

基于主动配电网电压的无功优化控制

现在电力用户对电网的电能质量的要求越来越高，而无功优化作为提高电能质量的一个重要手段得到了广泛的应用。为了有效地提高主动配电网的电能质量，对主动配电网进行无功优化，将电子电力变压器应用于主动配电网的无功电压优化控制中。为了提高优化效率，在简单遗传算法的基础上做了优化改进，提出了改进的遗传算法。然后对带有电子电力变压器的无功优化控制方式进行了算例仿真，仿真结果表明，改进后的算法提高了计算速度，改善了算法收敛性。仿真结果证明，应用电子电力变压器能够对电网进行无功优化，提高电网电压稳定性，对电网的降损节能起着重要的作用。

解大琴/上海工程技术大学高职学院机电工程系



解大琴/讲师

关键词/Keywords

主动配电网·
无功优化·
电力电子变压器·

目前，电力用户对电网电能质量的要求越来越高，为了保障用户的用电需求，提供高质量的电能，需要通过一系列手段来提高当前电网的供电质量。一般通过电压质量来判断电能的质量，而电压的质量又和电网的无功功率密切相关。当前配电网普遍网损过大，对电网进行有效的无功优化是提高电网电能质量的一个重要手段，同时能够有效减少电能损耗，提高经济效益^[1]。

在进行配电网的无功优化过程中，不仅需要保证电压质量，同时还需兼顾配电网潮流，最终需要保证各节点电压的稳定以及减少网损。当前的优化重点是既能保证电路能耗最少，又符合规定的约束条件，在配电网中的约束主要是电压约束、潮流约束。由于在配电网的无功优化过程中，需要考虑多个变量和约束，变量和约束相互交叉影响，这就增加了优化的难度。

目前，常用的无功优化算法有两

种，即数学规划优化算法和启发式的优化算法。数学规划算法稳定性较好同时有严格的收敛判据，并能有效地处理约束集。启发式的人工智能优化算法具有全局搜索能力，在面对变量多、约束多的复杂问题时能够有效解决问题。根据配电网的实际情况，选择合适的算法，是进行无功优化一个重要过程^[2]。

在选定合适的优化算法之后，还要确定优化过程中的控制手段，这也是影响优化效果的一个重要因素。目前常用的控制手段有很多，例如改变变压器的分接头，调节并网电感和电容等。在电网的正常运行中，变压器一般使用多分接开关，导致结构复杂，易引起故障，影响整个系统的稳定运行。

电子电力变压器（EPT）是一种电子变换装置组成的变压器，突出特点是利用电子器件可以发出和吸收无功，还可以避免由于无功反灌而导致的电力污染。电子电力变压器最大的优点是可以方便地实现无功负荷的就地、就近平衡，因此可以避免无功功率在配电网中的长距离输送，极大地降低有功功率损耗，提高配电网的供电效率。在电力电子变压器运行过程中，二次侧绕组的电压值可以保持恒定，能够解决常规变压器分接头只能分级调节的不足^[3]。

综上所述，可以利用电子电力变压器的优点，将电子电力变压器应用于电网，来进行无功电压优化，提高电网供电质量。

电子电力变压器应用于配电网无功优化

1. EPT基本工作原理

图1为EPT的工作原理。EPT的具体实现有两种形式：第一种，在变换的过程中，直接进行电压变换，可以保证高频变压器一次侧高频调制和二次侧解调的一致；第二种，变换过程存在直流变换过程，即对一次侧输入的交流电压先进行AC-DC的变换转换为直流，再将直流调制的高频信号经高频变压器传送到二次侧，然后在二次侧进行DC-AC反变换，变回交流输出。通过实验证明，后者运用常用的PWM波形调制技术，控制特性更灵活方便，能够灵活实现对变压器的一次侧、二次侧电压、电流和功率的控制^[4]。

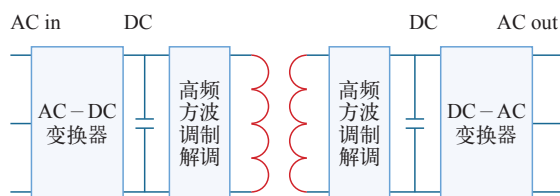


图1 EPT的基本工作原理框图

2. EPT在配电网无功优化数学模型

为确保EPT在配电网中的稳定运行，同时需要考虑到电压、网损的优化，需要对EPT在配电网无功优化的模型进行分析。

在配电网无功优化的过程中，其目标函数为

$$F = \min \left| P_{\text{loss}} + \lambda \sum_{i=1}^n \left| \frac{\Delta V_i}{\Delta V_{\text{im}}} \right|^2 \right| \quad (1)$$

式中， λ 为电压越界惩罚因子。

电压越界量的计算公式为

$$\Delta V_i = \begin{cases} V_{i\min} - V_i & V_i < V_{i\min} \\ 0 & V_{i\min} \leq V_i \leq V_{i\max} \\ V_i - V_{i\max} & V_i > V_{i\max} \end{cases} \quad (2)$$

$$P_{\text{loss}} = \sum_{i,j=1, i \neq j}^n |i_{ij}|^2 R_{ij} \quad (3)$$

$$\Delta V_{\text{im}} = V_{i\max} - V_{i\min} \quad (4)$$

式中， n 为配电网节点总数。

算法改进

1. 改进的遗传算法

目前主要的优化方式是改变有载调压变压器的分接头，这种优化方式基本上能够满足所要控制变量的条件，对于该种优化方式，采用遗传算法求解比较适合控制系统。遗传算法是指通过对系统目标值进行评价，将所得与目标值相差较大的结果抛弃，将得到的与目标值较为接近的结果遗传到下一代，然后再对相关的变量进行相应编码以及重新组合，以此来得到优秀的个体。对上述的操作过程进行重复，当找到最优的方案后结束进程，其缺点是收敛速度慢^[5]。本文对传统的遗传算法进行了以下的改进。

(1) 编码的处理

运用二进制进行编码时，由于运算系统规模变大，所要控制的变量数目会增多，需要频繁地对系统进行解码，所以这样的计算过程比较缓慢；另一方面，当系统运用二进制编码的方式对连续的变量进行相应编码时存在一些处理困难，这种方式需要具有合理的计算机内存以及相应的编码准确度。所以，本文运用实数编码以及十进制整数的编码方式于配电网中，可以较快地缩小搜索空间，加快处理速度^[6]。

(2) 保存最优个体

如果出现这样一种情况，当其中的一代使用度最高的个体优于以前收集到的最优个体，则将这一代直接代替下一代的个体，这种保存最优个体的方式可以保证不会丢失个人的优良品种。

(3) 自适应交叉率和变异率

系统采用自适应的遗传算法，可以根据系统的解的情况灵活自行改变适应值。如果系统中部分出现最优解的趋势，则提高目标值；相反，一部分出现解空间发散的情况，则降低目标值。系统的自适应遗传算法变异率和交叉率计算公式为

$$p_m = \begin{cases} p_{m1} - \frac{p_{m1} - p_{m2}}{f_{\max} - f_{\text{avg}}} & f' \geq f_{\text{avg}} \\ p_{m1} & f' < f_{\text{avg}} \end{cases} \quad (5)$$

$$p_c = \begin{cases} p_{c1} - \frac{p_{c1} - p_{c2}}{f_{\max} - f_{\text{avg}}} & f' \geq f_{\text{avg}} \\ p_{c1} & f' < f_{\text{avg}} \end{cases} \quad (6)$$

式中, $f_{\max}$ 、 f_{avg} 、 f' 分别为最大的适应值、平均适应度值和交叉个体中较大的适应值。

(4) 惩罚因子的自适应调整

自适应惩罚因子的公式如下为

$$\lambda = \begin{cases} \lambda^{t-1} + \lambda_{\text{step}} & \lambda' < \lambda_{\text{max}} \\ \lambda_{\text{max}} & \lambda' \geq \lambda_{\text{max}} \end{cases} \quad (7)$$

在系统进行优化的前期, λ 的取值相对较小, P_{loss} 较大, 促进系统向 P_{loss} 较小的方向进化, 随着 λ 的值变大, 得到带有最小 P_{loss} 值的解。

2. 改进的遗传算法算例验证

本节采用IEEE-33系统,对改进的遗传算法进行验证。图2为节点优化前后的电压幅值比较曲线。

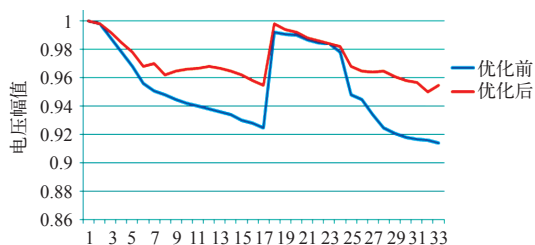


图2 IEEE-33节点优化前后的电压幅值比较

由图2可知,当控制系统采用改进的遗传算法进行优化之后,整个配电网的各个节点电压的幅值都有了较为明显的改善。

在同等条件下,运用EPT来取代配电网中传统的OLTC进行无功的优化,然后对优化前后的效果进行比较。其中,系统的算法参数、终止代数和种群数都为50。

下表是配电网采用EPT前后的有功网损和无功补偿的比较。根据下表可知,配电网系统采用了改进的遗传算法优化后,系统的网损有了较大的降低,同时系统采用EPT的方式,在降低网损功能上能够节省无功补偿设备的费用。

表 有功网损和无功补偿情况比较

指标	不采用EPT	采用EPT
有功网损（优化前）/kW	64.2	68.9
有功网损（优化后）/kW	37.5	38.5
无功补偿/kvar	680	0

EPT在配电网电压稳定控制中的仿真

1. 简单的两节点系统

当电力系统受到外界干扰时，系统的电压和无功功率都会发生相应的变化，系统能够抵抗外界干扰，维持电压稳定和无功功率平衡的状态，这就是所谓的电力系统电压的稳定性^[7]。首先对电力系统的结构进行分析。

图3为本文采用的简单的两节点电力系统示意图, 忽略阻抗中的电阻。

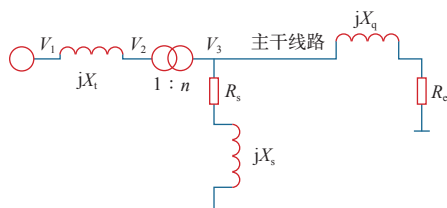


图3 简单的两节点系统示意图

2. OLTC仿真

OLTC采用如下模型来描述

$$dn/dt = -f(V_3 - V_{30})/(\tau/d) \quad (8)$$

式中, n 为变压器的电压比; V_3 和 V_{30} 分别为二次侧电压和参考电压; d 为步长; τ 为每步调整的时延。而函数 $f(x)$ 的表达式为

$$f(x)=\begin{cases} -1 & x<0 \\ 0 & x=0 \\ 1 & x>0 \end{cases} \quad (9)$$

OLTC的二次侧电压计算公式为

$$\begin{aligned} V_3 &= nV_1Z_3/Z_1 \\ Z_1 &= \left| jn^2X_L + (R_s + jX_s) // (R_E + jX_o) \right| \\ Z_3 &= \left| (R_s + jX_s) // (R_E + jX_o) \right| \end{aligned} \quad (10)$$

动态负荷模型中动态电阻满足以下动态方程

$$\begin{aligned} dR_E/dt &= -(R_E^2/T_E)(P_T - P_E) \\ \text{荷上消耗的有功功率为} \\ P_E &= n^2 V_1^2 V_3^2 R_E / |Z_1^2 (R_E^2 + X_\sigma^2)| \end{aligned} \quad (11)$$

设定系统的仿真参数 (标么值) 为 $E_{1\max}=1.2$, $X_G=0.15$, $X_L=0.1$, $X_\sigma=0.05$, $R_s=1.5$, $X_s=1.0$, $d=0.02$, $T_F=0.1$, $\tau=10$, $V_{30}=0.91$, $P_T=1.4$ 。

设系统重载运行，发电机励磁达到限制，系统阻抗突然发生跳变，则系统的仿真曲线如图4所示。

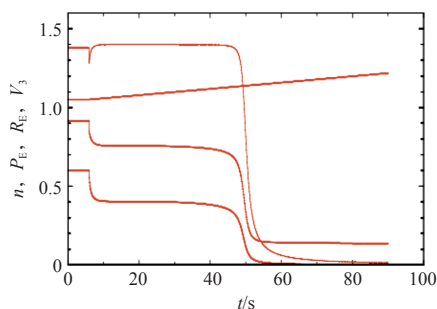


图4 OLTC仿真结果

如图4所示，在 $t=8\text{ s}$ 时阻抗发生跳变之后，可以发现电压和负荷功率产生了较大的下降。之后电网电压就发生了巨大的跌落，电网崩溃。由结果可知，在系统运行过程中，无功功率不足会造成电网电压的波动，严重可以造成电网崩溃，需要采取无功补偿装置来维持系统的电压。

3. EPT仿真

本节在同等实现条件下，系统中元件的仿真模型和参数不变，采用EPT替换上述的OLTC行仿真。

在此过程中，假设整个系统仍然在相同的负荷情况下工作，同样在 $t=8\text{ s}$ 时，线路阻抗发生跳变，则可以得到系统的仿真曲线如图5所示。

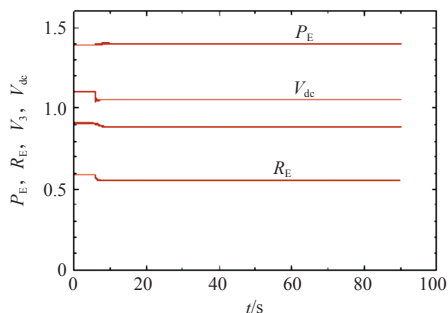


图5 EPC仿真结果

从图5可以看出，在同样的实验条件下用EPT代替OLTC之后，在同一时刻加入相同的扰动，在

整个系统中的电压和功率基本保持不变，系统处于相对稳定的状态。

结束语

无功优化作为提高电能质量的一个重要手段在电力系统优化控制领域得到了广泛的应用，为了有效地对主动配电网进行无功优化，本文将电子电力变压器（EPT）应用于主动配电网的无功电压优化控制中。通过仿真证明，EPT相对于OLTC有更多的优势，能够有效降低网损，减少电网传送过程中的无功功率，能够使电网电压在遇到干扰时保持相对稳定状态，保证了电网的供电质量。

参考文献

- [1] 李惠玲，高振江，庞占星，等．基于全网无功优化的配电网无功优化系统的设计[J]．继电器，2008(10)：31-35．
- [2] 杨广杰，郑华．含分布式电源的配电网电压无功优化问题研究[J]．现代电力，2012(2)：27-31．
- [3] 凌晨，葛宝明，毕大强．配电网中的电力电子变压器研究[J]．电力系统保护与控制，2012(2)：34-39．
- [4] 崔艳艳，毛承雄，陆继明，等．基于电子电力变压器的配电网电压无功综合优化控制[J]．继电器，2006(6)：24-28．
- [5] 李正燕．基于改进遗传算法的配电网无功优化控制[J]．安徽电力，2006(4)：55-57．
- [6] 尤毅，刘东，于文鹏，等．主动配电网技术及其进展[J]．电力系统自动化，2012(18)：10-16．
- [7] 黄安平，蒋金良．考虑分布式发电的无功电压优化控制研究[J]．华东电力，2010(8)：1231-1236．

(收稿日期：2015-06-12) **EA**

欢迎订阅 欢迎投稿 欢迎刊登广告