

DOI: 10.7667/PSPC160321

电力电子变压器在有源配电网无功优化中的应用

张祥龙¹, 周晖², 肖智宏¹, 张伟², 伍迪²

(1. 国网北京经济技术研究院, 北京 102209; 2. 北京交通大学, 北京 100044)

摘要: 尽可能地降低配电网中节点电压的偏差, 是配电网运行的基本要求。为实现对节点电压的有效控制, 提出利用电力电子变压器通过对其一次侧和二次侧电力电子变换器的脉宽调制控制(Pulse Width Moderation, PWM), 改变其一次侧和二次侧潮流的方法加以解决。为此, 构建了含分布式电源、储能元件和电力电子变压器在内的有源配电网无功优化模型, 并运用粒子群优化算法进行求解。仿真结果表明, 含电力电子变压器的有源配电网无功优化后的网损, 低于采用有载调压变压器(On-Load Tap Changer, OLTC)对应网络无功优化后的网损; 且其节点电压与额定值的相对偏差也优于后者, 从而说明了在有源配电网中应用电力电子变压器, 利用其灵活的无功调节功能, 能提高配电网的运行水平。

关键词: 电力电子变压器; 有源配电网; 无功优化; 粒子群算法; 节点电压

Power electronic transformer applied to optimization of reactive power in active distribution system

ZHANG Xianglong¹, ZHOU Hui², XIAO Zhihong¹, ZHANG Wei², WU Di²

(1. State Grid Beijing Economic Research Institute, Beijing 102209, China; 2. Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China)

Abstract: To reduce nodal voltage deviation in distribution system is basic requirement for an active distribution system (ADS) operation. In order to control nodal voltage, power electronic transformer (PET) is proposed. With the help of PWM (pulse width moderation) control at the primary side and the secondary side respectively, power flow at the both side of PET is regulated. Therefore, the optimal passive flow model of an active distribution system is built, which is composed of distributed generators, storage devices and power electronic transformers. Then particle swarm optimization (PSO) is adopted to solve the problem. Simulation results reveal that power loss in the active distribution network is less than that in the same network with on-load tap changer (OLTC) transformer. Meanwhile, the relative error of nodal voltage is less than the latter, which demonstrate that power electronic transformer applied to the active distribution system could improve the operation level with its flexible regulation ability of passive power.

Key words: power electronic transformer (PET); active distribution system; optimization of reactive power; particle swarm optimization (PSO); nodal voltage

0 引言

随着可再生能源的快速发展和智能电网的构建, 配电网的功率传输特性发生了变化, 体现在由于可再生能源和电动汽车的接入, 使得电力网络的功率由之前单方向地从电源侧流到配电侧, 变成了双向流动, 使得传统的配电网成为了有源配电网^[1]。此外, 分布式电源出力波动大, 使得配电网的电压质量难以得到保证, 传统变压器难以快速做出反应,

从而影响了电压的控制效果^[2-3]。

在这种情况下, 电压的控制变得十分重要, 因此迫切需要性能更为优良的电压控制装置, 即要求具有更快的反应速度, 更宽的调节范围。基于电力电子技术的静止无功补偿器(Static Voltage Compensator, SVC)和静止无功发生器(Static Voltage Generator, SVG)从性能上与早期的固定电容投切方式相比, 有了很大的改进, 并得到了广泛的应用^[4]。

近些年来, 电力电子变压器(也有称为固态变压器, 电子电力变压器等)的研制, 得到了业界的关注与重视^[5]。这是由于它具有功率传输、电压和电流变换、高压侧和低压侧的电气绝缘以及变压器两侧

基金项目: 国家电网公司重大科技项目“柔性变电站成套设计技术研究及设备研制”

的潮流控制、节点电压控制、线路的功率因数控制等多种功能,是下一代智能电网中的关键设备^[6]。

由于受器件的材料、拓扑结构以及应用电压等级等方面的限制,目前关于电力电子变压器的研究主要集中在设备的研制上^[7],而将其应用到电力系统中的研究并不多见,文献[8]将电力电子变压器应用在无源配电网中。而美国的北卡大学已率先将电力电子变压器应用于 FREEDM (Future Renewable Electronic Energy Delivery and Management)系统,并着手系统层面的研究^[9],这将成为有源配电网的研究趋势与重点。面对分布式电源的飞速发展对配网的运行提出新的挑战,将电力电子变压器引入有源配电网,充分地发挥其性能优势,变得十分必要。

从系统电压控制的角度来看,需要对全网的无功功率进行控制与管理^[10],从而使电压指标满足运行要求,因此需要对全网无功功率进行优化^[11]。随着优化理论的逐步深入,各种新型的优化算法用于无功优化当中,如入侵杂草算法^[12]、支路切割枚举法^[13]、教与学优化算法^[14]等。其中 PSO 算法^[15]由于其成熟性高,且具有良好的数值计算性能,适合于求解电网的无功优化问题。

基于此,本文针对电力电子变压器引入到有源配电网,需要分析其对电网运行指标的控制性能与效果问题,首先分析了有源配电网中分布式电源、储能元件以及电力电子变压器的特性,然后构建了含电力电子变压器在内的有源配电网无功优化数学

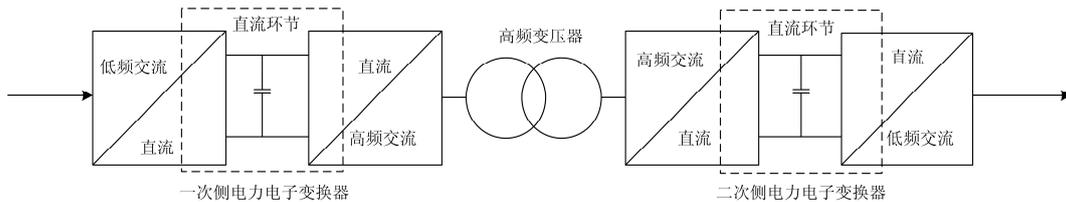


图2 含直流环节的PET拓扑结构

Fig. 2 Typology of PET with DC-link

不论哪种拓扑的PET,其电力电子变换器都通常使用PWM方式进行调制控制。相关研究表明,在原方采用定直流电压控制方式,副方采用定输出交流电压控制方式时,其稳态时通过对电力电子变压器的一二次侧进行近似解耦可以得到:PWM的调制系数与无功功率以及调制角度与原方和副方输出电压之间存在近似的单调函数关系,即 $\Delta Q \propto \Delta M$, $\Delta V \propto \Delta \varphi$,其中 ΔQ 为无功功率变化量, ΔM 为PWM的调制系数变化量, ΔV 为原方或副方的输出电压变化量, $\Delta \varphi$ 为其对应侧的调制角度变化量。因

模型,并采用粒子群算法进行求解,最后用算例说明电力电子变压器对有源配电网电压控制指标以及网损指标的改善。

1 含电力电子变压器的有源配电网无功优化模型

1.1 电力电子变压器原理与结构

电力电子变压器(Power Electronic Transformer, PET)也称为电子电力变压器(Electronic Power Transformer, EPT)或固态变压器(Solid State Transformer, SST),是一种含有电力电子变换器且通过高频变压器实现磁耦合的变电装置,通过电力电子变换技术和高频变压器实现电力系统中的电压变换和能量传递。其原理图如图1所示,在原边将工频信号交流电通过电力电子变换器转化为高频信号交流电,然后通过中间的高频隔离变压器耦合到副边,再通过电力电子变换器还原成工频交流电供用户使用。

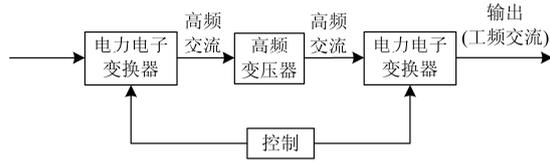


图1 PET的原理图

Fig. 1 Schematic diagram of PET

通常根据电力电子变换过程中是否含有直流环节,可分为无直流环节的PET和含直流环节的PET,常用的是后者,如图2所示^[16]。

此原边和副边可以通过PWM的调制系数 M 和调制角度 φ 来控制无功功率 Q 以及输出电压 V ^[17]。

1.2 目标函数

对于配电网的无功优化问题,其目标是最大程度地减少网损,同时使得所有节点电压的相对偏差在规定的范围内,故目标函数为

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

式中: P_{Loss} 是配电网的损耗; λ 为惩罚因子,用于控制节点电压在允许的范围。一旦节点电压高于

其上限或者低于下限值时, 惩罚项将会变得很大。

$\lambda \sum_{i=1}^n |\Delta V_i / \Delta V_{im}|^2$ 是关于所有节点的惩罚函数。

节点 i 的电压偏移 ΔV_i 按照式(2)进行计算。

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

节点 i 的电压范围 ΔV_{im} 为

$$\Delta V_{im} = V_{i\max} - V_{i\min} \quad (3)$$

故节点电压就会被限定在式(4)所示的范围内, 从而可保证节点电压质量满足规定的要求。

$$V_{i\min} \leq V_i \leq V_{i\max} \quad (4)$$

式(1)中的 P_{Loss} 按式(5)计算。

$$P_{\text{Loss}} = \sum_{i=1}^n V_i \sum_{j \in i} V_j (G_{ij} \cos \delta_{ij} + B_{ij} \sin \delta_{ij}) \quad (5)$$

式(2)~式(5)中: n 为节点的个数; V_i , $V_{i\max}$ 和 $V_{i\min}$ 分别为节点 i 的电压、电压最大值和电压最小值; G_{ij} , B_{ij} 和 δ_{ij} 分别为节点 i 和节点 j 之间的电导、电纳以及相位角。

1.3 约束条件

无功优化问题, 需要满足以下约束条件。

1) 所有节点的有功功率和无功功率平衡约束, 用公式表示为

$$P_i = V_i \sum_{j=1}^n V_j (G_{ij} \cos \delta_{ij} + B_{ij} \sin \delta_{ij}) \quad (6)$$

$$Q_i = V_i \sum_{j=1}^n V_j (G_{ij} \sin \delta_{ij} + B_{ij} \cos \delta_{ij}) \quad (7)$$

式中: V_i 和 V_j 为节点 i 和节点 j 的电压; P_i 和 Q_i 为注入节点 i 的有功和无功功率。

2) 对于不含电力电子变压器的有源配电网, 常采用开断电容组和调节有载调压变压器分接头来进行电压控制, 其控制变量需满足

$$\begin{cases} C_{k\min} < C_k < C_{k\max} \\ T_{i\min} < T_i < T_{i\max} \end{cases} \quad (8)$$

式中: C_k 是第 k 个电容器组的电容大小; T_i 为第 i 个变压器分接头的位置。

3) 对于含电力电子变压器的有源配电网, 由于电力电子变压器可以吸收和产生无功。如果用电力电子变压器来代替有载调压变压器, 则其控制变量则变为电力电子变压器原边的调制系数 M_{k1} 和调制角度 φ_{k1} , 以及副边的调制系数 M_{k2} 和调制角度 φ_{k2} , 这些控制变量需满足

$$\begin{cases} 0 \leq M_{k1}, M_{k2} \leq 1 \\ -45^\circ \leq \varphi_{k1}, \varphi_{k2} \leq 45^\circ \end{cases} \quad (9)$$

4) 假设电力电子变压器的内部损耗忽略不计, 则原边的有功功率 P_{k1} 和无功功率 Q_{k1} 以及副边的有功功率 P_{k2} 和无功功率 Q_{k2} 需满足

$$\begin{cases} P_{k1} = P_{k2} \\ \sqrt{P_{k1}^2 + Q_{k1}^2} \leq S_k \\ \sqrt{P_{k2}^2 + Q_{k2}^2} \leq S_k \end{cases} \quad (10)$$

式中, S_k 为电力电子变压器的视在功率。

2 粒子群算法及其应用

2.1 粒子群算法

粒子群优化算法是一种基于群智能启发式全局随机优化算法, 其参照群体中目前处于最优位置的个体和自身曾经到达的最优位置调整下一步的搜索方向和位置。在基本粒子群算法中, 粒子群由 m 个粒子组成, 每一个粒子的位置 X_i 代表优化问题在 D 维搜索空间中潜在的解。每个解都可以想象为搜索空间上的一个点, 称之为粒子。其数学描述如下所述。

一个由 m 个粒子(particle)组成的群体在 D 维搜索空间进行搜索。每个粒子 i 包含一个 D 维位置向量 $\mathbf{X}_i = (X_{i1}, X_{i2}, \dots, X_{iD})$ 和速度向量 $\mathbf{V}_i = (V_{i1}, V_{i2}, \dots, V_{iD})$, $i=1, 2, \dots, m$, 粒子 i 搜索解空间时, 保存其搜索到的最优经历位置 $p_{\text{best}i}$, 在每次迭代初, 根据自身惯性和经验及群体最优经历位置 $g_{\text{best}i}$ 来调整自己的速度向量以调整自身位置。每个粒子的位置变化(如图 3)按式(11)、式(12)进行。

$$V_{id}^{k+1} = \omega V_{id}^k + c_1 \text{rand}_1^k (p_{\text{best}id}^k - x_{id}^k) + \quad (11)$$

$$c_2 \text{rand}_2^k (g_{\text{best}id}^k - x_{id}^k) \quad (12)$$

$$x_{id}^{k+1} = x_{id}^k + V_{id}^{k+1}$$

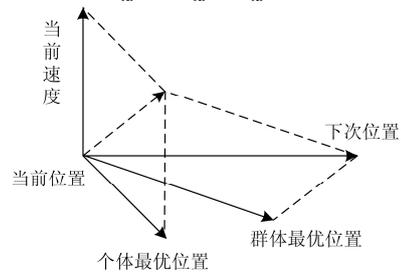


图 3 粒子移动图

Fig. 3 Schematic diagram of particle movement

式中: k 为迭代次数; $d=1, 2, \dots, D$; ω 为惯性权重, 用来保持之前的速度, 通常置为 $[0.8, 1.2]$; c_1 和 c_2 为学习因子, 或称加速常数, 用于表示历史最优解和

全局最优解之间的权重, 这些系数反映了粒子的学习程度, 可取做 2; $rand_1$ 和 $rand_2$ 为区间[0, 1]之间的随机数; V_{id}^k 为第 i 个粒子在 d 维空间第 k 次迭代的速度; x_{id}^k 为第 i 个粒子在 d 维空间第 k 次迭代的位置。另外通常设置粒子的速度区间 $[-V_{max}, V_{max}]$ 和位置范围 $[X_{min}, X_{max}]$, 则可以对粒子的移动进行适当的限制。

进一步理解式(11)可以将其分为 3 个部分。

第一部分(即 ωV_{id}^k), 反映粒子当前速度对更新速度向量的影响, 联系粒子当前的状态, 起到了平衡全局和局部搜索的能力。

第二部分(即 $c_1 rand_1^k (p_{bestid}^k - x_{id}^k)$), 反映粒子自身信息对速度向量的影响, 即粒子本身的记忆的影响, 体现搜索的深度。

第三部分, 即($c_2 rand_2^k (g_{bestid}^k - x_{id}^k)$), 反映群体信息的影响, 体现粒子之间的信息共享的全局性。

2.2 粒子群优化的步骤

粒子群优化计算的步骤如下所述。

- (1) 初始化: 给出粒子群计算的初始参数, 包括给出 D 维中 m 个粒子的随机初始速度和位置。
- (2) 评价粒子: 计算 m 个粒子的目标值(适应度值)。
- (3) 更新最优: 对每个粒子, 将其当前目标值与

其历史最佳位置(P_{Best})对应的目标值比较, 如果当前的目标值更高, 则将当前位置更新历史最佳位置(P_{Best})。对每个粒子, 将其当前目标值与其全局最佳位置(G_{Best})对应的目标值比较, 如果当前的目标值更高, 则将当前位置更新历史最佳位置(G_{Best})。

(4) 更新粒子: 按照式(11)和式(12), 修正第 i 个粒子的速度和位置。

(5) 停止条件: 检查一下迭代计算条件是否满足, 假如达到了允许的迭代次数, 或者是得到了最优解, 或者是粒子的速度或位置都不再发生变化, 则停止迭代, 否则返回步骤(2)继续迭代。

3 仿真及分析

3.1 仿真前的准备

1) 配电网结构与参数

对文献[10]中 33 节点, 32 条支路的辐射配电网做某些修正, 含有 DG 和存储单元, 图 4 中的变压器采用有载调压变压器, 图 5 采用的是电力电子变压器, 其中:

- (1) 3 个风电厂接在节点 17, 21 和 32;
- (2) 两组存储单元接在节点 9 和 25;
- (3) 3 个无功功率控制器件, 有载调压变压器或电力电子变压器接在节点 16, 20, 31;

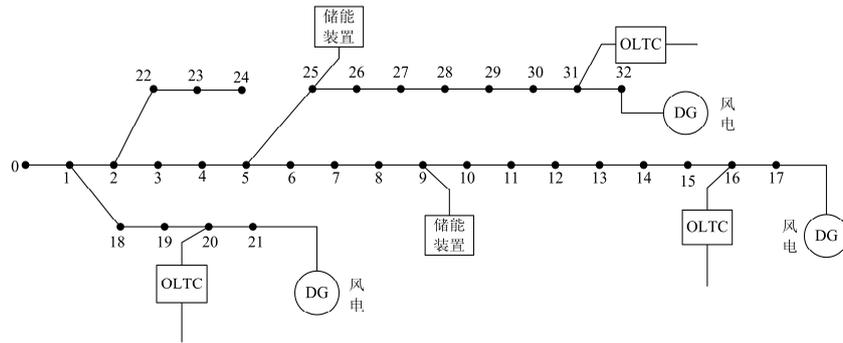


图 4 采用有载调压变压器的有源配电网

Fig. 4 Active distribution system with OLCT

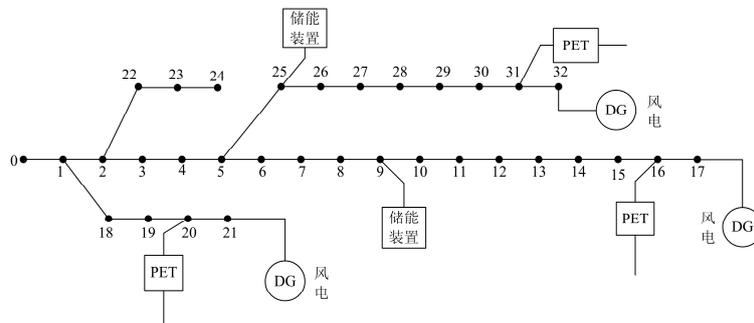


图 5 采用电力电子变压器的有源配电网

Fig. 5 Active distribution system with PET

(4) 用于无功补偿的分散式电容器组, 接在节点 16,20 和 31;

(5) 节点 0 为该 10 kV 配电网的外部电源输入端。线路参数和负荷参数见文献[13]。

在进行潮流计算时, 基准电压取 10 kV, 基准视在功率取 10 000 kVA。

2) PSO 的参数

初始种群规模定为 30, t 最大的迭代次数为 300, 粒子的维数设为 3, 收敛精度设为 10^{-6} 。

3) DG 和储存单元的参数

(1) 风力发电机: 额定容量 600 kW, 额定电压 0.69 kV, 功率因素 0.89, 这第 3 个机组通过 0.69/10 的变压器接入主网。

(2) 存储单元: 在正常负载情况下, 充电装置充电, 最大容量为 200 kW, 在重负荷情况下, 充电装置放电, 其放电容量为 -200 kW。在潮流稳态计算时, 假设充电或放电是瞬间完成的。

(3) 假设有载调压变压器和电力电子变压器的变比和内部损耗是相等的。在进行有载调压变压器的配网潮流计算时, 必须考虑电容器组的作用, 因为有载调压变压器不能产生无功。而对于电力电子变压器则不需要电容器组, 这是因为电力电子变压器可以通过调节变压器原边和副边的 PWM 调制系数控制无功功率。

3.2 仿真计算

1) 无无功优化时

基于上述提到的变压器变比和内部损耗的假设, 在正常负荷情况下, 含有载调压变压器配电网的潮流计算结果和电力电子变压器是相同的, 见图 6, 其中各节点的初始电压都假设为 1。

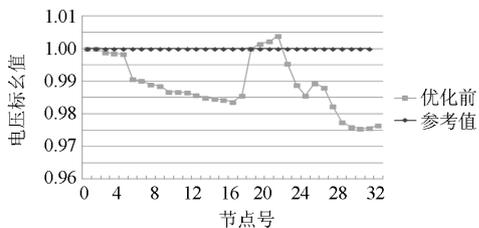


图 6 正常负荷情况下, 有源配电网无功优化前的节点电压
Fig. 6 Nodal voltage for active distribution system without reactive power optimization under normal load

从图 6 可以看出: 所有节点电压都在允许范围内, 但是各节点电压的变化情况不尽相同, 节点 30 和节点 31 的电压偏差要大于其他节点。

此外, 由潮流计算结果得到优化前的全网网损值为 41.1324 kW。

2) 含有载变压器的配电网无功优化仿真结果

图 7 为含有载变压器的配电网经无功优化后各节点的电压值。

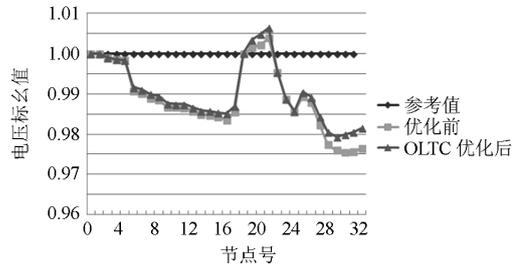


图 7 含有载变压器的无功优化前后节点电压比较
Fig. 7 Comparison of nodal voltage with OLTC reactive power optimization and without reactive power optimization

从图 7 可以看出: 优化后所有节点的电压偏差要小于优化前, 两者之间的最大偏差减少达 23%。

此时, 系统投入无功补偿的电容器容量为 320 kvar。由潮流计算结果知网损减少到 30.4394 kW, 无功功率减少了 26%。

3) 含电力电子变压器的配电网无功优化仿真结果

图 8 为含电力电子变压器的配电网, 在无功优化前后节点电压的计算结果。

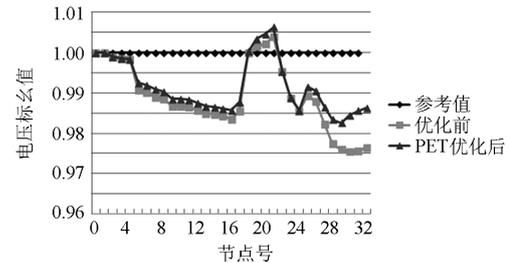


图 8 含电力电子变压器的无功优化前后节点电压比较
Fig. 8 Comparison of nodal voltage with PET reactive power optimization and without reactive power optimization

从图 8 可以看出: 所有节点的电压偏差与未优化的情况相比变小了, 最大的减少了 41%., 这说明电力电子变压器具有更好的电压调节性能。

此外, 由潮流计算结果得到, 此时的网损为 25.9833 kW, 与未优化前相比减少了近 37%。电力电子变压器提供了 303.6 kvar 的无功功率。由于不需要电容器组, 在系统无功装置配置时, 还可以减少这部分的投资。

4 结论

归纳以上所做的研究工作, 得到如下几点结论:

1) 构建了含风电、储能装置、电力电子变压器在内的有源配电网的无功优化模型, 把网损最小作为无功优化的目标函数, 并考虑了各种运行约束, 采用粒子群算法进行求解。

2) 在正常负荷情况下, 分别针对电力电子变压器和有载调压变压器两种情况进行仿真。仿真结果表明, 在正常负荷情况下, 含电力电子变压器的有源配电网的网损要低于含有载调压变压器的有源配电网, 且所有节点电压偏差要小于后者。因此电力电子变压器具有更好的电压控制性能。

3) 由于电力电子变压器能够产生和吸收无功功率, 故在有源配电网中不需要配备无功补偿用电容器组, 且通过控制 PWM 的调制参数来控制无功控制, 这种控制方式更为灵活且方便。

参考文献

- [1] 努尔丁. 有源智能配电网[M]. 北京: 中国电力出版社, 2012.
- [2] 陈继明, 祁丽志, 孙明好. 多场景下含风电机组的配电网无功优化的研究[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 44(9): 129-134.
CHEN Jiming, QI Lizhi, SUN Mingyu. Reactive power optimization for distribution network with multi-scenario wind power generation[J]. Power System Protection and Control, 2015, 44(9): 129-134.
- [3] ACKERMANN T, KNYAZKIN V. Interaction between distributed generation and the distribution network: operation aspects[C] // IEEE Power Engineering Society Transmission and Distribution Conference, Yokohama, Japan, 6-10 Oct, 2002: 1357-1362.
- [4] 蒋建民. 电力网电压无功功率自动控制系统[M]. 沈阳: 辽宁科学技术出版社, 2010.
- [5] BROOKS J L. Solid state transformer concept development[R]. Nasa Sti/recon Technical Report N, 1980.
- [6] 马红星, 李华武, 杨喜军. 配电网的电力电子变压器技术的综述(下)[J]. 变频器世界, 2012(2): 47-52.
MA Hongxing, LI Huawu, YANG Xijun. Reviews of power electronics transformer technologies in distribution networks[J]. The World of Inverters, 2012(2): 47-52.
- [7] 李子欣, 王平, 楚遵方, 等. 面向中高压智能配电网的电力电子变压器研究[J]. 电网技术, 2013, 37(9): 2592-2601.
LI Zixin, WANG Ping, CHU Zunfang, et al. Research on medium-and high-voltage smart distribution grid oriented power electronic transformer[J]. Power System Technology, 2013, 37(9): 2592-2601.
- [8] 崔艳艳. 基于电子电力变压器的配电网无功优化控制[D]. 武汉: 华中科技大学, 2008.
CUI Yanyan. Optimal control of reactive power in distribution system based on electronic power transformer[D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2008.
- [9] SHEN Z, BERAN M E. Gradient based centralized optimal volt/var control strategy for smart distribution system[C] // 2013 IEEE PES Innovative Smart Grid Technologies Conference, Washington, DC, United States, 23-24 Feb, 2013: 1-6.
- [10] 王守相, 王成山. 现代配电系统分析[M]. 北京: 高等教育出版社, 2007.
- [11] 华志强. 含分布式电源的配电网无功优化[D]. 西安: 西安理工大学, 2011.
HUA Zhiqiang. Optimization of reactive power for distribution system with distributed generations[D]. Xi'an: Xi'an University of Technology, 2011.
- [12] 吕忠, 周强, 蔡雨昌. 含分布式电源的 DEIWO 算法配电网无功优化[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(4): 69-73.
LÜ Zhong, ZHOU Qiang, CAI Yuchang. Reactive power optimization in distribution network with distributed generation on DEIWO algorithm[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(4): 69-73.
- [13] 周静, 边海峰, 贾晨, 等. 基于分区的含 DG 配电网实时无功优化[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(23): 117-124.
ZHOU Jing, BIAN Haifeng, JIA Chen, et al. Real-time reactive power optimization in distribution network with DG based on partitions[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(23): 117-124.
- [14] 刘前进, 许慧铭, 施超, 等. 改进教与学方法在电力系统无功优化中的应用[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(9): 82-88.
LIU Qianjin, XU Huiming, SHI Chao, et al. Research on modified teaching-learning algorithm for reactive power optimization[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(9): 82-88.
- [15] 刘军民, 高岳林. 混沌粒子群优化[J]. 计算机及其应用, 2013, 49(17): 43-46, 138.
LIU Junmin, GAO Yuelin. Chaos particle swarm optimization[J]. Computer and Its Application, 2013, 49(17): 43-46, 138.
- [16] 陈启超, 纪延超, 潘延林, 等. 配电系统电力电子变压器拓扑结构综述[J]. 电工电能新技术, 2015, 34(3): 41-48.
CHEN Qichao, JI Yanchao, PAN Yanlin, et al. Review of power electronic transformer topologies applied to distribution system[J]. Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy, 2015, 34(3): 41-48.
- [17] 毛承雄. 电子电力变压器[M]. 北京: 中国电力出版社, 2010.

收稿日期: 2016-03-11; 修回日期: 2016-07-25

作者简介:

张祥龙(1983-), 男, 博士, 高级工程师, 研究方向为电力系统自动化规划与设计, 智能变电站设计与评价等; E-mail: zhangxianglong@chinasperi.sgcc.com.cn

周晖(1964-), 女, 通信作者, 博士, 副教授, 研究方向为电力系统分析, 经济调度, 电力规划等; E-mail: hzhou@bjtu.edu.cn

肖智宏(1977-), 男, 博士, 高级工程师, 研究方向为电力系统分析与控制, 电网规划与评价, 光电传感等。

(编辑 姜新丽)