

源荷波动时含固态变压器的有源配电网 动态无功优化方法

孙汝羿, 袁至, 王维庆, 何山

(新疆大学 可再生能源发电与并网控制教育部工程研究中心, 新疆 乌鲁木齐 830017)

摘要: 针对分布式电源并网引起的双向潮流导致网损增大以及分布式电源、负荷的波动导致节点电压波动等问题, 文章基于固态变压器(Solid State Transformer, SST)两侧电力电子变换器的脉冲宽度调制技术, 提出了一种控制潮流的方法。该方法首先建立了含SST的有源配电网动态无功优化模型; 然后以多时刻的有功网损和电压波动为优化目标, 采用改进多目标粒子群算法对SST的一、二次侧的电力电子变换器的调制角和调制系数等多个控制变量进行求解; 最后建立仿真模型并与基于有载调压变压器的有源配电网动态无功优化方法进行比较。结果证明了所提方法在降低配电网网损和维持节点电压稳定方面的优越性。

关键词: 固态变压器; 有源配电网; 动态无功优化; 多目标粒子群

中图分类号: TK51; TK81 **文献标志码:** A **文章编号:** 1671-5292(2024)07-0937-09

0 引言

随着风机、光伏电池的迅速发展, 配电网的能量流动由传统单向流动变为复杂的双向流动, 传统配电网向着有源配电网转型^[1]。同时, 由于风速和光照强度的非线性、随机性和不可控性^[2], 分布式电源(Distributed Generation, DG)的接入对配电网的稳定运行、维持电压稳定、降低配电网网损提出了更大的挑战。然而, 这些问题均可以通过无功优化得到明显缓解, 因此研究无功优化对分布式电源并网具有重要意义。

目前, 已有大量关于各种无功优化器件的研究。其中, 最常用的设备类型是有载调压变压器(On-Load Tap Changer, OLTC)、电容器组(Capacitor Banks, CBs)^[3]。但有载调压变压器的分接头与投切电容器只能分组调节, 调节精度差, 分接头频繁动作会增加系统故障概率; 并且在无功优化开环控制的情况下, 有载调压变压器频繁调节, 不仅会加重维护人员的工作强度, 并且可能会因操作设备过多产生操作失误, 不利于系统的安全运行^[4]。随着电力电子技术的不断发展, 新型固态变压器(Solid State Transformer, SST)逐渐进入人们的视野, 它具有利用一、二次侧的电力电子变换器的脉冲宽度调制技术(Pulse Width Modulation, PWM)

实现潮流的控制, 为系统提供无功, 替代传统的变压器和无功补偿器, 从而实现有功转移、无功补偿、电压转换的一体化的功能。目前, 针对SST的研究主要集中在拓扑结构以及控制策略方面^[5-7], 在配电网应用方面还比较少。文献[8]提出将SST代替传统OLTC应用于无源配电网进行无功优化, 验证了SST的优越性, 但未考虑DG接入配电网对网损和节点电压的影响。文献[9]分析了含SST的配电网的结构特点, 提出了一种适用于含SST配电网的交替迭代潮流算法, 为后续研究含SST的配电网的无功优化奠定了基础。文献[10]在文献[8]的基础上, 将SST应用在含分布式电源的配电网中进行无功优化研究, 验证了含SST的有源配电网在网损优化方面的优越性, 但未考虑DG和负荷随机性对网损和节点电压的影响。文献[11]则在文献[10]的基础上通过细菌觅食算法对含SST的有源配电网进行重构来降低网损。文献[12]在文献[10]的基础上对含SST的有源配电网引入储能等有功调节手段对配电网进行网损优化, 配电网的网损得到了进一步减少, 但仍未考虑DG和负荷随机性对网损和节点电压的影响。因此, 考虑分布式电源和负荷的波动, 对含SST的有源配电网进行动态无功优化的研究分析具有重要

收稿日期: 2023-03-22。

基金项目: 国家自然科学基金(52067020, 51767024); 新疆维吾尔自治区重点实验室开放课题(2018D04005); 新疆维吾尔自治区高校科研计划项目(XJEDU20211010)。

通信作者: 袁至(1984-), 男, 博士, 硕士生导师, 研究方向为风力发电控制与并网技术。E-mail: yzisthecure@163.com

的理论和现实意义。

配电网无功优化求解时不仅要满足配电网网损尽可能小,还要保证节点电压波动尽可能小,这就成为一个多目标求解问题。配电网无功优化求解算法目前已有许多,如粒子群算法^[8]、入侵杂草算法^[10]、遗传算法^[13]和细菌觅食算法^[14]等,其中粒子群算法目前最为成熟,且具有易改进和收敛速度快等优点。

基于上述分析,本文以多时刻的有功网损和电压波动为优化目标,使用改进多目标粒子群算法对含 SST、风机、光伏电池、电池储能系统(Battery Energy Storage System, BESS)和电容器组的配电网无功优化模型的多个控制变量进行求解,最后用算例证明了源荷波动时采用 SST 两侧电力电子变换器的 PWM 技术控制潮流为系统提供无功的方法,在降低配电网网损和维持节点电压稳定方面的优越性。

1 含固态变压器的有源配电网无功优化模型

1.1 固态变压器原理

固态变压器又称电力电子变压器,整体结构是由电力电子器件构成的,目前较为常见的 SST 为三级型,输入级、输出级为电力电子器件构成的电力电子变换器,实现电流的交直流的改变;隔离级利用高频隔离变换技术实现电压等级的改变以及体积的减小^[15]。其原理如图 1 所示。硬件如图 2 所示。

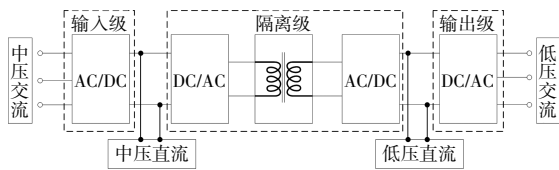


图 1 SST 原理图

Fig.1 SST schematic diagram



图 2 SST 硬件图

Fig.2 SST hardware figure

1.2 SST 无功控制原理

图 3 为 SST 简化的物理模型。

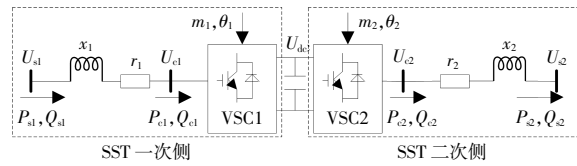


图 3 SST 简化物理模型

Fig.3 SST simplified physical model

SST 两侧的电压源换流器 (Voltage Source Converter, VSC) 均采用恒压控制方式以及 PWM 调制策略; P_{si}, Q_{si} 和 U_{si} 分别为 SST 一二次侧与系统之间交换的有功、无功功率和电压; P_{ci}, Q_{ci} 分别为 VSC 两侧输入、输出的有功和无功功率; U_{ci} 为 VSC1 输入电压和 VSC2 输出电压; U_{dc} 为直流环节的电压; x 和 r 为两侧的等效电抗和等效电阻; m_i 和 θ_i 分别为 VSC 的调制角和调制系数; $i=1,2$, 分别对应着 SST 一、二次侧变换器的电气参数。以下将从 SST 的一、二次侧分别建立数学模型并进行分析。

考虑 SST 的损耗时, SST 的功率方程存在如下关系:

$$\begin{cases} P_{si} = [U_{si}U_{ci}Y_i \sin(\theta_i - \alpha_i) + U_{si}^2 Y_i \sin \alpha_i] (-1)^{i+1} \\ P_{ci} = [U_{si}U_{ci}Y_i \sin(\theta_i + \alpha_i) - U_{ci}^2 Y_i \sin \alpha_i] (-1)^{i+1} \\ Q_{si} = [-U_{si}U_{ci}Y_i \cos(\theta_i - \alpha_i) + U_{si}^2 Y_i \cos \alpha_i] (-1)^{i+1} \\ Q_{ci} = [U_{si}U_{ci}Y_i \cos(\theta_i + \alpha_i) - U_{ci}^2 Y_i \cos \alpha_i] (-1)^{i+1} \end{cases} \quad (1)$$

式中: $\alpha_i = \arctan(r_i/x_i)$; $Y_i = (r_i^2 + x_i^2)^{-1/2}$; $x_i = \omega L_i$; $U_{ci} =$

$$\frac{m_i}{\sqrt{2}} U_{dc}; i=1, 2.$$

由上述分析可知, m_i 决定 U_{ci} 的大小, 有功功率 P 以及无功功率 Q 的大小可通过 θ_i 和 m_i 来改变。

1.3 分布式电源出力

1.3.1 风机发电出力

风机有功功率的大小由风速决定的, 本文通过改变风速模拟风机功率波动, 风机有功功率 P_w 与风速 v 的关系为

$$P_w = \begin{cases} 0, & 0 \leq v \leq v_{ci} \text{ 或 } v > v_{co} \\ P_r \frac{v - v_{ci}}{v_r - v_{ci}}, & v_{ci} < v \leq v_r \\ P_r, & v_r < v \leq v_{co} \end{cases} \quad (2)$$

式中: v_r, P_r 分别为风机的额定风速和额定功率; v_{ci}, v_{co} 分别为切入风速和切出风速。

1.3.2 光伏发电出力

光伏发电出力与光照强度密切相关,本文通过改变光照强度模拟光伏发电功率波动,光伏发电的有功功率 P_s 与光照强度 r 关系为

$$P_s = A\eta r \quad (3)$$

式中: A, η 分别为太阳能电池板的面积和电能转换率。

1.4 目标函数

经济性和安全性是无功优化最基本的目的。经济性即尽可能大地降低网损^[6],安全性即保证电压波动在允许范围之内,尽可能保持电压稳定。因此,本文无功优化的目标函数共有两个:有功网损 F_{loss} 和电压波动 $F_{\Delta u}$ 。

$$\begin{cases} F_{\text{loss}} = \min f_{\text{loss}} = \sum_{t=1}^T \sum_{i,j \in N_L} G_{ij} \left[\frac{(u_i^t)^2 + (u_j^t)^2}{2u_i^t u_j^t \cos(\theta_{ij}^t)} - 1 \right] \\ F_{\Delta u} = \min f_{\Delta u} = \sum_{t=1}^T \sum_{i=1}^{N_{\text{bus}}} \left(\frac{\Delta u_i^t}{u_{i,\text{max}}^t - u_{i,\text{min}}^t} \right)^2 \end{cases} \quad (4)$$

式中: F_{loss} 和 $F_{\Delta u}$ 分别为 T 个时刻的网损和电压波动的最小值; f_{loss} 和 $f_{\Delta u}$ 分别为 T 个时刻的网损和电压波动; N_L 为配电网所有的支路构成的集合; u^t 和 Δu^t 分别为 t 时刻的节点电压和电压偏移量; G 为配电网每条支路的电导; θ 为相角差; 下标 i, j 为支路集合 N_L 中的每条支路的节点编号; N_{bus} 为配电网的节点总数。

1.5 约束条件

①系统潮流方程

$$\begin{cases} P_i = u_i \sum_{j=1}^{N_{\text{bus}}} u_j (G_{ij} \cos \theta_{ij} + B_{ij} \sin \theta_{ij}) \\ Q_i = u_i \sum_{j=1}^{N_{\text{bus}}} u_j (G_{ij} \sin \theta_{ij} - B_{ij} \cos \theta_{ij}) \end{cases} \quad (5)$$

式中: P_i, Q_i 分别为 i 节点的发电机与负荷有功、无功的差; B_{ij} 为支路电纳。

②配电网不等式约束

$$\begin{cases} u_{i,\text{min}} \leq u_i \leq u_{i,\text{max}} \\ 0 \leq P_{i,\text{DG}} \leq P_{i,\text{DG},\text{max}} \\ Q_{i,\text{DC},\text{min}} \leq Q_{i,\text{DC}} \leq Q_{i,\text{DC},\text{max}} \\ C_{k,\text{min}} < C_k < C_{k,\text{max}} \\ T_{i,\text{min}} < T_i < T_{i,\text{max}} \end{cases} \quad (6)$$

式中: $P_{i,\text{DG}}, Q_{i,\text{DC}}$ 分别为节点 i 接入的分布式电源有功功率和无功功率; C_k, T_i 分别为电容器的组数和

OLTC 分接头的档位。

③SST 控制变量约束和功率约束

$$\begin{cases} 0 < m_1, m_2 \leq 1 \\ -45^\circ < \theta_1, \theta_2 < 45^\circ \\ \sqrt{P_{ci}^2 + Q_{ci}^2} \leq S_c \end{cases} \quad (7)$$

式中: S_c 为视在功率。

2 改进多目标粒子群算法

2.1 多目标粒子群算法

Eberhart 博士和 Kennedy 博士在 1995 年首次提出了粒子群算法 (Particle Swarm Optimization, PSO)^[17]。该算法的灵感来源于鸟群觅食行为,即通过模仿鸟群在区域内寻找最大食物源的过程而得来。

工程实际应用问题上常常不止一个优化目标,通常是两个相互矛盾的目标,为了解决这类实际问题,多目标粒子群算法在 2004 年首次被提出。该算法通过将满足收敛条件的解进行存储,获得一组满足条件的非劣解集,随后从得到的非劣解集中选取一个解作为导向解,指导其他粒子的飞行,达到最大迭代次数后,得到 Pareto 前沿^[15],得到的解集根据实际问题选取一组最佳优化方案用于解决实际问题。多目标粒子群算法继承了粒子群算法诸多优点,如变量少、简单、易改进、收敛速度快等。

MOPSO 算法与 PSO 算法采用相同的粒子生成方式,随机粒子更新自己的速度和位置,经多次迭代后得到最优解。

$$\begin{cases} V_i^n = \omega V_i^{n-1} + c_1 r_1 (p_i^n - x_i^n) + c_2 r_2 (g^n - x_i^n) \\ x_i^{n+1} = x_i^n + V_i^{n+1} \end{cases} \quad (8)$$

式中: n 为迭代次数; g 为种群最优个体位置; x_i, V_i 和 p_i 分别为第 i 个粒子个体当前位置、速度和历史最优位置; r 为 $[0, 1]$ 内的随机数; ω, c 分别为惯性因子和学习因子。

多目标优化问题表达式为

$$\max/\min F(X) = \{f_1(X), f_2(X), \dots, f_\varphi(X)\} \quad (9)$$

式中: φ 为目标函数个数; X 为优化方案。

在多数情况下,多目标问题的 φ 个目标函数是相互矛盾的,不存在某个 X 能使得 φ 个目标函数同时满足极值。为解决该问题,引入概念^[18]:

①Pareto 支配。对于任意决策向量 p 和 q , 当

且仅当 $\forall i \in \{1, 2, \dots, \varphi\}, f_i(\mathbf{p}) \leq f_i(\mathbf{q})$; 且 $\exists j \in \{1, 2, \dots, \varphi\}, f_j(\mathbf{p}) < f_j(\mathbf{q})$ 命题为真时, 称 \mathbf{p} 支配 \mathbf{q} ;

②Pareto 最优解。Pareto 最优解又称为 Pareto 非劣解, Pareto 最优解 \mathbf{p} 不会被任意一个决策向量所支配, 即所有的决策向量 \mathbf{q} 都不可支配决策向量 \mathbf{p} 。

多目标优化时群体极值的确定与 PSO 算法极值的确定有本质的不同, 为解决确定群体极值的问题, 本文采用不断更新的外部存档机制的方法^[19]。更新方式如下: 粒子迭代产生的新个体不能支配外部存档中的任意个体, 则该个体不能并入外部存档; 若迭代产生的新个体可支配外部存档中的任意个体, 则新个体可以并入外部存档中。若外部存档个体数目达到最大值, 则淘汰拥挤度距离最小的个体, 粒子拥挤度距离计算式如下:

$$d(b) = \sum_{i=1}^{\varphi} \frac{f_i(a) - f_i(c)}{f_{i,\max} - f_{i,\min}} \quad (10)$$

式中: a, b, c 为 3 个连续的粒子; $f_{i,\max}, f_{i,\min}$ 分别为外部存档中所有粒子第 i 个目标函数的最大值、最小值。

2.2 多目标粒子群算法的改进

2.2.1 惯性动态权重

ω 的选取对粒子群算法的求解有着重要影响, 若 ω 取值较大时, 偏差较小的区域容易找不到极值, 但有利于全局搜索; 若 ω 取值较小时, 则利于局部搜索, 但容易陷入局部最优, 无法寻找到群体最优解。为了平衡二者的关系, 本文对 MOSPO 算法进行改进, 引用惯性动态权重。

$$\omega = \frac{(n_{\max} - n) - (\omega_{\text{start}} - \omega_{\text{end}})}{n_{\max}} + \omega_{\text{end}} \quad (11)$$

式中: ω_{start} 为初始惯性因子; ω_{end} 为终止惯性因子; n_{\max} 为 MOPSO 算法求解的最大迭代次数。

2.2.2 Pareto 最优解选取

为了保证求解的准确性, 本文通过多次求解减少误差, 保证求解的目标函数都收敛于一个区间内。MOPSO 算法求解得到的是一组解集, 图 4、图 5 为多次求解得到的其中一组含 SST, OLTC 配电网的无功优化的 Pareto 前沿解集图像。

为了能从非劣解集的粒子中选取最佳粒子, 目前最为常用的是采用权重分析法, 但每部分评判指标的权重往往是人为定夺, 难免受到个人主

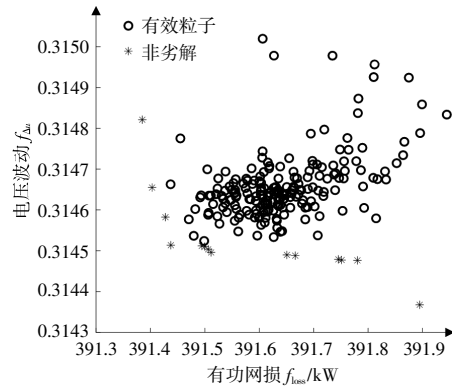


图 4 含 SST 的配电网无功优化的 Pareto 前沿解集
Fig.4 Pareto frontier solution set of distribution network reactive power optimization with SST

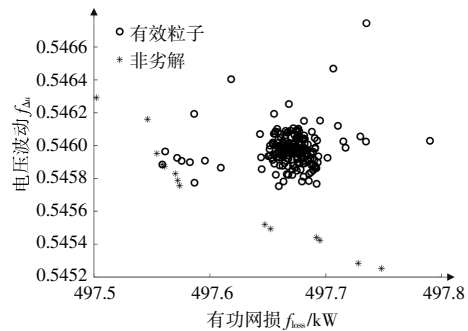


图 5 含 OLTC 的配电网无功优化的 Pareto 前沿解集
Fig.5 Pareto frontier solution set of distribution network reactive power optimization with OLTC

观影响, 公正、客观性得不到保证。为此, 本文采用熵权法^[20]确定每部分评判指标所占的权重。具体步骤如下。

①标准化

优化方案为 n 个, 评判指标为 k 个的决策矩阵用 $\mathbf{X}=[X_1, X_2, \dots, X_k]$ 表示, 其中每个优化方案第 i 个评判指标用 $X_i=[x_{i1}, x_{i2}, \dots, x_{in}]^T$ 表示, 对其进行标准化可得到矩阵 \mathbf{Y} , 矩阵 \mathbf{Y} 的任意一个数 Y_{ij} 可表示为

$$Y_{ij} = \frac{x_{ij} - \min(x_i)}{\max(X_i) - \min(X_i)} \quad (12)$$

②信息熵

由信息熵的定义得到数据的信息熵 E_j , 可由下式表示:

$$\begin{cases} E_j = -\ln(n)^{-1} \sum_{i=1}^n p_{ij} \ln p_{ij} \\ p_{ij} = \frac{Y_{ij}}{\sum_{i=1}^n Y_{ij}} \end{cases} \quad (13)$$

③确定权重

每个评判指标所占的权重 W_i 可表示为

$$W_i = \frac{1 - E_i}{k - \sum E_i} \quad (14)$$

2.2.3 改进 MOPSO 算法无功优化流程

本文改进 MOPSO 算法无功优化流程如图 6 所示。

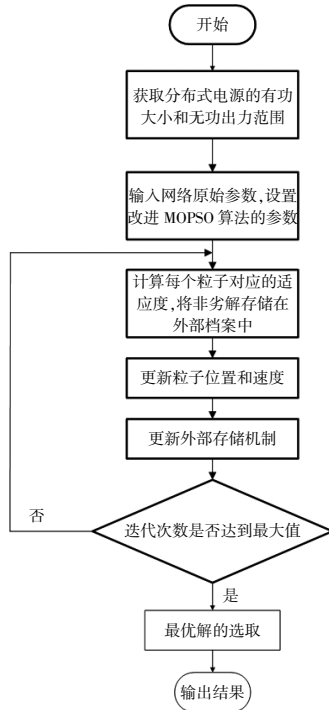


图 6 改进 MOPSO 算法无功优化流程

Fig.6 Improved reactive power optimization flow chart of MOPSO algorithm

3 仿真及分析

3.1 算例参数

本文在文献[21]提及的 IEEE33 节点配电系统基础上,对其进行部分修改,建立如图 7,8 所示的含 OLTC 的配电网模型和含 SST 的配电网模型。

修改后的配电网系统包括:

①节点 16,32 分别接入一台 600 kW、功率因数为 0.95 的风机 (Wind Turbine, WT)DG, 其中

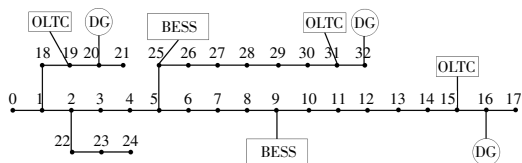


图 7 含 OLTC 的有源配电网

Fig.7 Active distribution network with OLTC

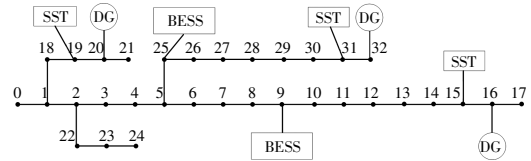


图 8 含 SST 的有源配电网

Fig.8 Active distribution network with SST

$v_{ci}=3 \text{ m/s}, v_r=12 \text{ m/s}, v_{co}=15 \text{ m/s}$; 节点 20 接入一台 600 kW, 功率因数为 0.95 的光伏 (Photo Voltaic, PV)DG, 式(3)中 $A=3 \text{ m}^2, \eta=22.4\%$; 风速、光照强度、负荷的数据基于某地区 09:00-12:00 连续 4 个时刻的风速和光照强度、负荷的功率数据模拟生成;因考虑到本文篇幅,只考虑了 DG 和负荷连续 4 个时刻的波动情况;

②节点 9,25 接入电池储能系统,最大充放电容量为 200 kW,本文均假设充放电瞬间完成;

③节点 15,19,31 接入 OLTC 或 SST,OLTC 变比为 $0.9+8 \times 2.5\%$,SST 的相关参数参考文献 [22];

④节点 5,11,22 接入无功补偿电容,每个节点无功补偿电容共 $5 \times 40 \text{ kvar}$;

⑤基于 MOPSO 算法参数设置: c_1, c_2 分别为 0.1,0.2, $\omega_{start}, \omega_{end}$ 分别为 0.5,0.001,种群数量为 200,非支配解数量为 20,非支配解的解集的扩展因子为 0.1,非支配解选择因子为 2,非支配解淘汰因子为 2,迭代次数为 100 次。

3.2 算例分析

本文首先为了验证分布式电源的合理接入对降低网损以及提高节点电压方面的作用,设置方案一和方案二进行对比分析,配电网风速、光照强度、负荷的数据以第一时刻的数据为准。其次,为了验证含 SST 的有源配电网在降低网损和维持节点电压稳定方面的优越性,设置了方案三和方案四进行对比,方案中包含动态无功优化和静态无功优化,其中配电网动态无功优化时的风、光、负荷数据选取上述提到的连续 4 个时刻数据进行分析;配电网静态无功优化仿真时的风、光、负荷的数据选取第一个时刻的数据进行分析。具体的 3 组方案如下。

方案一:不含无功优化的无源配电网^[10]

在不进行无功优化以及不考虑损耗的情况下,OLTC 以及 SST 在配电网本质就相当于一个普通的变压器。因此,二者在优化前的节点电压曲

线图是相同的。图 9 中节点符号为圆的曲线为优化前的节点电压曲线图,图中明显看出,16,32 节点相对于电压参考值的偏差明显偏大,同时,经潮流计算得出方案一网损为 203.68 kW。

方案二:不含无功优化的有源配电网^[12]

在不进行无功优化以及不考虑损耗的情况下,有源配电网的节点电压如图 9 中的节点符号为星形的曲线所示,对比方案一节点电压曲线,电压有着明显抬升;同时,经潮流计算得出方案二的

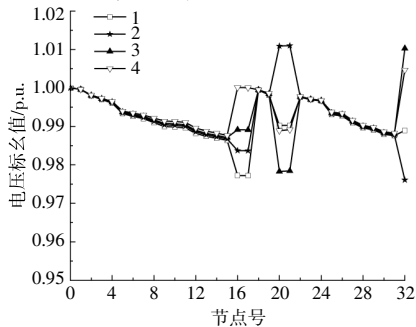


图 9 方案三动态无功优化后 4 个时刻节点电压曲线
Fig.9 Scheme 3 voltage curves of nodes at four times after dynamic reactive power optimization

网损为 155.86 kW。与方案一相比,网损降低 47.82 kW,降低幅度达到了 23.48%。

方案三:含 OLTC 的有源配电网^[12]

方案三静态无功优化后的节点电压如图 9 中节点符号为三角形的曲线所示,对比优化前的节点电压,电压偏差明显降低。通过潮流计算得出方案三静态无功优化后的网损为 114.72 kW,比方案一的网损降低了 88.96 kW,降低幅度为 43.68%;比方案二的网损降低了 41.14 kW,降低幅度为 26.40%。

表 1 为使用改进 MOPSO 算法对方案三的动态无功优化模型求解得到的最佳优化策略。图 10 为方案三动态无功优化后,4 个时刻节点电压曲线。可以看出,随着各个时刻 DG、负荷波动,相较于其他节点,接入分布式电源的节点随着时间变化电压波动尤为明显,且 20,21 节点在第二个时刻出现了电压越限现象。经潮流计算,得到图 11 所示的方案三动态无功优化后的 4 个时刻的网损柱状分析图,4 个时刻网损总和为 497.64 kW。

表 1 方案三动态无功优化策略

Table 1 Scheme 3 dynamic reactive power optimization strategy

位置/时间	BESS 充放电功率/kW		OLTC 的档位			电容器投切组数		
	9 节点	25 节点	16 节点	22 节点	31 节点	5 节点	11 节点	22 节点
1	33.04	-41.64	5	4	4	2	4	2
2	73.63	0.05	4	3	4	2	4	2
3	-24.59	-77.97	4	6	3	3	3	2
4	92.18	-81.27	3	4	3	2	4	4

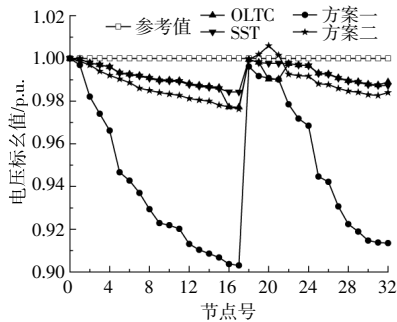


图 10 无功优化前后节点电压曲线
Fig.10 Node voltage curves before and after reactive power optimization

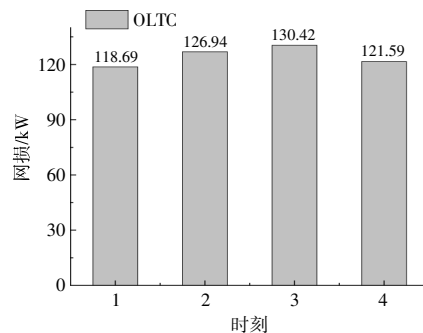


图 11 方案三动态无功优化后 4 个时刻网损柱状图
Fig.11 Histogram of network loss at four moments after dynamic reactive power optimization in scheme 3

方案四:含 SST 的有源配电网

方案四静态无功优化后的节点电压如图 9 中节点符号为倒三角曲线所示,对比优化前所有的节点,电压偏差有着明显降低;对比方案三静态无

功优化后的节点电压曲线,16,20,32 节点电压降低较为明显,其中,16 节点的电压偏差降低 0.017 p.u.。通过潮流计算得到方案四静态无功优化后的网损为 94.37 kW,对比方案一网损降低 109.31

kW,网损降低幅度为 53.67%;对比方案二网损降低 61.69 kW,网损降低幅度为 39.45%;相较于方案三静态无功优化后的网损降低 10.15 kW,网损

降低幅度为 17.74%。

表 2 为使用改进 MOPSO 算法对方案四的动态无功优化模型求解得到的最佳优化策略。

表 2 方案四动态无功优化策略

Table 2 Scheme 4 dynamic reactive power optimization strategy

位置/时间	BESS 充放电功率/kW		SST 改变 θ_i 和 m_i 为系统提供的无功/kvar			电容器投切组数		
	9 节点	25 节点	16 节点	22 节点	31 节点	5 节点	11 节点	22 节点
1	52.48	-94.66	92.97	461.49	482.94	3	1	2
2	85.98	-5.53	254.71	217.96	469.16	5	1	3
3	-14.52	57.78	78.08	42.55	135.89	1	4	2
4	63.48	37.90	324.43	33.18	7.75	1	3	2

图 12 为方案四动态无功优化后 4 个时刻节点电压曲线。由图 12 可以看出,随着 DG、负荷波动,所有节点的电压无明显波动,消除了电压越限现象。

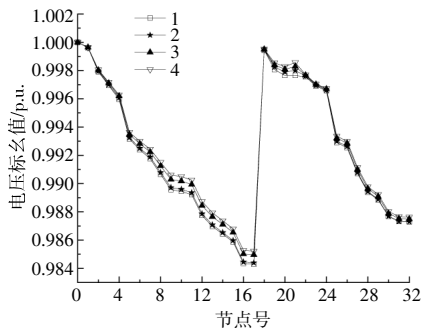


图 12 方案四动态无功优化后 4 个时刻节点电压曲线
Fig.12 Scheme 4 voltage curves of nodes at four times after dynamic reactive power optimization

经潮流计算,得到方案四动态无功优化后的 4 个时刻的网损柱状分析图,如图 13 所示。

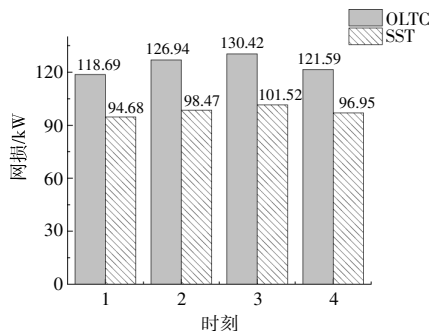


图 13 方案四动态无功优化后 4 个时刻网损柱状图
Fig.13 Histogram of network loss at four moments after dynamic reactive power optimization in scheme 4

由图 13 可知:4 个时刻网损总和为 391.62 kW;对比方案三动态无功优化后网损降低 106.02 kW,降比达到 21.31%。

图 14 为方案三、四动态无功优化后不同电压段频次柱状图。由图 14 可知,方案三动态无功优化后的节点电压小于 0.985 p.u.和大于 1 p.u.的出现 18 次,而方案四动态无功优化后的节点电压小于 0.985 p.u.和大于 1 p.u.的仅出现 9 次,出现频次降低一半。综上分析,说明 SST 应对分布式电源、负荷波动时,在维持电压稳定、降低网损方面的优越性。

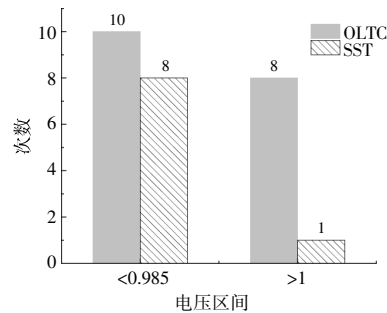


图 14 方案三、四不同电压段频次柱状图

Fig.14 Frequency histogram of different voltage segments in scheme 3 and 4

5 结论

针对分布式电源和负荷的波动导致的网损增大和电压波动,本文利用 SST 两侧电力电子变换器的脉冲宽度调制技术控制潮流为系统提供无功,以连续 4 个时刻的最小网损和电压波动为优化目标,考虑设备的约束条件,使用改进多目标粒子群算法对含 SST、分布式电源、无功补偿电容的有源配电网无功优化模型的多个控制变量进行求解。

①在 DG、负荷波动时,含 SST 的有源配电网无功优化后的网损和电压波动相较于含 OLTC 的有源配电网无功优化后的网损和电压波动有着明显改善,说明在源荷波动时该方法在降低配电网

网损和维持节点电压稳定方面的优越性。

②固态变压器是由电力电子器件构成,输入级以及输出级均采用 PWM 调制策略,可通过控制调制角和调制系数精准控制系统产生和吸收的无功,且调节精度高,控制更加灵活。

参考文献:

- [1] 罗培,孙吉浩.有源配电网动态无功优化解耦方法研究[J].高电压技术,2021,47(4):1323-1333.
- [2] 卢姬,常俊晓,张云阁,等.考虑 DG 不确定性的主动配电网两阶段无功机会约束优化方法[J].电力系统保护与控制,2021,49(21):28-35.
- [3] Shi J, Yang W, Xue F, et al. Reactive power optimization of an active distribution network including a solid state transformer using a moth swarm algorithm [J]. Journal of Renewable and Sustainable Energy, 2019, 11(3):035501.
- [4] 张勇军,任震.电力系统动态无功优化调度的调节代价[J].电力系统自动化,2005,29(2)34-38,60.
- [5] 殷展,杜仁平,姜黎明,等.适用于配电网互联的内联式 MMC 型固态变压器[J].可再生能源,2021,39(10):1387-1393.
- [6] 王鹤,栾钧翔.变压器的电力电子化演进及其对电压稳定影响综述 [J]. 电力系统保护与控制,2020,48(16):171-192.
- [7] 苗宇,邹晓松,袁旭峰,等.面向中压配电网的电力电子变压器控制策略研究 [J]. 电测与仪表,2019,56(12):129-134.
- [8] 崔艳艳.基于电子电力变压器的配电网无功电压优化控制[D].武汉:华中科技大学,2006.
- [9] 曹昉,刘畅,李欣宁.含电力电子变压器的配电网潮流交替迭代算法[J].电工电能新技术,2018,37(7):41-50.
- [10] 伍迪.基于固态变压器的含 DG 接入的配网无功优化控制研究[D].北京:北京交通大学,2017.
- [11] 刘畅.基于改进细菌觅食算法的含固态变压器配网重构综合优化[D].北京:华北电力大学,2018.
- [12] 张祥龙,周晖,肖智宏,等.电力电子变压器在有源配电网无功优化中的应用 [J]. 电力系统保护与控制,2017,45(4):80-85.
- [13] 魏超,王晓东,上官炫烁,等.基于 NSGA-II 的风电机组叶片可靠度多目标优化[J].可再生能源,2022,40(4):492-498.
- [14] 彭继慎,杨慕紫,马冰.含分布式发电的改进 BFO 算法配电网无功优化[J].计算机仿真,2015,32(5):127-131.
- [15] Mobarakeh A I, Sadeghi R, Esfahani H S, et al. Techno-economic energy management of micro-grid in the presence of distributed generation sources based on demand response programs [J]. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 2022, 141:108169-108181.
- [16] 张斌,于力,白浩,等.基于一致性算法的农村中压配电网光储系统与通信网络协调规划[J].可再生能源,2021,39(10):1371-1379.
- [17] 李晓利,高金峰.用于配电网多目标无功优化的改进粒子群优化算法 [J]. 电力自动化设备,2019,39(1):106-111.
- [18] Coello C, Pulido T, Lechuga M S. Handling multiple objectives with particle swarm optimization [J]. IEEE Transactions on Evolutionary Computation, 2004, 8(3):256-279.
- [19] 陆立民,褚国伟,张涛,等.基于改进多目标粒子群算法的微电网储能优化配置[J].电力系统保护与控制,2020,48(15):116-124.
- [20] 张艺驰,姜凤利,周吉一,等.基于多场景含双馈风机的配电网无功优化 [J]. 可再生能源,2018,36(7):1027-1032.
- [21] 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.
- [22] 刘云.基于电子电力变压器的电力系统稳定性研究[D].武汉:华中科技大学,2013.

Dynamic reactive power optimization method of active distribution network with solid state transformer under source load fluctuation

Sun Ruyi, Yuan Zhi, Wang Weiqing, He Shan

(Engineering Research Center of Renewable Energy Power Generation and Grid-connected Control, Ministry of Education, Xinjiang University, Urumqi 830017, China)

Abstract: In order to solve the problems of increasing network loss caused by bidirectional power flow and node voltage fluctuation caused by fluctuation of distributed power and load, This paper proposes a method to control power flow based on pulse-width modulation technology of power electronic converters on both sides of Solid State Transformer. In this paper, the dynamic reactive power optimization model of active distribution network with SST is firstly established. Then, the improved multi-objective group algorithm is used to solve the control variables such as modulation Angle and modulation coefficient of the power electronic converter based on the primary and secondary sides of SST, aiming at the multi-time active network loss and voltage fluctuation. Finally, the simulation model is established and compared with the active distribution network dynamic reactive power optimization method based on on-load voltage regulating transformer. The results prove the superiority of the proposed method in reducing network loss and maintaining node voltage stability.

Keywords: solid state transformer; active distribution network; dynamic reactive power optimization; multiobjective particle swarm