

DOI:10.12158/j.2096-3203.2020.05.030

分布式电源接入的配电系统多类型无功源出力优化方法

郭清元¹, 莫超^{2,3}, 吴杰康², 吴帆⁴, 唐惠玲², 陈灵敏²

(1. 广东电网有限责任公司东莞供电局, 广东 东莞 523008; 2. 广东工业大学自动化学学院, 广东 广州 510006; 3. 南宁轨道交通有限责任公司, 广西 南宁 530029; 4. 广西弘燊电力设计有限公司, 广西 南宁 530028)

摘要:针对分布式电源接入导致配电网电压质量出现问题的情况,文中面向分布式电源和并联电容器等,以有功网损最小化、节点电压偏移量最小化构造多目标函数,构建配电系统多类型无功源出力的多目标优化模型。考虑光伏发电系统和风电机组的无功特性,给出光伏逆变器和双馈电机风力发电向电网输送无功功率的受限范围。考虑变量不越界,双边越界、单边越上界、单边越下界的约束域,构建分布式电源、并联电容器输出或吸收无功功率的约束条件函数。利用基于潮流的灵敏度系数,得到目标函数灵敏度系数的线性化模型。采用两阶段单纯形法对优化问题进行求解,效果良好。以某电网某变电站 F20 线和 F32 线组成的三电压等级 60 节点的配电系统为计算实例,验证了文中模型和算法的可行性和适用性。

关键词:配电系统;无功源协同运行优化;分布式电源;静止无功发生器(SVG);并联电容器

中图分类号: TM711

文献标志码: A

文章编号: 2096-3203(2020)05-0211-09

0 引言

随着分布式电源(distributed generation, DG)的快速发展,其大规模接入配电网将给电压、电能质量、系统保护和调度运行等带来一系列影响^[1-2]。电压稳定是其中的一个重要方面,由于 DG 发电的不确定与波动性,必然会引起馈线中传输有功、无功功率的大小和方向发生变化,进而影响稳态电压分布^[3-4]。同时, DG 的接入使配电网从放射状无源网络变为中小型电源广泛分布的有源网络,配电网的管理与控制变得更加复杂,电网的各项规划与运行(无功补偿、电压控制等)也发生改变^[5-9]。

电压和无功协同控制一直是电网工作重点,在新能源环境下电压和无功协同控制受到高度重视。几十年来,国内外专家学者对电压和无功协同控制问题进行了深入研究,取得了许多研究成果。比如,对于 DG 环境下的电压无功优化问题,大多采用单目标优化模型,以最小有功损耗和运行成本为目标函数^[10-12]。对于电压和无功协同控制的多目标优化模型,通过构建技术经济指标,采用模糊理论或权重法将多目标转化为单一目标,取得了良好效果^[13-16]。传统的数学规划方法如非线性规划和二次规划,或智能优化方法如遗传算法、粒子群优化、蚁群算法等可以解决电压无功优化问题^[17-23]。

文中考虑 DG 大规模接入配电系统的情况,构

建了 DG、并联电容器和静止无功发生器(static var generator, SVG)等多类型无功源出力优化模型。采用潮流雅可比矩阵直接变换求取灵敏度系数,构建基于线性规划的 DG、并联电容器和 SVG 输出无功功率的约束域及其罚函数。通过潮流雅可比矩阵进行矩阵变换,构建考虑有功网损最小化的目标函数灵敏度系数的线性化模型。

1 DG 无功特性

1.1 光伏发电系统无功特性

光伏发电系统通过逆变器接入电网,在电力电子器件的调节下,可以按照一定的功率因数向电网输送一定容量的无功功率。光伏发电系统接入电网时通过逆变器的复用技术产生无功功率,则光伏发电系统向电网输送无功功率 Q_{PV} 的范围^[24]为:

$$Q_{PV} \leq \left| \sqrt{(|V|I_{NPV})^2 - P_{PV}^2} \right| \quad (1)$$

式中: P_{PV} 为光伏发电系统输出的有功功率; V 为光伏并网节点电压; I_{NPV} 为逆变器额定电流。

1.2 风电机组无功特性

双馈电机风力发电系统能够按系统需求在其容量范围内发出或吸收无功功率。风力发电系统向电网输出的无功功率主要由风电机组定子发出的无功功率 Q_s 和网侧变换器从电网输入的无功功率 Q_c 两部分组成,则其输入到电网的无功功率 Q_{WTG} 为:

$$Q_{WTG} = Q_s - Q_c \quad (2)$$

在给定有功功率 P_s 的情况下,定子无功功率 Q_s

收稿日期:2020-03-29;修回日期:2020-05-03

基金项目:广东省科技计划项目(2020A050515003)

的范围为:

$$Q_{s,\min} \leq Q_s \leq Q_{s,\max} \quad (3)$$

式中: $Q_{s,\min}$, $Q_{s,\max}$ 分别为定子无功功率允许最小值和最大值,由文献[25]可知:

$$Q_{s,\min} = -\frac{3V_s^2}{2X_s} - \sqrt{\left(\frac{3X_m}{2X_s}V_s I_{r,\min}\right)^2 - P_s^2} \quad (4)$$

$$Q_{s,\max} = -\frac{3V_s^2}{2X_s} - \sqrt{\left(\frac{3X_m}{2X_s}V_s I_{r,\max}\right)^2 - P_s^2} \quad (5)$$

式中: V_s 为定子电压峰值,并网之后等于电网电压; $I_{r,\max}$, $I_{r,\min}$ 分别为转子侧变换器的电流最大值和最小值; X_m 为励磁电抗; X_s 为定子绕组的电抗值。

设网侧变换器设计的最大功率为 $P_{c,\max}$,最小功率为 $P_{c,\min}$,则网侧变换器从电网输入的无功功率 Q_c 范围为:

$$Q_{c,\min} \leq Q_c \leq Q_{c,\max} \quad (6)$$

式中: $Q_{c,\min}$, $Q_{c,\max}$ 分别为从电网输入的无功功率允许最小值和最大值,由文献[25]可知:

$$Q_{c,\min} = \sqrt{P_{c,\min}^2 - [s/(1-s)]^2 P_{mec}^2} \quad (7)$$

$$Q_{c,\max} = \sqrt{P_{c,\max}^2 - [s/(1-s)]^2 P_{mec}^2} \quad (8)$$

式中: s 为转差率; P_{mec} 为双馈电机机械功率。

综上所述,风力发电系统输入到电网的无功功率 Q_{WTC} 为:

$$Q_{s,\min} - Q_{c,\max} \leq Q_{WTC} \leq Q_{s,\max} - Q_{c,\min} \quad (9)$$

2 无功优化模型

电力系统无功优化问题一般可以表示为以下通用数学模型:

$$\begin{cases} \min & f(X, Y) \\ \text{s.t.} & h(X, Y) = 0 \\ & \underline{g} \leq g(X, Y) \leq \bar{g} \end{cases} \quad (10)$$

式中: $f(X, Y)$ 为目标函数; X 为决策变量,包括有载调压变压器的档位、DG 输出的无功功率和无功补偿装置的投切容量等; Y 为状态变量,包括除平衡节点外的其他所有负荷节点的电压相角,除平衡节点和 PV 节点外的节点的电压幅值以及 PV 节点的无功出力。约束条件包括等式约束和不等式约束,等式约束即潮流方程;不等式约束考虑发电机的机端电压,有载调压变压器的档位,无功补偿装置的投切容量等决策变量上下限, PQ 节点的电压幅值, PV 节点无功注入功率以及支路电流幅值等状态变量上下限。其中,有载调压变压器的档位和无功补偿装置的投切容量均为只取整数的离散变量。

2.1 目标函数

常见的无功优化模型目标函数考虑到系统运

行的经济性、安全性、稳定性等。文中设定 2 个目标函数:

(1) 以配电网有功网损最小化为目标函数。在调度周期的时间段内经过潮流计算,可以确定配电网任一节点电压幅值和相角,并计算其配电网的有功损耗,则有功网损最小化的目标函数为:

$$f_1 = \min \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n G_{ij} (V_i^2 + V_j^2 - 2V_i V_j \cos \theta_{ij}) \quad (11)$$

式中: G_{ij} 为支路 ij 的电导; V_i , V_j 分别为节点 i 和 j 的电压值; n 为节点个数; θ_{ij} 为电压相角。

(2) 以节点电压偏移量最小化为目标函数。

$$f_2 = \min \sum_{i=1}^n \left(\frac{V_i - V_{i0}}{\Delta V_{i\max}} \right)^2 \quad (12)$$

式中: V_{i0} 为节点 i 的理想电压幅值; $\Delta V_{i\max}$ 为节点 i 的最大允许电压偏移量。多目标函数为 $f = f_1 + f_2$ 。

2.2 约束条件

约束条件包括等式约束和不等式约束,分别对安全运行、决策变量、状态变量进行相关约束。

2.2.1 等式约束

DG 输出功率、无功补偿装置无功功率和负荷需求应满足如下潮流方程:

$$\begin{cases} P_i = G_{ij} V_i^2 + \sum_{j,j \in u(i)} V_i V_j (G_{ij} \cos \theta_{ij} + B_{ij} \sin \theta_{ij}) \\ Q_i = -B_{ij} V_i^2 - \sum_{j,j \in u(i)} V_i V_j (B_{ij} \cos \theta_{ij} - G_{ij} \sin \theta_{ij}) \end{cases} \quad (13)$$

$$\begin{cases} P_i = P_{i,\text{DG}} + P_{i,\text{D}} \\ Q_i = Q_{i,\text{DG}} + Q_{i,\text{SVG}} + Q_{i,\text{CB}} - Q_{i,\text{RB}} - Q_{i,\text{D}} \end{cases} \quad (14)$$

式中: $u(i)$ 为与节点 i 相连的节点集合; B_{ij} 为支路 ij 的电纳; P_i , Q_i 分别为节点 i 的净值有功功率注入和净值无功功率注入; $P_{i,\text{DG}}$, $P_{i,\text{D}}$ 分别为节点 i 的 DG 有功功率和负荷有功功率; $Q_{i,\text{DG}}$, $Q_{i,\text{D}}$, $Q_{i,\text{SVG}}$, $Q_{i,\text{CB}}$, $Q_{i,\text{RB}}$ 分别为节点 i 的 DG 无功功率、负荷消耗的无功功率、SVG 无功功率、电容器组 (capacitor bank, CB) 无功补偿功率和电抗器组 (reactor bank, RB) 无功补偿功率。

2.2.2 不等式约束

节点电压满足不大于其允许最大值、不小于其允许最小值的条件:

$$V_{i,\min} \leq V_i \leq V_{i,\max} \quad (15)$$

线路电流满足不大于其允许最大值的条件:

$$I_{ij} \leq I_{ij\max} \quad (16)$$

式中: $V_{i,\max}$, $V_{i,\min}$ 分别为节点 i 电压幅值上、下限;

$I_{ij\max}$ 为支路 ij 电流幅值上限; I_{ij} 为支路 ij 电流幅值。

CB 和 RB 在配电网运行调度过程中作为离散型决策变量,在一个调度周期内其操作次数有严格限制,且每一次投切都是成组操作,则 CB 和 RB 的运行应满足如下约束:

$$\begin{cases} Q_{i,\text{CB}} = N_{i,\text{CB}} Q_{i,\text{CB},\text{step}} \\ N_{i,\text{CB}} \leq N_{i,\text{CB},\text{max}} \end{cases} \quad (17)$$

$$\begin{cases} Q_{i,\text{RB}} = N_{i,\text{RB}} Q_{i,\text{RB},\text{step}} \\ N_{i,\text{RB}} \leq N_{i,\text{RB},\text{max}} \end{cases} \quad (18)$$

式中: $Q_{i,\text{CB},\text{step}}$, $Q_{i,\text{RB},\text{step}}$ 分别为单组电容器和电抗器的补偿容量; $N_{i,\text{CB}}$, $N_{i,\text{RB}}$ 分别为节点 i 中 CB 和 RB 投运组数; $N_{i,\text{CB},\text{max}}$, $N_{i,\text{RB},\text{max}}$ 分别为 CB 和 RB 最大投运组数。

SVG 在配电网运行调度的过程中作为连续型决策变量,能够充分应对主动配电网中由于 DG 波动而造成的电压骤升骤降的情况,并及时进行相应调控,则 SVG 的运行应满足如下约束:

$$Q_{i,\text{SVG},\text{min}} \leq Q_{i,\text{SVG}} \leq Q_{i,\text{SVG},\text{max}} \quad (19)$$

式中: $Q_{i,\text{SVG},\text{max}}$, $Q_{i,\text{SVG},\text{min}}$ 分别为 SVG 无功补偿容量的上、下限。

3 无功优化模型的线性转换

由上文可知,目标函数及等式约束是非线性的,为了采用线性规划方法求解无功优化问题,有必要准确建立优化问题的线性规划模型。采用潮流雅可比矩阵直接变换求取灵敏度系数,原理清楚,过程简单,无任何简化处理,结果正确,是一种较好的无功优化线性规划建模方法。

3.1 变量约束域

无功优化问题的变量约束域 D_0 与等式约束的可行域 D_1 和不等式约束的可行域 D_2 有关。在无功优化问题求解过程中,满足状态变量约束的情况下, D_1 中的某些决策变量越界,即潮流求解所得到的某些分量越出了无功优化决策变量约束域 D_2 ,为解决此问题,文中采用对越界变量加罚的方法。等式约束所决定的可行域 D_1 为:

$$D_1 = \{X, Y \mid h_0(X, Y) = 0\} \quad (20)$$

式中: $h_0(X, Y)$ 为等式约束,即无功潮流平衡方程。

不等式约束所决定的可行域 D_2 满足式(2),其中 Q_{OLTC} 为有载调压开关无功功率。

$$\begin{cases} Q_{i,\text{CB},\text{min}} \leq Q_{i,\text{CB}} \leq Q_{i,\text{CB},\text{max}} \\ Q_{i,\text{RB},\text{min}} \leq Q_{i,\text{RB}} \leq Q_{i,\text{RB},\text{max}} \\ Q_{i,\text{SVG},\text{min}} \leq Q_{i,\text{SVG}} \leq Q_{i,\text{SVG},\text{max}} \\ Q_{i,\text{PV},\text{min}} \leq Q_{i,\text{PV}} \leq Q_{i,\text{PV},\text{max}} \\ Q_{i,\text{WTG},\text{min}} \leq Q_{i,\text{WTG}} \leq Q_{i,\text{WTG},\text{max}} \\ Q_{\text{OLTC},\text{min}} \leq Q_{\text{OLTC}} \leq Q_{\text{OLTC},\text{max}} \end{cases} \quad (21)$$

首先考虑 D_1 中的变量都不越界的情况,即潮流计算所得到的变量均满足 D_2 的约束条件,此时 $D_0 = D_2$ 。然后考虑 D_1 中存在变量越界的情况,按照变量是否越界以及越界的性质,可以将变量分为 3 类^[26]: 不越界变量、越上界变量、越下界变量。对于 4 种变量,可以采用如下方法^[26] 来确定其约束域。

(1) 变量不越界的约束域。在变量不越界的情况下,对于变量 X ,在其初始点 X_0 的 ΔX 范围内, X 约束域为 $[X_0 - \delta, X_0 + \delta]$, 其中:

$$\begin{cases} X_{\min} \leq X_0 + \Delta X \leq X_{\max} \\ -\delta \leq \Delta X \leq \delta \\ X_{\min} \leq X_0 - \delta \\ X_{\max} \geq X_0 + \delta \end{cases} \quad (22)$$

式中: X_{\max} , X_{\min} 分别为变量 X 的最大值和最小值; δ 为变量 X 的可控值。

(2) 变量双边越界的约束域。在变量双边越界的情况下, X 约束域为 $[X_{\min}, X_{\max}]$, 其中:

$$\begin{cases} X_{\min} \leq X_0 + \Delta X \leq X_{\max} \\ -\delta \leq \Delta X \leq \delta \\ X_{\min} \geq X_0 - \delta \\ X_{\max} \leq X_0 + \delta \end{cases} \quad (23)$$

(3) 变量单边越上界的约束域。在变量单边越上界的情况下, X 约束域为 $[X_0 - \delta, X_{\max}]$, 其中:

$$\begin{cases} X_{\min} \leq X_0 + \Delta X \leq X_{\max} \\ -\delta \leq \Delta X \leq \delta \\ X_{\min} \leq X_0 - \delta \\ X_{\max} \leq X_0 + \delta \end{cases} \quad (24)$$

(4) 变量单边越下界的约束域。在变量单边越下界的情况下, X 约束域为 $[X_{\min}, X_0 + \delta]$, 其中:

$$\begin{cases} X_{\min} \leq X_0 + \Delta X \leq X_{\max} \\ -\delta \leq \Delta X \leq \delta \\ X_{\min} \geq X_0 - \delta \\ X_{\max} \geq X_0 + \delta \end{cases} \quad (25)$$

3.2 目标函数线性化

一个目标函数为配电网有功网损,该目标函数为非线性形式,通过潮流雅可比矩阵进行矩阵变换,得到目标函数灵敏度系数的线性化模型^[22]:

$$\begin{cases} f = \min \frac{\partial P_L}{\partial X} \Delta X + \frac{\partial P_L}{\partial Y} \Delta Y + \sum_{i=1}^{N_X} \mu X_i \geq 0 \\ \text{s.t. } \Delta X = S_{XY} \Delta Y \\ \begin{bmatrix} \Delta X_{\min} \\ \Delta Y_{\min} \end{bmatrix} \leq \begin{bmatrix} \Delta X \\ \Delta Y \end{bmatrix} \leq \begin{bmatrix} \Delta X_{\max} \\ \Delta Y_{\max} \end{bmatrix} \end{cases} \quad (26)$$

式中: P_L 为配电网有功网损; N_X 为变量个数; X_i 为决策变量或状态变量; μ 为罚函数系数; S_{XY} 为系统

状态变量对决策变量的灵敏度系数矩阵。罚函数系数要根据变量的越界性质来确定,对于越上界的变量,系数取为正值,以使变量值缩小。同理,对于越下界的变量,系数要取为负值,对于不越界变量,系数取为0。

3.3 求解方法与步骤

使用单纯形方法,要给定一个初始基本可行解,以便从这个基本可行解出发,求改进的基本可行解。两阶段单纯形法,第一阶段求初始基本可行解,第二阶段从初始基本可行解出发,求解线性规划的最优解。考虑具有标准形式的线性规划问题:

$$\begin{cases} \min & f = \mathbf{C}^T \mathbf{X} \\ \text{s.t.} & \mathbf{A}\mathbf{X} - \mathbf{b} = 0 \\ & \mathbf{X} \geq 0 \end{cases} \quad (27)$$

式中: \mathbf{A} 为 $m \times n$ 矩阵; $\mathbf{b} \geq 0$ 。若 \mathbf{A} 中含有 m 阶单位矩阵,则初始基本可行解可以立即得到。比如:

$$\mathbf{A} = [\mathbf{E}_m \quad \mathbf{N}] \quad (28)$$

那么:

$$\mathbf{X} = \begin{bmatrix} \mathbf{X}_E \\ \mathbf{X}_N \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{b} \\ 0 \end{bmatrix} \quad (29)$$

\mathbf{X} 为一个基本可行解。若 \mathbf{A} 中不包含 m 阶单位矩阵,就需要用其他方法求出一个基本可行解。

根据两阶段单纯形法^[22],引入人工变量。设 \mathbf{A} 中不包含 m 阶单位矩阵,为使约束方程的系数矩阵中含有 m 阶单位矩阵,把每个方程增加一个非负变量,即:

$$[\mathbf{A} \quad \mathbf{E}_m] \begin{bmatrix} \mathbf{X} \\ \mathbf{X}_m \end{bmatrix} = \mathbf{b} \quad \mathbf{X} \geq 0, \mathbf{X}_m \geq 0 \quad (30)$$

式中: \mathbf{E}_m 为 m 维的单位列向量; \mathbf{X}_m 为人工变量构成的 m 维向量。构造上式的意义是为了从式(24)的基本可行解出发,求出一个使得 $\mathbf{X}_m = 0$ 基本可行解,那么就得到式(21)的一个基本可行解。向量 \mathbf{X}_m 是人为引入的,其每个分量称为人工变量,但是人工变量的引入改变了原来的约束条件,从这个意义上讲,人工变量是“不合法”的变量。两阶段单纯形法的第一阶段则是用单纯形法消去人工变量,即把人工变量都变换成非基变量,求出原问题的一个基本可行解。消去人工变量的一种方法是求解下列问题:

$$\begin{cases} \min & \mathbf{E}_m^T \mathbf{X} \\ \text{s.t.} & \mathbf{A}\mathbf{X} + \mathbf{X}_m = \mathbf{b} \\ & \mathbf{X} \geq 0, \mathbf{X}_m \geq 0 \end{cases} \quad (31)$$

假设采用单纯形法求解上式得到的最优基本可行解为 $(\bar{\mathbf{X}}^T \bar{\mathbf{X}}_m^T)^T$,此时所求解可分为以下3种情况:

(1) $\bar{\mathbf{X}}_m \neq 0$,此时原问题无可行解。

(2) $\bar{\mathbf{X}}_m = 0$ 且 \mathbf{X}_m 的分量都是非基变量,此时, m 个基变量都是原来的变量,则 $\mathbf{X} = \bar{\mathbf{X}}$ 是原问题的一个基本可行解。

(3) $\bar{\mathbf{X}}_m = 0$ 且 \mathbf{X}_m 的某些分量是基变量,此时,可用主元消去法,把原来变量中的某些非基变量引进基,替换出基变量中的人工变量,再开始两阶段法的第二阶段。

两阶段单纯形法的第二阶段就是从所求得的基本可行解出发,再采用单纯形法求取原问题最优解。求解过程如下:

(1) 将线性规划问题转化为标准形式,目标函数采用极小化形式,把不等式约束转换为等式约束,决策变量要求非负。

(2) 检查约束方程右端是否均为非负。若有负值,将其进行转化。

(3) 检查方程组系数矩阵的秩是否为 m 。若秩为 m ,则得到了一个基本可行解,进而转到第二阶段;若秩不为 m ,则进行下一步。

(4) 引入人工变量,构造第一阶段问题。

(5) 解 $\mathbf{A}\mathbf{X}_m = \mathbf{b}$,求得 $\mathbf{X}_m = \mathbf{A}^{-1}\mathbf{b}$,计算目标函数值 $f = \mathbf{C}_m^T \mathbf{X}_m$ 。

(6) 确定 k ,求单纯形乘子 ω ,通过求解 $\omega \mathbf{A} = \mathbf{C}_m^T$,得到 $\omega \mathbf{A} = \mathbf{C}_m^T \mathbf{A}^{-1}$ 。对于所有非基变量,计算判别数 $z_j - c_j = \max z_j - c_j$ 。若 $z_j - c_j \leq 0$,则对应所有非基变量判别数小于零,对应基变量的判别数为零,由此可停止计算,现行基本可行解即最优解,否则进行下一步。

(7) 解 $\mathbf{A}\mathbf{y}_k = \mathbf{P}_k$,得到 $\mathbf{y}_k = \mathbf{A}^{-1}\mathbf{P}_k$,若 $\mathbf{y}_k \leq 0$,即 \mathbf{y}_k 的每个分量均非正数,则停止计算,问题不存在有限最优解,否则进行下一步。

(8) 确定 r 。要求:

$$\frac{\bar{b}_r}{y_{rk}} = \min \left\{ \frac{\bar{b}_i}{y_{ik}} \mid y_k > 0 \right\} \quad (32)$$

式中: y_{rk} 为出基变量; y_{ik} 为进基变量; y_k 为第 k 个输出变量; \bar{b}_i, b_r 分别为矩阵 \mathbf{b} 的第 i 元素和第 r 元素。用 \mathbf{P}_k 代替 \mathbf{P}_{rk} ,得到新的基矩阵,返回步骤(5)。

若第一阶段求得的最优基本可行解满足 $\bar{\mathbf{X}}_m = 0$,则进入两阶段单纯形法的第二阶段,采用单纯形法求解问题。

4 实例计算与分析

选取某电网某变电站F20线和F32线组成的三电压等级60节点的配电系统为例,网络拓扑结构如

图1所示,对提出的 DG 多点接入单变电站单用户三电压等级配电系统多类型有功和无功源协同运行优化配置模型进行验证分析。

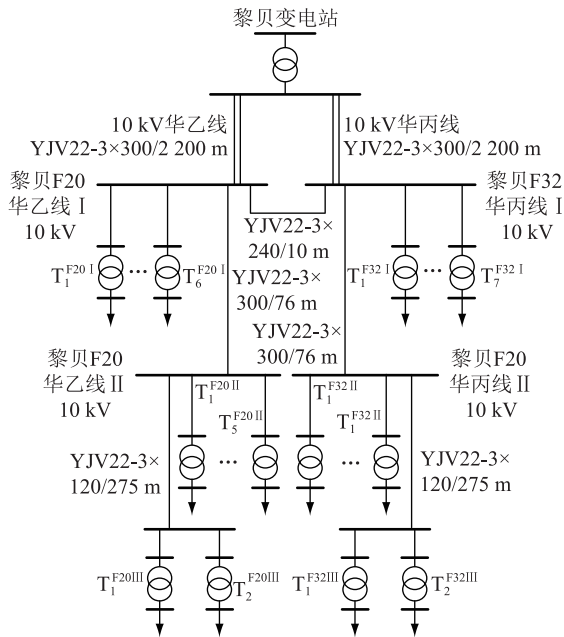


图1 某变电站 F20 线和 F32 线配电系统
Fig.1 Distribution system in a substation with F20 line and F23 line

算例中,接入配电网的 DG 类型为光伏发电系统和风力发电系统 2 种。以 1 d 作为一个优化周期,考虑到该配电系统涵盖区域面积不大,各地区在相同时间段内光照强度和风速的差异较小,算例中所有的光伏发电系统和风力发电系统在相同时刻下均采用了相同的光照强度和风速,利用光伏发电和风力发电模型进行模拟仿真,产生的日出力曲线如图 2 所示。

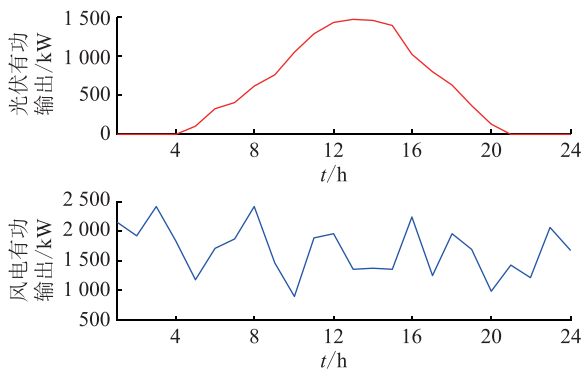


图2 光伏发电系统和风电机组日出力曲线
Fig.2 Power output of solar system and wind-driven generator

系统中 10 kV 电压等级的 DG 接入情况为节点 32 接入风力发电系统,节点 7 和 8 接入光伏发电系统。380 V 电压等级的 DG 接入情况为:节点 25, 30, 46, 56 接入光伏发电系统,其中 $\cos\theta_{PV} = 0.96$,

$\cos\theta_{WTC} = 0.9$ 。在节点 2, 22, 34, 48, 60 分别安装并联电容器,其组数均为 50 组,每组容量为 10 kvar。表 1 为该配电系统的节点负荷。考虑到一天中各节点的负荷随时间的变化,负荷量也随之变化,典型的日负荷量变化曲线如图 3 所示。

表 1 节点负荷
Table 1 Nodal load

节点编号	重载负荷		中载负荷		轻载负荷	
	有功/MW	无功/Mvar	有功/MW	无功/Mvar	有功/MW	无功/Mvar
9	1.152	0.560	0.864	0.420	0.576	0.280
10	1.440	0.700	1.080	0.522	0.720	0.348
11	1.440	0.700	1.080	0.522	0.720	0.348
12	1.152	0.560	0.864	0.420	0.576	0.280
13	0.900	0.440	0.675	0.330	0.450	0.220
14	1.152	0.560	0.864	0.420	0.576	0.280
15	1.152	0.560	0.864	0.420	0.576	0.280
16	1.440	0.700	1.080	0.522	0.720	0.348
17	1.440	0.700	1.080	0.522	0.720	0.348
18	1.152	0.560	0.864	0.420	0.576	0.280
19	1.152	0.560	0.864	0.420	0.576	0.280
20	0.900	0.440	0.675	0.330	0.450	0.220
21	1.152	0.560	0.864	0.420	0.576	0.280
22	0.720	0.350	0.540	0.260	0.360	0.100
23	0.720	0.350	0.540	0.260	0.360	0.100
24	0.720	0.350	0.540	0.260	0.360	0.100
25	0.720	0.350	0.540	0.260	0.360	0.100
26	1.152	0.560	0.864	0.420	0.576	0.280
27	0.900	0.440	0.675	0.330	0.450	0.220
28	0.900	0.440	0.675	0.330	0.450	0.220
29	0.900	0.440	0.675	0.330	0.450	0.220
30	0.900	0.440	0.675	0.330	0.450	0.220
31	1.800	0.872	1.350	0.654	0.900	0.436
32	0.720	0.350	0.540	0.260	0.360	0.100
33	0.720	0.350	0.540	0.260	0.360	0.100
34	1.800	0.872	1.350	0.654	0.900	0.436

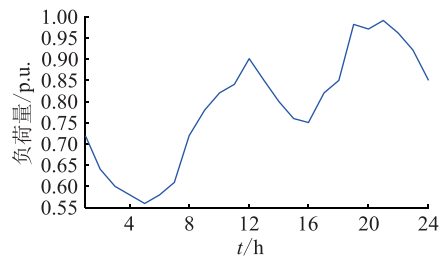


图3 日负荷曲线

Fig.3 Load curve in a day

图 4 为优化前后 12:00 的系统电压分布,结合 DG 的日输出功率曲线可以看出,在 12:00 时,由于太阳光照强度大,光伏发电系统输出功率较大,导

致系统电压偏高,部分节点电压甚至越过电压上限,不利于电网的安全运行。通过无功优化后,全网电压都在额定值附近,电压质量明显改善。

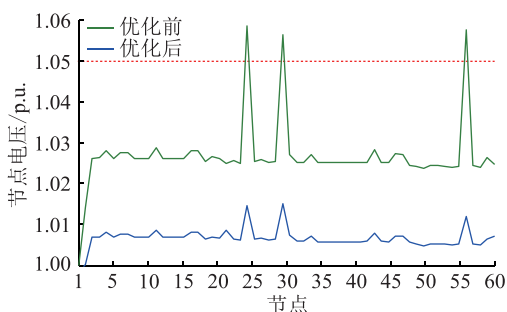


图4 优化前后 12:00 配电系统电压分布
Fig.4 Voltage level of distribution system at 12:00 before and after optimization

图5为优化前后相关节点日电压变化曲线,其中图5(a)—图5(c)均为光伏发电系统接入点且接入节点的电压等级为380V。由图5可知,全天的电压变化与光照强度有关。11:00—16:00时,由于光伏发电系统输出功率较大,电压会发生越电压上限的情况。

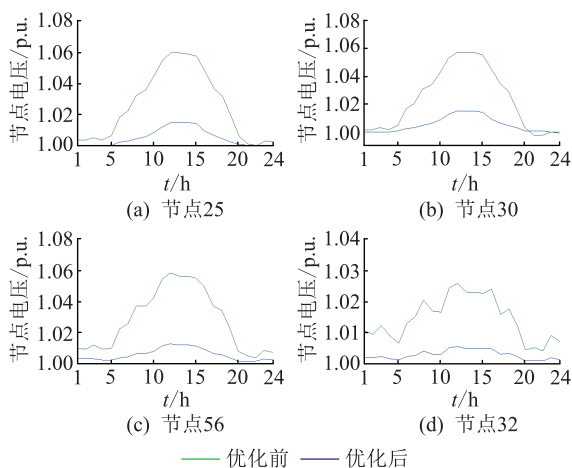


图5 优化前后相关节点日电压
Fig.5 Daily voltage of relevant nodes before and after optimization

根据节点7和8的电压情况对比可知,在相同DG出力的情况下,380V电压等级的节点电压更容易发生越限。通过无功优化后,系统中光伏发电系统接入节点的电压均能够保持在较为理想的电压水平。图5(d)为风力发电系统接入节点的日电压变化曲线,由于接入节点的电压等级为10kV,节点电压未出现越限的情况。但是,由于风力发电系统输出功率的波动性较大,节点电压波动性也随之增大。因此,风电的接入往往会造成电压质量下降,产生对用户用电情况不利的影

响。且均在理想电压值附近,提高了电网运行的安全性和稳定性。

图6为优化前后系统全天的有功功率损耗情况,通过无功优化,协调全网可控的无功补偿装置无功功率的调整,在配电系统电压无功优化的同时降低系统的有功功率损耗。

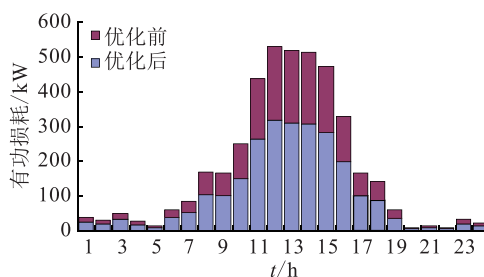


图6 优化前后每个时段的有功损耗
Fig.6 Active power loss before and after optimization

图7和图8为优化后系统中光伏发电系统和风力发电系统的无功功率调节策略。如果按照原始DG功率因数0.96和0.9下输出功率,虽然可以起到支撑电网电压的作用,但是会造成电压越限。通过无功优化,协调系统中DG和无功补偿装置的无功输出,合理地控制系统中无功潮流的分布,可以保证电压在安全运行的范围内,并整体提高电压水平。表2为各个时刻下系统中无功补偿装置的运行策略。

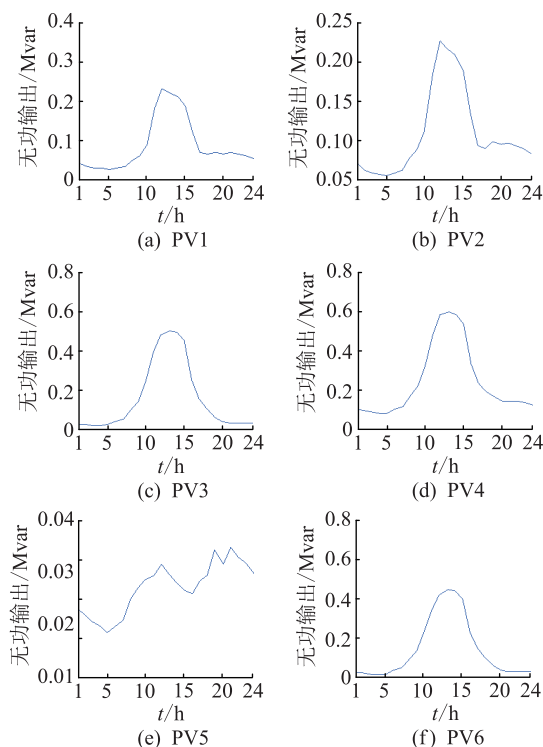


图7 优化后光伏发电系统无功输出
Fig.7 Reactive power output of solar power generation system after optimization

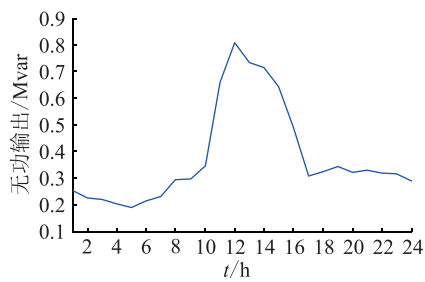


图8 优化后风力发电系统无功输出

Fig.8 Reactive power output of wind power generation system after optimization

表2 并联电容器组输出无功功率

Table 2 Output reactive power of shun capacitor

时间 /h	并联电容器组投切量/kvar			
	CB1	CB2	CB3	CB4
1	50	40	20	60
2	40	40	20	60
3	70	40	20	50
4	40	40	20	50
5	40	30	20	40
6	150	40	20	50
7	200	40	20	50
8	400	50	20	60
9	400	50	20	70
10	500	60	20	70
11	500	100	20	70
12	500	110	20	80
13	500	110	20	70
14	500	100	20	70
15	500	100	20	70
16	500	70	20	70
17	400	60	20	70
18	350	60	20	70
19	150	60	30	80
20	40	60	30	80
21	30	60	30	90
22	30	60	30	80
23	50	60	30	80
24	30	50	20	70

5 结论

文中针对新能源配电系统,构建了 DG、并联电容器和 SVG 等多类型无功源出力优化模型,利用控制变量的约束域及其罚函数及对目标函数灵敏度系数的线性化,实现了新能源配电网多类型无功源协同优化运行,效果良好。通过仿真计算和验证,得出以下结论:

(1) 在新能源环境下,利用光伏发电系统逆变

器及馈电机风力发电系统对输出无功功率的调整能力,采用优化控制方法,协同 DG 输出功率、并联电容器和 SVG 无功功率的输出量,能够优化配电网的无功功率平衡关系,提高电压质量,降低网损。

(2) 在多种类型 DG 大规模接入的配电网中,在光照强度大或风速较大时段, DG 出力较大,容易形成多向潮流或反向潮流,导致在 DG 附近的局部区域节点电压偏高,电压合格率大幅下降。通过无功优化后,电压质量明显提高。

(3) 在多电压等级配电网中,相同 DG 出力的情况下,由于 DG 输出功率的不确定性和间歇性,低电压等级的节点电压更容易发生越限。

本文得到广州市科技计划项目(2020020304-63),广东电网有限责任公司科技项目(0359002020-030203XT00004)资助,谨此致谢!

参考文献:

- [1] 宋璇坤,辛培哲,李珊,等.考虑多重不确定性因素的分布式电源鲁棒规划方法研究[J].智慧电力,2019,47(6):56-63.
SONG Xuankun, XIN Peizhe, LI Shan, et al. Robust planning method of distributed generation considering multiple uncertainties[J]. Smart Power, 2019, 47(6): 56-63.
- [2] 莫超,吴杰康,简俊威.分布式电源配电网模糊多目标无功优化配置[J].智慧电力,2018,46(5):33-39.
MO Chao, WU Jiekang, JIAN Junwei. Fuzzy multi-objective reactive power optimization of distribution network with distributed generation[J]. Smart Power, 2018, 46(5): 33-39.
- [3] 郑能,胡瑞馨,丁晓群,等.考虑多种类型的分布式电源和网络重构的配电网无功优化[J].智慧电力,2019,47(3):90-96.
ZHENG Neng, HU Ruixin, DING Xiaqun, et al. Reactive power optimization of distribution network considering multiple types of distributed generations and network reconfiguration[J]. Smart Power, 2019, 47(3): 90-96.
- [4] 王林富,邱方驰,张斌,等.基于分布式电源的配电网多目标优化策略研究[J].智慧电力,2019,47(1):47-53,65.
WANG Linfu, QIU Fangchi, ZHANG Bin, et al. Research on multi-objective optimal strategy for distribution network based on distributed generation[J]. Smart Power, 2019, 47(1): 47-53, 65.
- [5] 付学谦,陈皓勇,刘国特,等.分布式电源电能质量综合评估方法[J].中国电机工程学报,2014,34(25):4270-4276.
FU Xueqian, CHEN Haoyong, LIU Guote, et al. Power quality comprehensive evaluation method for distributed generation[J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(25): 4270-4276.
- [6] 沈鑫,曹敏.分布式电源并网对于配电网的影响研究[J].电工技术学报,2015,30(S1):346-351.
SHEN Xin, CAO Min. Research on the influence of distributed power grid for distribution network[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2015, 30(S1): 346-351.

- [7] 刘一兵,吴文传,张伯明,等. 基于有功-无功协调优化的主动配电网过电压预防控制方法[J]. 电力系统自动化,2014,38(9):184-191.
LIU Yibing, WU Wenchuan, ZHANG Boming, et al. Overvoltage preventive control method based on active and reactive power coordinated optimization in active distribution network[J]. Automation of Electric Power Systems, 2014, 38(9): 184-191.
- [8] 陈旭,张勇军,黄向敏. 主动配电网背景下无功电压控制方法综述[J]. 电力系统自动化,2016,40(1):143-151.
CHEN Xu, ZHANG Yongjun, HUANG Xiangmin. Review of reactive power and voltage control method in the background of active distribution network[J]. Automation of Electric Power Systems, 2016, 40(1): 143-151.
- [9] 邢海军,程浩忠,张沈习,等. 主动配电网规划研究综述[J]. 电网技术,2015,39(10):2705-2711.
XING Haijun, CHENG Haozhong, ZHANG Shenxi, et al. Review of active distribution network planning[J]. Power System Technology, 2015, 39(10): 2705-2711.
- [10] MARTINEZ-ROJAS M, SUMPER A, GOMIS-BELLMUNT O, et al. Reactive power dispatch in wind farms using particle swarm optimization technique and feasible solutions search[J]. Applied Energy, 2011, 88(12): 4678-4686.
- [11] 缪楠林,刘明波,赵维兴. 电力系统动态无功优化并行算法及其实现[J]. 电工技术学报,2009,24(2):150-157.
MIAO Nanlin, LIU Mingbo, ZHAO Weixing. Parallel algorithm of dynamic reactive power optimization and its implementation[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2009, 24(2): 150-157.
- [12] 陈琳,钟金,倪以信,等. 含分布式发电的配电网无功优化[J]. 电力系统自动化,2006,30(14):20-24.
CHEN Lin, ZHONG Jin, NI Yixin, et al. Optimal reactive power planning of radial distribution systems with distributed generation[J]. Automation of Electric Power Systems, 2006, 30(14): 20-24.
- [13] 栗然,马慧卓,祝晋尧,等. 分布式电源接入配电网多目标优化规划[J]. 电力自动化设备,2014,34(1):6-13.
LI Ran, MA Huizhuo, ZHU Jinyao, et al. Multi-objective optimization for DG integration into distribution system[J]. Electric Power Automation Equipment, 2014, 34(1): 6-13.
- [14] 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 the district grid with distributed generators[J]. Automation of Electric Power Systems, 2011, 35(8): 28-32.
- [15] MALEKPOUR A R, TABATABAEI S, NIKNAM T. Probabilistic approach to multi-objective volt/var control of distribution system considering hybrid fuel cell and wind energy sources using improved shuffled frog leaping algorithm[J]. Renewable Energy, 2012, 39(1): 228-240.
- [16] ALONSO M, AMARIS H, ALVAREZ-ORTEGA C. A multiobjective approach for reactive power planning in networks with wind power generation[J]. Renewable Energy, 2012, 37(1): 180-191.
- [17] 徐进东,丁晓群,覃振成,等. 基于非线性预报-校正内点法的电力系统无功优化研究[J]. 电网技术,2005,29(9):36-40.
XU Jindong, DING Xiaoqun, QIN Zhencheng, et al. A nonlinear predictor-corrector interior point method for reactive power optimization in power system[J]. Power System Technology, 2005, 29(9): 36-40.
- [18] 刘明波,李健,吴捷. 求解无功优化的非线性同伦内点法[J]. 中国电机工程学报,2002,22(1):1-7.
LIU Mingbo, LI Jian, WU Jie. Nonlinear homogeneous interior-point method for reactive power optimization[J]. Proceedings of the CSEE, 2002, 22(1): 1-7.
- [19] 于汀,崔琳,董雷,等. 基于半定规划的三相主动配电网无功优化[J]. 南方电网技术,2016,10(8):89-101.
YU Ting, CUI Lin, DONG Lei, et al. Reactive power optimization for three-phase active distribution network based on semi-definite programming[J]. Southern Power System Technology, 2016, 10(8): 89-101.
- [20] 张勇军,任震,唐卓尧,等. 电压无功优化的强多样性遗传算法[J]. 电力自动化设备,2003,23(1):18-24.
ZHANG Yongjun, REN Zhen, TANG Zhuoyao, et al. Diversity enhancing genetic algorithm for voltage and reactive power optimization[J]. Electric Power Automation Equipment, 2003, 23(1): 18-24.
- [21] 周鑫,诸弘安,马爱军. 基于多种群蚁群算法的多目标动态无功优化[J]. 电网技术,2012,36(7):231-236.
ZHOU Xin, ZHU Hong'an, MA Aijun. Multi-objective dynamic reactive power optimization based on multi-population ant colony algorithm[J]. Power System Technology, 2012, 36(7): 231-236.
- [22] 李佳,刘天琪,李兴源,等. 改进粒子群-禁忌搜索算法在多目标无功优化中的应用[J]. 电力自动化设备,2014,34(8):71-77.
LI Jia, LIU Tianqi, LI Xingyuan, et al. Application of improved particle swarm-tabu search algorithm in multi-objective reactive power optimization[J]. Electric Power Automation Equipment, 2014, 34(8): 71-77.
- [23] 高菲,宋晓辉,盛万兴,等. 考虑决策者偏好信息的配电网多目标无功优化研究[J]. 电网技术,2016,40(9):2845-2851.
GAO Fei, SONG Xiaohui, SHENG Wanxing, et al. Research on multi-objective reactive power optimization of distribution network considering decision maker's preference[J]. Power System Technology, 2016, 40(9): 2845-2851.
- [24] 罗苻子. 基于有功-无功协同优化的含DG配电网电压控制策略研究[D]. 长沙:湖南大学,2017.
LUO Xingzi. Research on voltage control strategy based on coordinated active-reactive power optimization in distribution networks[D]. Changsha: Hunan University, 2017.
- [25] 师庆丹. 考虑双馈机组分散协调控制风电场并网无功电压

优化研究[D]. 秦皇岛:燕山大学,2018.

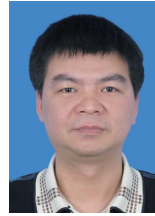
SHI Qingdan. Study on reactive power and voltage optimization of grid connected wind farm considering the decentralized and coordinated control of DFIG[D]. Qinhuangdao:Yanshan University,2018.

[26] 胡敏. 界约束无功优化方程式算法及含风电的系统无功优化研究[D]. 长沙:长沙理工大学,2009.

HU Min. Research on the algorithm of bounded reactive power optimization equation and the reactive power optimization of wind power system[D]. Changsha:Changsha University of Te-

chnology,2009.

作者简介:



郭清元

郭清元(1972),男,学士,高级工程师,从事电力系统运行与控制等工作(E-mail:dgpow-ergqy1363@163.com);

莫超(1991),男,硕士,助理工程师,从事电力系统运行与控制等工作;

吴杰康(1965),男,博士,教授,博士生导师,研究方向为电力系统运行与控制等。

Multi-type reactive power output optimization method of distribution system with distributed generations

GUO Qingyuan¹, MO Chao^{2,3}, WU Jiekang², WU Fan⁴, TANG Huiling², CHEN Lingmin²

(1. Dongguan Power Supply Bureau of Guangdong Power Grid Co.,Ltd.,Dongguan 523008,China;

2. School of Automation,Guangdong University of Technology,Guangzhou 510006,China;

3. Nanning Rail Transit Co.,Ltd.,Nanning 530029,China;

4. Guangxi Hongshen Electric Power Design Co.,Ltd.,Nanning 530028,China)

Abstract: In view of the voltage quality problems of the distribution network caused by the access of distributed generations (DG), a multi-objective optimization model for the output of multiple types of reactive power sources in the distribution system aiming at minimizing active power loss and node voltage offset is built. And this model is oriented to DG and shunt capacitors. The restricted range of photovoltaic inverters and doubly-fed wind power generation to the grid is given considering the reactive power characteristics of photovoltaic power generation systems and wind turbines. The constraint condition function of the output of DG and shunt capacitors or the absorption of reactive power is constructed considering the constraint region of variables not crossing the boundary, bilateral crossing the boundary, unilateral crossing the upper boundary, and unilateral crossing the lower boundary. Using the sensitivity coefficient based on the power flow, a linearized model of the sensitivity coefficient of the objective function is obtained. The two-stage simplex method is used to solve the optimization problem with good results. At last, taking a three-voltage 60-node power distribution system composed of F20 and F32 lines in a certain substation of a power grid as a calculation example, the feasibility and applicability of the model and algorithm in this paper are verified.

Keywords: distribution system; coordinative operation optimization of multiple type reactive power sources; distributed generation; static var generator(SVG); shunt capacitors

(编辑 方晶)