Jin-yu, JIANG Zhen-hua, JIANG Xia, et al Genetic Algorithm Based Reactive Power Optimization and Its Application in Ezhou City Power System [J]. Automation of Electric Power Systems, 2000, 24(2): 45-47.
- [13] 宋轶博,孙伟,苗友忠.具有变压器分接头和补偿动作次数限制的无功优化[J].继电器,2004,32(14):16-19.
SONG Yi-bo, SUN Wei, MIAO You-zhong Reactive Power Optimization with Operational Limitation of on Load Tap Changers and Shunt Capacitors [J]. Relay, 2004, 32(14): 16-19.
- [14] 赵登福,杨靖,刘昱.基于改进遗传算法的配电网无功优化[J].西安交通大学学报,2001,35(12):1219-1222.
ZHAO Deng-fu, YANG Jing, LIU Yi Reactive Power Optimization of the Radial Distribution System Based on the Improved Genetic Algorithm [J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2001, 35(12): 1219-1222.
- [15] Kenjiiba Reactive Power Optimization by Genetic Algorithm [J]. IEEE Trans on Power Systems, 1994, 9(2): 685-692.
- [16] Augugliaro A, Dusonchet L. Genetic, Simulated Annealing and Tabu Search Algorithms: Three Heuristic Methods for Optimal Reconfiguration and Compensation of Distribution Networks [J]. European Trans on Electrical Power, 1999, 9(1): 35-41.
- [17] Baran M E, Wu F F. Network Reconfiguration in Distribution Systems for Loss Reduction and Load Balancing [J]. IEEE Trans on Power Delivery, 1989, 4(2): 1401-1407.
- [18] 林火华.中压配电网无功优化配置研究[Z].电力工业部电力科学研究院,2000.
LIN Huo-hua The Study of Reactive Power Optimization Based on Medium-voltage Distribution Networks [Z]. Electric Power Science Institute for Electric Power Industry, 2000.

收稿日期: 2005-08-09; 修回日期: 2005-11-21

作者简介:

崔艳艳(1981-),女,硕士研究生,研究方向为大功率电力电子技术
技术在电力系统中的应用;E-mail: cyy21century@163.com

毛承雄(1964-),男,教授、博士生导师,从事大型同步发电机
最佳励磁控制、大功率电力电子技术在电力系统中的应用以及电力
系统动态仿真方面的研究;

陆继明(1956-),男,副教授,研究方向为同步发电机控制及电力
电子技术在电力系统中的应用。

Voltage and reactive power synthetic optimization in the distribution system based on electronic power transformer

CUI Yan-yan, MAO Cheng-xiong, LU Jiming, WANG Dan

(College of Electronics and Electrical Engineering, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China)

(下转第 43 页 continued on page 43)

- 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、自动化运行和管理工作的。

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