

农村有源配电网电压无功优化控制方法

刘志虹^{1,2} 王金丽² 盛万兴² 杜松怀¹ 韦春元² 孙若男¹

(1. 中国农业大学信息与电气工程学院, 北京 100083; 2. 中国电力科学研究院有限公司, 北京 100192)

摘要: 针对越来越多的分布式电源接入农村配电网,导致电压无功控制难度增大的问题,提出了适用于含分布式电源农村配电网的电压无功优化控制方法,通过调控分布式电源无功出力、调整有载调压变压器分接头位置、投切无功补偿设备等手段,建立了考虑分布式电源利用率、网损、电压波动和无功设备投切费用的多目标协调优化控制模型,并采用收敛性较好的协同粒子群算法进行求解。最后,算例仿真验证了所提模型和算法的正确性与有效性。

关键词: 农村配电网; 分布式电源; 电压无功控制; 协同粒子群

中图分类号: TM761 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2019)S0-0318-06

Voltage Reactive Power Optimization Control Method for Rural Distribution Network with Distributed Generation

LIU Zhihong^{1,2} WANG Jinli² SHENG Wanxing² DU Songhuai¹ WEI Chunyuan² SUN Ruonan¹

(1. College of Information and Electrical Engineering, China Agricultural University, Beijing 100083, China

2. China Electric Power Research Institute, Beijing 100192, China)

Abstract: Due to the randomness, volatility and intermittent characteristics of distributed generation, more and more distributed generation are connected to rural distribution networks, which makes the voltage reactive power control in rural distribution network more difficult. For the problem of voltage reactive power optimization in active distribution network, considering the reactive power compensation effect of distributed generation to distribution network, a voltage reactive power optimization control method suitable for rural distribution network which had distributed generation was proposed. By regulating the reactive power output of the distributed generation, adjusting the tap position of the on-load tap changer, and switching the reactive power compensation equipment, the safe and reliable economic operation capability of the rural active distribution network can be effectively improved. The multi-objective coordinated optimization control model considering the distributed generation utilization rate, network loss, voltage fluctuation and reactive power equipment switching cost was established. A well-converged cooperative particle swarm optimization algorithm was used to solve the multi-objective optimization problem. Finally, the IEEE 13 node power distribution system was used for simulation calculation, and compared with several multi-objective optimization algorithms, and the feasibility and effectiveness of the proposed model and algorithm were verified.

Key words: rural distribution network; distributed generation; voltage reactive power control; cooperative particle swarm

0 引言

近年来,随着国家社会对能源危机、环境保护、全球气候变化等问题的日益重视,以及可再生能源发电技术的日益成熟,中国可再生能源发电并网迅

猛发展^[1-5]。2018年,我国颁布了“实施乡村振兴战略”,越来越多的分布式电源(Distributed generation, DG)接入农村配电网。DG出力具有间歇性、随机性、波动性特征,增加了配电网电压无功控制的难度,使得配电网电压质量偏低、损耗偏高等

收稿日期: 2019-04-22 修回日期: 2019-05-24
基金项目: 国家电网有限公司总部科技项目(SGSDEB00YJJS1700375)
作者简介: 刘志虹(1991—),女,博士生,主要从事配电网优化运行与控制研究,E-mail: 1204992056@qq.com
通信作者: 杜松怀(1963—),男,教授,博士生导师,主要从事电力市场、电力系统继电保护研究,E-mail: songhuaidu@cau.edu.cn

现象普遍存在^[6-10]。传统中低压配电网通过调整变压器抽头位置和投切无功补偿电容器进行电压无功控制,无功调节设备价格昂贵,其使用寿命与投切次数相关,使用成本非常高,在实际农村配电网中配置的无功调节设备数量少,且种类较为单一。DG 具有灵活调节电压无功出力的能力,并且 DG 的无功调节不影响自身寿命,DG 的大规模接入使得农村配电网拥有了多个潜在的无功电源,利用 DG 的无功出力协调优化全网,能有效提高优化效果,同时对无功调节设备起到了保护作用^[11-12]。分布式电源参与无功补偿可以解决传统配电网无功调节离散化、速度慢、难以实现连续调节等问题^[13]。因此,有必要对分布式电源与无功补偿设备协同优化控制配电网电压展开深入研究。

本文提出考虑分布式电源利用率的有源配电网电压无功协调优化控制方法,将 DG、有载调压变压器(On-load tap changer, OLTC)、并联电容器和静止无功补偿装置(Static var compensator, SVC)作为可控设备,综合考虑分布式电源利用率、网损、电压波动和无功设备操作费用构建多目标优化模型,采用协同粒子群算法(Cooperative particle swarm optimization, CPSO)进行求解,最后对改进的 IEEE 13 节点配电系统进行仿真,验证模型和方法的正确性和有效性。

1 有源配电网多目标电压无功优化模型

本文综合考虑网损、无功设备操作费用与电压偏移、DG 利用率,将配电网未来 T 时间的运行状态最优作为优化目标,建立如下多目标电压无功优化模型。

1.1 目标函数

综合目标函数为

$$F = \min[f_{\text{loss}} \ f_{\text{cost}} \ f_{\text{waste}} \ f_{\text{vd}}] \tag{1}$$

式中 f_{loss} ——线损函数
 f_{cost} ——无功设备操作费用函数
 f_{waste} ——分布式电源浪费函数
 f_{vd} ——电压偏差指标函数
线损函数表达式为

$$f_{\text{loss}} = \sum_{t=1}^T \sum_{(i,j) \in N_b} G_{ij} (U_i^2 + U_j^2 - 2U_i U_j \cos\theta_{ij}) \tag{2}$$

式中 N_b ——支路节点集合
 $i、j$ ——支路的首末节点
 $U_i、U_j$ ——节点 $i、j$ 的电压
 $G_{ij}、\theta_{ij}$ ——节点 $i、j$ 的互电导、相位差

无功设备操作费用包括 OLTC 投切费用、并联电容器投切费用、SVC 无功补偿出力费用,假设同种类型的无功调节设备型号一致,则无功设备操作费用函数表达式为

$$f_{\text{cost}} = \sum_{t=1}^T \left(\sum_{l \in N_{\text{tap}}} C_{\text{tap}} |t_l^t - t_l^{t-1}| + \sum_{m \in N_{\text{cap}}} C_{\text{cap}} |c_m^t - c_m^{t-1}| + \sum_{n \in N_{\text{svc}}} C_{\text{svc}} Q_{\text{svc}_n}^t \right) \tag{3}$$

式中 $N_{\text{tap}}、N_{\text{cap}}、N_{\text{svc}}$ ——OLTC、电容器、SVC 补偿点数量
 $l、m、n$ ——OLTC、电容器、SVC 补偿点
 $C_{\text{tap}}、C_{\text{cap}}、C_{\text{svc}}$ ——OLTC 投切一次的费用、电容器组投切一次的费用、SVC 单位补偿容量的单价
 t_l^t —— t 时刻 l 节点的 OLTC 闭合档位
 c_m^t —— t 时刻 m 节点电容器组的闭合档位
 $Q_{\text{svc}_n}^t$ —— t 时刻 n 节点的 SVC 无功补偿容量
分布式电源浪费函数表达式为

$$f_{\text{waste}} = \sum_{t=1}^T \sum_{g \in N_{\text{DG}}} (P_{\text{DG}_g, \text{max}}^t - P_{\text{DG}_g}^t) \tag{4}$$

式中 $P_{\text{DG}_g, \text{max}}^t$ —— t 时刻 g 节点的分布式电源最大有功出力
 $P_{\text{DG}_g}^t$ —— t 时刻 g 节点分布式电源有功出力
 N_{DG} ——分布式电源数量
电压偏差指标函数表达式为

$$f_{\text{vd}} = \sum_{t=1}^T \sum_{i=1}^{N_{\text{bus}}} (U_i^S - U_i) \tag{5}$$

式中 N_{bus} ——配电网节点总数
 U_i^S ——节点 i 电压基准值

1.2 约束条件

潮流平衡约束为

$$\begin{cases} P_i = U_i \sum_{(i,j) \in N_b} U_j (G_{ij} \cos\theta_{ij} + B_{ij} \sin\theta_{ij}) \\ Q_i = U_i \sum_{(i,j) \in N_b} U_j (G_{ij} \sin\theta_{ij} - B_{ij} \cos\theta_{ij}) \end{cases} \tag{6}$$

式中 $P_i、Q_i$ ——节点 i 注入的有功和无功功率
 B_{ij} ——节点 $i、j$ 的互电纳
控制变量包括分布式电源有功与无功出力、变压器分接头位置、电容器和 SVC 的补偿容量,需要满足不等式约束

$$\begin{cases} P_{\text{DG}_g, \text{min}}^t \leq P_{\text{DG}_g}^t \leq P_{\text{DG}_g, \text{max}}^t \\ Q_{\text{DG}_g, \text{min}}^t \leq Q_{\text{DG}_g}^t \leq Q_{\text{DG}_g, \text{max}}^t \\ t_l^{\text{min}} \leq t_l^t \leq t_l^{\text{max}} \\ c_m^{\text{min}} \leq c_m^t \leq c_m^{\text{max}} \\ Q_{\text{svc}_n, \text{min}}^t \leq Q_{\text{svc}_n}^t \leq Q_{\text{svc}_n, \text{max}}^t \end{cases} \tag{7}$$

式中 $P_{\text{DG}_g, \text{min}}^t$ —— t 时刻 g 节点的分布式电源最小有功出力
 $Q_{\text{DG}_g, \text{min}}^t、Q_{\text{DG}_g, \text{max}}^t$ —— t 时刻 g 节点的分布式电源最小、最大可用无功出力

$Q_{DG_g}^t$ —— t 时刻 g 节点的分布式电源无功出力
 $t_l^{\max}, t_l^{\min}$ —— t 时刻 OLTC 分接头上、下限值
 $c_l^{\max}, c_l^{\min}$ ——电容器投切上、下限值
 $Q_{SVC_n, \min}, Q_{SVC_n, \max}$ —— t 时刻第 n 个 SVC 无功出力上、下限值
状态变量约束为

$$U_i^{\min} \leq U_i \leq U_i^{\max} \tag{8}$$

式中 $U_i^{\max}, U_i^{\min}$ ——节点 i 电压幅值上、下限

2 基于 CPSO 算法的多目标电压无功优化求解

2.1 算法实现

(1) CPSO 算法初始化

$$\begin{cases} \mathbf{X} = [\mathbf{X}_1 & \mathbf{X}_2 & \cdots & \mathbf{X}_h & \cdots & \mathbf{X}_{N_{cv}}] \\ \mathbf{X}_h = [\mathbf{x}_h]^T \\ \mathbf{x}_h = R[(y_h^{\max} - y_h^{\min}) + y_h^{\min}] \end{cases} \tag{9}$$

式中 $\mathbf{X}$ ——满足各约束条件的所有变量取值集合
 $\mathbf{X}_h$ ——第 h 个变量取值集
 N_{cv} ——多目标优化模型中变量的总数
 R ——计算机随机生成的数值, 取值范围为 $[0, 1]$
 $\mathbf{x}_h$ ——满足函数 g_h 约束条件的控制变量的取值集, 本文的控制变量主要包括控制设备工作状态: OLTC 与电容器的分接头位置、无功补偿装置投入组数、开关状态、分布式电源有功功率和配电网状态变量(节点电压等)

$y_h^{\max}, y_h^{\min}$ ——约束函数 y_h 的上、下限
在 $\mathbf{X}$ 中随机抽取 m 组数值形成主粒子种群 P 、再从剩余的 $\mathbf{X}$ 中随机抽取 n 组数值形成协同粒子种群 S 。

(2) 适应度函数计算方法

CPSO 算法根据等式约束在搜索过程筛选出满足的解集, 在此基础上将不等式约束函数通过罚函数的形式引入子目标函数中得到 CPSO 适应度函数 F^* , 其可表达为

$$F^* = \min \left(f_i + \omega_{f_i} \sum_{h=1}^{N_{heq}} \left(\frac{\Delta g_h}{g_h^{\max} - g_h^{\min}} \right)^2 \right) \tag{10}$$

式中 f_i ——第 i 个子目标函数
 ω_{f_i} ——子目标函数 f_i 的越界惩罚因子, 默认值为 1 000
 Δg_h ——第 h 个不等式约束函数 g_h 的越限值
 $g_h^{\max}, g_h^{\min}$ ——不等式函数 g_h 的上、下限

N_{heq} ——不等式约束函数 g_h 的数量
(3) 粒子位置、速度更新方法
 $x_i^{t+1} = x_i^t + v_i^{t+1} \quad (i = 1, 2, \cdots, n_s) \tag{11}$

式中 x_i^t ——第 i 个粒子 t 时刻在搜索空间的位置
 n_s ——种群数量
 t ——离散的时间点(迭代次数)
 v_i^{t+1} ——第 i 个粒子在 $t + 1$ 时刻的速度
初始位置 $x_i^0 \sim U(x_{\min}, x_{\max})$, U 表示均为分布。
 $v_i^{t+1} = \omega v_{ij}^t + c_1 r_{1j}^t (x_{ij}^{\text{pbest}, t} - x_{ij}^t) + c_2 r_{2j}^t (x_{ij}^{\text{gbest}, t} - x_{ij}^t) \tag{12}$
($j = 1, 2, \cdots, n_x$)

式中 $x_{ij}^{\text{pbest}, t}$ ——粒子 i 在 t 时刻第 j 维度上的个体最优位置
 $x_{ij}^{\text{gbest}, t}$ ——粒子 i 在 t 时刻第 j 维度上的全局最优位置
 ω ——惯性因子, 衡量前一时刻速度对下次移动的影响
 v_{ij}^t ——第 i 个粒子在 t 时刻第 j 维度上的速度
 n_x ——搜索空间的维数
 x_{ij}^t ——粒子 i 在 t 时刻第 j 维度上的位置
 c_1 ——认知因子 c_2 ——社会因子
 r_{1j}^t, r_{2j}^t ——在区间 $[0, 1]$ 均匀抽取的随机数, $r_{1j}^t, r_{2j}^t \sim U(0, 1)$, 代表不确定性因素

$$x_i^{\text{pbest}, t+1} = \begin{cases} x_i^{\text{pbest}, t} & (f(x_i^{t+1}) \geq f(x_i^{\text{pbest}, t})) \\ x_i^{t+1} & (f(x_i^{t+1}) < f(x_i^{\text{pbest}, t})) \end{cases} \tag{13}$$

式中 $x_i^{\text{pbest}, t}$ ——第 i 个粒子从开始到 t 时刻到过的最佳位置

$f: R_{n_x} \rightarrow R$ 是适应度函数, f 度量了相应候选解与当前最优解之间的距离, 体现粒子的性能和质量。

$$\begin{cases} x^{\text{gbest}, t+1} = x_i^{\text{pbest}, t} \\ f(x^{\text{gbest}, t}) = \min(f(x_1^{\text{pbest}, t}), \cdots, f(x_{n_s}^{\text{pbest}, t})) \end{cases} \tag{14}$$

式中 $x^{\text{gbest}, t+1}$ —— $t + 1$ 时刻全局最优位置

2.2 CPSO 算法流程

上述配电网电压无功优化控制模型是混合非线性约束多目标优化问题, 该模型要对 4 个目标进行同时优化。智能优化算法利用目标函数本身建立寻优方向, 无需求导等数学运算, 可以方便地引入各种约束条件, 适合处理多目标、非线性优化问题^[14-15]。其中, 粒子群算法在求解多目标寻优问题上, 具有算法容易实现、收敛速度较快等优点, 在配电网领域已得到广泛应用^[16-17]。CPSO 算法是粒子群采用协同架构后的一种优化方法, 在搜索质量和鲁棒性等性能方面有了重要的提升^[18-20]。

CPSO 算法流程如图 1 所示。算法的具体实现步骤为:

(1)系统初始化。输入改进的配电网与控制变量参数,通过拓扑分析生成节点导纳矩阵。

(2)算法初始化。按照式(9)随机抽取满足约束条件的主粒子种群 P 、协同粒子种群集合 S 。

(3)判断是否满足协同条件 $\text{mod}(z_i, c_i) = c_i$, z_i 为当前迭代次数, c_i 为协同间隔, mod 为取余函数,“=”表示等于。若不满足转至步骤(4),反之转至步骤(6)。

(4)主种群 S 求解。基于前推回代潮流算法,结合式(10)计算各粒子适应度,分别根据式(13)、(14)更新个体最优位置 x_i^{pbest} 、全局最优位置 x^{gbest} ;根据式(11)计算下一刻时间速度 v^{t+1} ;根据式(12)计算下一时刻粒子位置 x^{t+1} 。

(5)迭代结束判断。若达到最大迭代次数 Z_{max} ,则寻优结束输出最优解,反之转至步骤(3)。

(6)协同种群 S 求解。更新种群集合 S ,对于所有种群 S_j 中的某一个粒子 k , $S_{j,x_k} = P_{x^{\text{gbest}}}$,其中 $k \sim U(1, n_s/2)$, $k \in \mathbf{N}$ 。

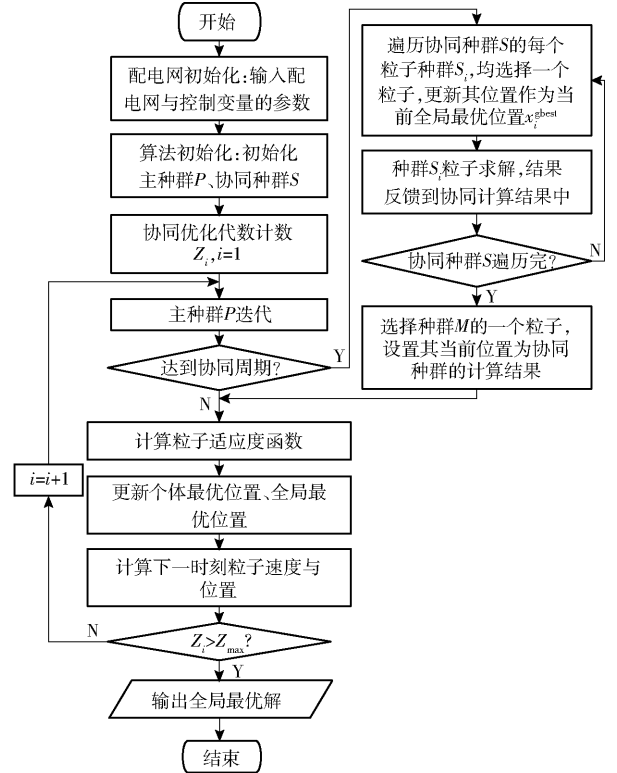


图1 基于 CPSO 算法的电压无功优化流程图
Fig. 1 Voltage reactive power optimization process based on CPSO algorithm

3 算例分析与比较

3.1 算例描述

本文在 IEEE 13 节点配电系统标准算例的基础上增加了 DG、无功补偿装置、OLTC 等电压无功可调设备进行优化仿真。改进的配电系统网络结构如

图 2 所示,相关参数见表 1、2。

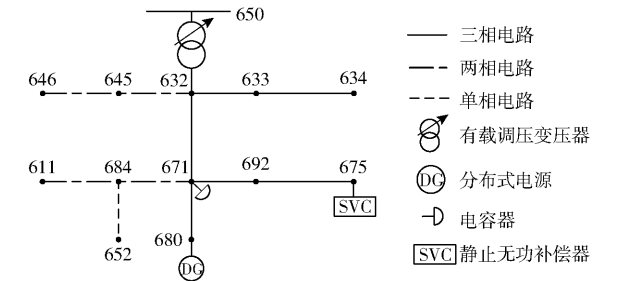


图2 IEEE 13 节点配电系统网络结构
Fig. 2 Network architecture of IEEE 13-bus distribution system

表 1 IEEE 13 节点配电系统各节点参数		
Tab. 1 IEEE 13-bus distribution system node parameters		
首端节点	末端节点	长度/m
632	645	154. 20
632	633	154. 20
633	634	0
645	646	91. 44
650	632	609. 60
684	652	243. 84
632	671	609. 60
671	684	91. 44
671	680	304. 80
671	692	0
684	611	91. 44
692	675	154. 20

表 2 负荷数据						
Tab. 2 Load data						
节点	负荷模型	相 -1	相 -1	相 -2	相 -2	相 -3
		有功功率/ kW	无功功率/ kvar	有功功率/ kW	无功功率/ kvar	有功功率/ kW
634	Y - PQ	160	110	120	90	120
645	Y - PQ	0	0	170	125	0
646	D - Z	0	0	230	132	0
652	Y - Z	128	86	0	0	0
671	D - PQ	385	220	385	220	385
675	Y - PQ	485	190	68	60	290
692	D - I	0	0	0	0	170
611	Y - I	0	0	0	0	170
632	Y - PQ	17	10	66	38	117

由于电压无功可调设备使用成本高,本研究基于农村电网的实际情况,对改进的 IEEE 13 节点配电系统算例进行自定义,假设在节点 650 安装的 OLTC 档位范围为 $[-16, 16]$,分接头调节范围为 $\pm 8 \times 1.25\%$,最小调节刻度为 0.625% ;在节点 675 安装了被等分为 10 部分且总容量同标准算例的 SVC;在节点 671 安装了 10 组容量为 $0.025 \text{ MV} \cdot \text{A}$ 的电容器;在节点 680 安装的 DG 最大有功出力为 1.5 MW ,其中 DG 有功出力曲线如图 3 所示,该 DG 无功出力范围为 $0 \sim 750 \text{ kvar}$ 。

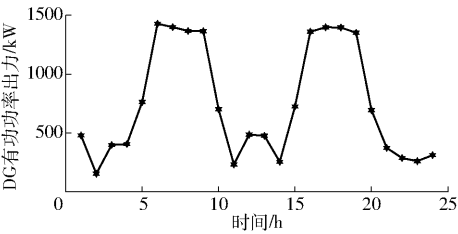


图3 DG有功功率出力曲线

Fig.3 Power curve of distributed generation

对改进的 IEEE 13 节点配电网使用协同粒子群算法进行电压无功优化,CP SO 算法中的主粒子群数目取 200,子粒子群数目取 100,最大迭代次数 100 次,惯性因子 ω 取 0.729 8,认知因子 c_1 和社会因子 c_2 均取 1.496 18。并且,在相同初始条件下(种群数量为 200),与标准粒子群算法(Particle swarm optimization, PSO)、遗传算法(Genetic algorithm, GA)、遗传粒子群算法(Genetic algorithm-particle swarm optimization, GA-PSO)的寻优实验进行比较,校验算法的精度与收敛性。以上算法的收敛标准均为:在多次迭代后如果最优粒子的适应度不再变化即认为此时算法已经达到收敛。

3.2 优化结果分析比较

不同多目标优化算法分别进行了 20 次计算,其中适应度函数 F^* 最小时的适应度函数见表 3。

表3 不同算法优化结果比较

Tab.3 Comparison of configuration parameters of DG and flexible load

算法	F^*	f_{loss}	f_{cost}	f_{waste}	f_{vd}	计算时间/s
PSO	8.83×10^3	5.36×10^4	0	0	17.32	1 439
GA	1.38×10^4	6.29×10^4	0	30.91	37.21	1 889
GA-PSO	1.07×10^4	6.99×10^4	1	0	18.43	2 074
CP SO	7.56×10^3	5.15×10^3	0	0	12.03	2 089

从表 3 可以看出,PSO 算法总体性能较好,其计算过程最少、数据结构最简单,因此计算最快;GA 算法计算精度均低于粒子群系列算法;GA-PSO 算法的适应度函数值在粒子群系列中最大,存在早熟收敛、易陷于局部最优解的问题;CP SO 算法的寻优能力最强,优化效果较好。

适应度函数 F^* 最小的 CP SO 算法寻优结果如图 4~6 所示。

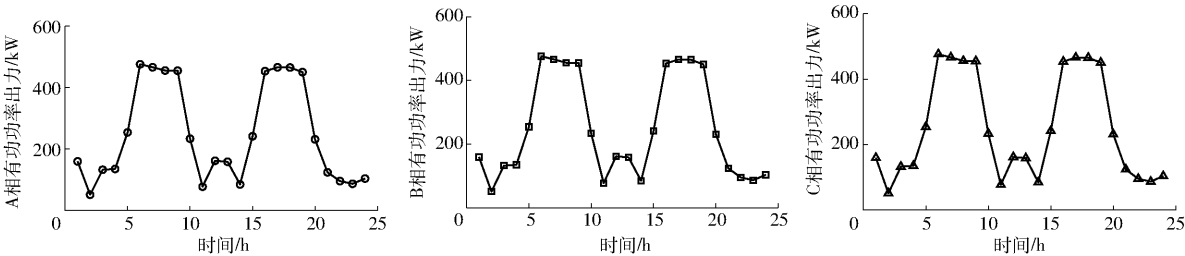


图4 分布式电源有功功率出力曲线

Fig.4 Active power output curve of distributed generation

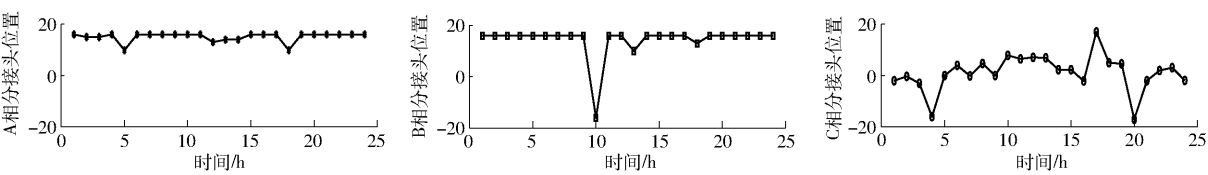


图5 OLTC分接头位置

Fig.5 Tap position of on-load tap changer

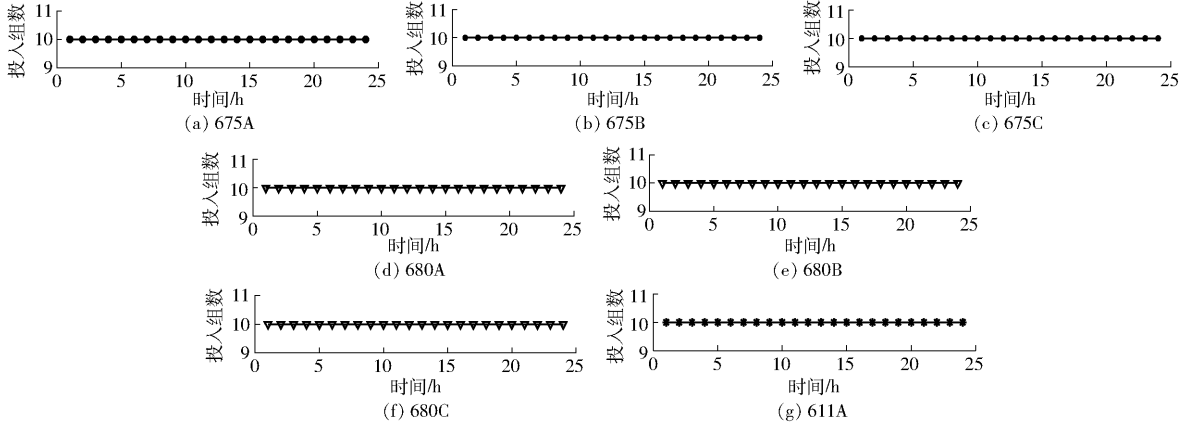


图6 无功补偿装置投入组数曲线

Fig.6 Input group curves of reactive power compensation device

由图 4 可以看出, DG 有功出力平衡且均达到最大值, DG 的利用率较高;图 5 有载调压变压器分接头的位置各不相同, 负荷与线路不平衡对配电网的影响较大;图 6 表明无功补偿装置 675A、675B、675C、680A、680B、680C、611A 均投入了 10 组电容器, 无功补偿装置得到了最大程度的利用, 同时也表明该配电网的无功补偿容量还有待提高。

4 结束语

针对含 DG 农村配电网电压无功优化需求, 从

网损、DG 利用率、电压质量、无功补偿设备成本等方面考虑, 构建了多目标电压无功优化数学模型。采用 PSO 系列算法、GA 算法分别进行多目标优化, 算法优化结果表明, CPSO 的总体寻优性能最强。CPSO 优化结果表明, 分布式电源、OLTC、电容器以及 SVC 等无功调节设备总体上均得到高效利用。

参 考 文 献

[1] 周孝信, 鲁宗相, 刘应梅, 等. 中国未来电网的发展模式和关键技术[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(29): 4999 – 5008.
ZHOU Xiaoxin, LU Zongxiang, LIU Yingmei, et al. Development models and key technologies of future grid in China[J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(29): 4999 – 5008. (in Chinese)

[2] 白建华, 辛颂旭, 刘俊, 等. 中国实现高比例可再生能源发展路径研究[J]. 中国电机工程学报, 2015, 35(14): 3699 – 3705.
BAI Jianhua, XIN Songxu, LIU Jun, et al. Roadmap of realizing the high penetration renewable energy in China[J]. Proceedings of the CSEE, 2015, 35(14): 3699 – 3705. (in Chinese)

[3] 国家发展改革委. 可再生能源发展“十三五”规划[R]. 2016.

[4] FERDOWSI M. Vehicle fleet as a distributed energy storage system for the power grid[C] // IEEE Power & Energy Society General Meeting. IEEE, 2009.

[5] 国家发展和改革委员会能源研究所. 中国 2050 高比例可再生能源发展情景暨路径研究[R]. 2015.

[6] WANG C, NEHRIR M H. Analytical approaches for optimal placement of distributed generation sources in power systems[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2004, 19(4): 2068 – 2076.

[7] 王旭强, 刘广一, 曾沅, 等. 分布式电源接入下配电网电压无功控制效果分析[J]. 电力系统保护与控制, 2014, 42(1): 47 – 53.
WANG Xuqiang, LIU Guangyi, ZENG Yuan, et al. Analysis on the effects of Volt/Var control method considering distributed generation[J]. Power System Protection and Control, 2014, 42(1): 47 – 53. (in Chinese)

[8] 徐雄风. 含分布式电源的配电网无功优化研究[D]. 淮南: 安徽理工大学, 2018.
XU Xiongfeng. Research on reactive power optimization of distribution network with distributed generation[D]. Huainan: Anhui University of Science and Technology, 2018. (in Chinese)

[9] 娄展豪. 含分布式电源的配电网无功优化研究[D]. 沈阳: 沈阳农业大学, 2017.
LOU Zhanhao. Reactive power optimization for distribution network with distributed generation[D]. Shenyang: Shenyang Agricultural University, 2017. (in Chinese)

[10] 董海龙. 含分布式发电配电网无功优化研究[D]. 沈阳: 沈阳农业大学, 2017.
DONG Hailong. Research on reactive power optimization of distribution network with distributed generation[D]. Shenyang: Shenyang Agricultural University, 2017. (in Chinese)

[11] 刘君伟. 多种新能源接入的地区电网无功电压控制研究[D]. 北京: 华北电力大学, 2017.
LIU Junwei. Research on reactive power and voltage control of regional power grid connected by multiple energy sources [D]. Beijing: North China Electric Power University, 2017. (in Chinese)

[12] 余昆, 曹一家, 陈星莺, 等. 含分布式电源的地区电网无功电压优化[J]. 电力系统自动化, 2011, 35(8): 28 – 32.
YU Kun, CAO Yijia, CHEN Xingying, et al. Reactive power and voltage optimization of district grid with distributed generators[J]. Automation of Electric Power Systems, 2011, 35(8): 28 – 32. (in Chinese)

[13] 王成山, 罗凤章. 配电系统综合评价理论与方法[M]. 北京: 科学出版社, 2012.

[14] 付英杰, 汪泓, 谭阳红. 基于 Pareto 最优解的含分布式电源配电网无功优化[J]. 电力系统及其自动化学报, 2017, 29(1): 18 – 23.
FU Yingjie, WANG Feng, TAN Yanghong. Reactive power optimization of distribution network containing distributed generation based on Pareto optimal[J]. Proceedings of the CSU – EPSA, 2017, 29(1): 18 – 23. (in Chinese)

[15] 王岩河, 肖志刚, 陈丽, 等. 基于改进遗传算法的农村配电网无功优化算法[J]. 农业机械学报, 2006, 37(6): 148 – 150, 147.
WANG Yanhe, XIAO Zhigang, CHEN Li, et al. Reactive power optimization based on improved GA for rural distribution[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2006, 37(6): 148 – 150, 147. (in Chinese)

- Journal of Agricultural Mechanization Research, 2018, 40(8): 1–9. (in Chinese)
- [8] SCHWEND T, BECK M, PRUCKER D, et al. Test of a PAR sensor-based, dynamic regulation of LED lighting in greenhouse cultivation of *helianthus annuus*[J]. European Journal of Horticultural Science, 2016, 81(3): 152–156.
- [9] IERSEL M W V, WEAVER G, MARTIN M T, et al. A chlorophyll fluorescence-based biofeedback system to control photosynthetic lighting in controlled environment agriculture[J]. Journal of the American Society for Horticultural Science, 2016, 141(2): 169–176.
- [10] 唐宇, 骆少明, 黄伟锋, 等. 基于数控恒流技术的蓝莓光照调节器设计[J]. 农机化研究, 2018, 40(8): 52–57, 69. TANG Yu, LUO Shaoming, HUANG Weifeng, et al. Design of blueberry illumination regulator based on numerical control constant current technology[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2018, 40(8): 52–57, 69. (in Chinese)
- [11] 刘翔. 基于光温耦合的设施光环境检测与智能调控系统设计[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2015. LIU Xiang. Design of facility light environment detection and intelligent control system based on light-temperature coupling [D]. Yangling: Northwest A&F University, 2015. (in Chinese)
- [12] 胡瑾, 樊宏攀, 张海辉, 等. 基于无线传感器网络的温室光环境调控系统设计[J]. 农业工程学报, 2014, 30(4): 160–167. HU Jin, FAN Hongpan, ZHANG Haihui, et al. Design of greenhouse light environment control system based on wireless sensor network[J]. Transactions of the CSAE, 2014, 30(4): 160–167. (in Chinese)
- [13] 樊宏攀. 基于多因子耦合的光环境调控系统研究与设计[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2014. FAN Hongpan. Research and design of light environment control system based on multi-factor coupling [D]. Yangling: Northwest A&F University, 2014. (in Chinese)
- [14] 何小英. 基于物联网的家庭节能控制系统研究[D]. 荆州: 长江大学, 2018. HE Xiaoying. Research on home energy-saving control system based on internet of things [D]. Jingzhou: Yangtze University, 2018. (in Chinese)
- [15] MONTEIRO F R, GARCIA M A P, CORDEIRO L C, et al. Bounded model checking of C++ programs based on the Qt cross-platform framework[J]. Software Testing, Verification and Reliability, 2017, 27(3): 1–16.
- [16] 王升, 付智勇, 陈洪松, 等. 基于随机森林算法的参考作物蒸发蒸腾量模拟计算[J]. 农业机械学报, 2017, 48(3): 302–309. WANG Sheng, FU Zhiyong, CHEN Hongsong, et al. Simulation calculation of reference crop evapotranspiration based on random forest algorithm[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2017, 48(3): 302–309. (in Chinese)
- [17] YANG Renmin, ZHANG Ganlin, LIU Feng, et al. Comparison of boosted regression tree and random forest models for mapping topsoil organic carbon concentration in an alpine ecosystem[J]. Ecological Indicators, 2016, 60(1): 870–878.
- [18] 邹东尧, 刘碧微, 杨威. 基于飞行理论萤火虫算法的TDOA与GROA定位机制[J]. 计算机应用研究, 2017, 34(9): 2768–2772. ZOU Dongyao, LIU Biwei, YANG Wei. TDOA and GROA positioning mechanism based on flight theory firefly algorithm[J]. Journal of Computer Applications, 2017, 34(9): 2768–2772. (in Chinese)
- [19] MARINAKI M, MARINAKIS Y. A glowworm swarm optimization algorithm for the vehicle routing problem with stochastic demands[J]. Expert Systems with Applications, 2016, 46(10): 145–163.
- [20] 丁兆堂, 卢育华, 徐坤. 环境因子对番茄光合特性的影响[J]. 山东农业大学学报(自然科学版), 2003, 34(3): 356–360. DING Zhaotang, LU Yuhua, XU Kun. Effects of environmental factors on photosynthetic characteristics of tomato[J]. Journal of Shandong Agricultural University (Natural Science Edition), 2003, 34(3): 356–360. (in Chinese)

(上接第323页)

- [16] 程杉. 含分布式电源的配电网多目标优化问题研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2013. CHENG Shan. Study on multi-objective optimization of distribution network with distributed generation [D]. Chongqing: Chongqing University, 2013. (in Chinese)
- [17] 程梅. 基于改进粒子群和遗传算法的配电网重构研究[D]. 马鞍山: 安徽工业大学, 2018. CHENG Mei. Research on distribution network reconfiguration based on improved particle swarm and genetic algorithm [D]. Maanshan: Anhui University of Science and Technology, 2018. (in Chinese)
- [18] BERGH F V D, ENGELBRECHT A P. A cooperative approach to particle swarm optimization[J]. IEEE Transactions on Evolutionary Computation, 2004, 8(3): 225–239.
- [19] 赵永乐. 基于协同粒子群算法的卷积神经网络优化研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2017. ZHAO Yongle. Research on the convolutional neural networks optimization based on cooperative particle swarm algorithm [D]. Wuhan: Huazhong University of Science & Technology, 2017. (in Chinese)
- [20] 程文星. 基于改进粒子群算法的电力系统无功优化研究[D]. 曲阜: 曲阜师范大学, 2018. CHENG Wenxing. Research on reactive power optimization of power system based on improved particle swarm optimization [D]. Qufu: Qufu Normal University, 2018. (in Chinese)