基于分布式电源有功-无功调节能力的配电网无功规划

沈阳武[1],熊尚峰[1],沈非凡[2],梁利清[1],张 辰[2],张 曦[2],柯德平[2]
(1. 国网湖南省电力有限公司电力科学研究院,湖南 长沙 410007;
2. 武汉大学 电气工程学院,湖北 武汉 430072)

摘要:传统的无功规划方法在应对小概率极端电压场景时往往要求配电网投资大量的无功补偿装置。为此,基于分布式电源及负荷场景,提出一种配电网无功规划模型,该模型充分利用了分布式电源的有功、无功调节能力,在小概率极端电压场景下将分布式电源有功调节作为一种附加电压调节手段,并以无功补偿装置投资费用和分布式电源有功调节费用之和最小为目标以减少系统总支付费用。提出一种嵌入原始对偶内点法的粒子群优化算法对模型进行求解。通过对自定义IEEE 30节点系统进行仿真分析,验证了所提模型的经济性和所提算法的有效性。

关键词:配电网;无功规划;分布式电源;有功调压;小概率事件;场景
中图分类号:TM 761 **文献标识码**:A DOI:10.16081/j.issn.1006-6047.2018.12.007

0 引言

分布式电源DG(Distributed Generation)的大力发展极大地缓解了我国的能源枯竭和环境污染问题。但在DG带来巨大利益的同时,大量DG的接入使配电网由原有的放射性结构转变为多电源结构,潮流的流向较之前更加复杂,给配电网带来了严峻的挑战[1]。此外,由于出力具有明显的随机性和波动性,且缺乏统一的并网管理体系,DG的大量接入严重地影响了并网地区的静态电压稳定,如造成频繁出现的高压问题[2]。电压的安全稳定对社会生产和生活有着极其重要的意义,因此有必要采取有效的措施对配电网的静态电压进行调控。

无功规划是电力系统安全经济运行的一个重要方面,通过确定电网无功补偿装置的最优安装位置和容量,实现电网的静态电压管理。目前,已有大量学者对此进行了研究,研究方法[3]包括灵敏度分析法、模态分析法、无功精确矩法、负荷功率阻抗法、节点无功裕度法、二阶锥规划法[4]及智能算法等。对于含有大量DG的配电网,无功规划还必须考虑DG出力随机性和波动性的影响。文献[5]根据风电出力概率分布计算风电出力期望值,并将其作为无功规划模型中的风电出力值。文献[6]采用场景法处理风电出力随机性,基于多个典型的场景建立无功规划模型。文献[7]采用概率分布鲁棒机会约束模型描述考虑风电出力不确定性后的无功规划问题。文献[8]采用概率解析法处理风电出力随机性,并建立了机会约束无功规划模型。上述研究中的无功规划模型都考虑了DG出力的随机性,但是均未考虑DG的无功调节能力。文献[9]指出,光伏系统、风电机组均可在其容量范围内输出无功功率并参与电网的无功调节。水电机组也可通过调整其运行功率因数进行无功功率的灵活调节。显然,充分利用DG的无功调节能力可减少无功补偿装置的投资。

目前,已有许多文献将DG的有功、无功调节和无功补偿装置相结合进行系统的电压调节。文献[10]将DG的无功调节作为电网无功优化的一种手段,保证电网电压处于合格范围内。文献[11]考虑了DG的有功调节能力,对微型燃料机组和燃料电池进行有功-无功综合调节以调控系统电压。文献[12]提出了基于有功-无功调节的DG本地电压控制策略,以解决DG接入造成的电压越限问题。文献[13]提出了基于模型预测控制的主动配电网多时间尺度有功无功协调调度方法。文献[14]分析了光伏发电系统无功出力的概率分布,并且建立了考虑光伏无功调节能力的无功规划模型。但是,总体而言,在无功规划模型中考虑DG无功调节能力的研究目前还较少。此外,在无功规划模型中考虑DG有功调节能力的研究尚未见报道。

在实际电网中,由于小概率极端天气的存在,电网往往存在小概率极端高压问题,即区域性(通常在DG附近)的节点电压越限问题,且部分节点电压越限程度严重。这类问题的发生概率很低,主要原因为DG的大量接入和过高出力。如果在进行无功规划时仅仅考虑用无功补偿装置和DG无功调节来进行小概率极端高压的控制,由于DG无功调节能力较小,必然需要大量安装无功补偿装置。因此,在极端高压场景下可以将DG有功调节作为一种附加电压调节手段。若在建立无功规划模型时考虑极端高压场景下的DG有功调节能力,必然会减少无功补偿装置初始投资。

收稿日期:2018-04-14;**修回日期**:2018-10-29
基金项目:国家重点研发计划资助项目(2017YFB0902900,2017YFB0902902)
Project supported by the National Key Research and Development Program of China(2017YFB0902900,2017YFB0902902)

基于在极端高压场景下考虑 DG 有功调节能力的思想,本文提出了一种考虑 DG 有功-无功调节能力的无功规划模型,考虑了分布式风电、小水电出力的随机性以及负荷不确定性。根据 DG 历史出力形成的累积分布函数(CDF)曲线,采用拉丁超立方采样(LHS)[15]生成场景,并进行相关性处理[16]和同步回代消除[15],最终形成典型场景;基于典型场景,以电网侧无功补偿装置投资费用和 DG 有功调节费用之和最小为目标建立了考虑 DG 有功-无功调节能力的无功规划模型,并采用嵌入原始对偶内点法的粒子群优化算法对模型进行求解。

1　考虑 DG 有功-无功调节能力的无功规划模型

1.1　DG 有功调节机理分析

DG 出力具有随机性,结合 DG 出力场景和潮流分析可知配电网节点电压具有概率分布特性。图 1 示意性描述了电压分布的概率密度曲线,其中区域Ⅰ为电压合格区,区域Ⅱ为低电压区,区域Ⅲ为高电压区,区域Ⅳ为极端高电压区。对于区域Ⅱ和区域Ⅲ,可以通过对无功补偿装置及 DG 无功进行控制来实现电压调节;而对于极端高压区域Ⅳ,则可将 DG 有功调节作为附加调节手段。现以单机无穷大系统为例对 DG 有功调节参与电网电压控制的基本原理进行分析。

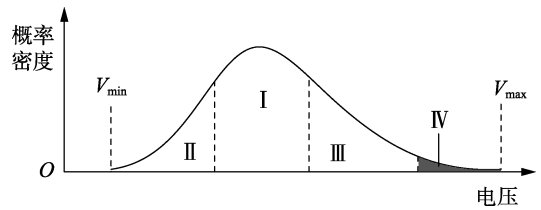

图 1　配电网节点电压概率密度分布

Fig.1　Probability density distribution of bus voltage in distribution network

如图 2 所示单机无穷大传输系统,DG 经一条馈线入网,无穷大电网电压 V_0 恒定,相角为 0°;DG 接入母线电压幅值为 V_1,相角为 θ;且接入一个恒功率负荷 P_L+jQ_L;馈线送端功率为 P+jQ,电流为 I,线路等效阻抗为 R+jX。图 3 为该系统对应的电压相量图,图中 $\overrightarrow{OA}$ 表示电压 $V_0\angle 0°$,$\overrightarrow{OC}$ 表示电压 $V_1\angle\theta$,$\overrightarrow{AB}$ 表示电压降落横分量 δV,而 $\overrightarrow{BC}$ 表示电压降落的纵分量 ΔV。以送端功率和电压表示的电压降落横、纵分量的计算式如下:

$$\delta V=(PX-QR)/V_1 \tag{1}$$

$$\Delta V=(PR+QX)/V_1 \tag{2}$$

随着 DG 出力增大(P 增大),根据式(1)和图 3 可知表征电压降落横分量大小的线段 AB 长度会增

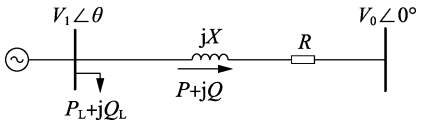

图 2　单机无穷大传输系统

Fig.2　Single-machine infinite-bus system

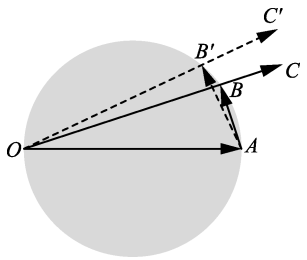

图 3　电压相量图

Fig.3　Schematic diagram of voltage phasors

大(忽略送端电压 $V_1\angle\theta$ 少量变化对电压降落计算的影响),在线段 OA 固定的情况下这将迫使线段 OB 变短。此外,根据式(2)可知 P 增大会增大电压降落纵分量,即从图 3 中线段 BC 变为线段 $B'C'$。上述分析表明:增大 DG 出力会同时增大电压降落的横分量和纵分量;横分量增大有减小送端电压的趋势,而纵分量增大则有提升送端电压的趋势。通常,由于送受端电压相角差不会太大,电压降落横分量对送端电压的影响较小。因此,送端电压的变化将主要由电压降落的纵分量决定;送端电压会随着 DG 出力的增大而上升。由于配电网的电阻 R 较大,这种送端电压随着送端功率一起上升的现象将愈加明显。

上述机理分析说明,由于 DG 有功出力较大引起的配电网高压越限问题可以通过适当压制其出力来有效解决。然而,这种解决手段由于不能充分利用 DG 出力而牺牲了部分的系统运行经济性。因此,只有当需要限制 DG 出力来控制的极端高压越限问题出现的概率较小时,这种解决手段才与其他调压手段在经济性上可比,从而存在相互协调最优的空间。需要强调的是,图 1 只是示意性地描述了这种(小概率极端高压越限)情况,但它并不代表实际配电网电压概率密度函数的一般形状。

1.2　场景生成方法

本文的研究对象为含 DG 电网电压的静态分布,不需要考虑连续时间断面之间的相关性,因而采取静态场景生成方法。

首先根据 DG 的历史出力形成 CDF,再采用拉丁超立方采样[15]对 CDF 曲线进行逆变换采样。拉丁超立方采样属于分层抽样,数量样本小且避免重复,其结果可以反映随机变量的理论分布。

就实际经验来看,同一区域或地理位置相近的 DG 因为相似的气候条件出力具有较为明显的相关性。但对多个随机变量而言,拉丁超立方采样生成

的采样序列无法反映各变量之间的相关性。理论研究表明,对随机变量序列元素进行重新排列即可改变随机变量之间的相关性[16]。因此,本文首先根据历史数据对DG进行相关性分析,再通过粒子群优化算法对随机变量采样序列进行重新排序,使采样结果与历史数据相关性一致。

在得到满足相关性要求的采样序列后,再采用文献[15]提出的同步回代消除法对场景数目进行削减。该方法在反映各场景发生概率的基础上,保留了发生概率较低但一旦发生将严重影响电力系统安全稳定运行的极端场景。通过上述过程,即生成本文所需的典型场景。

1.3 无功规划模型

本节基于典型的DG出力及负荷场景,考虑DG有功-无功调节能力建立无功规划模型。

由于本文提出的无功规划模型考虑了极端场景下DG的有功调节,当DG降低其有功出力时必然会减小发电厂商的利润。因此,本文模型以无功补偿装置投资费用和发电厂商损失的利润即有功调节费用之和最小为目标函数。并且为了更合理有效地表征无功补偿装置的投资费用,本文采用无功补偿装置的全寿命周期成本[17]来表征此设备的总支付费用。

1.3.1 目标函数

a. 无功补偿装置等年值支付费用f_1。

$$f_1=\left(\sum_{i=1}^{l}k_iL_i\right)\frac{r(1+r)^n}{(1+r^n)-1} \tag{3}$$

$$L_i=C_{\mathrm{I}i}+C_{\mathrm{M}i}+C_{\mathrm{D}i} \tag{4}$$

其中,L_i为节点i无功补偿设备的全寿命周期成本;当节点i安装了无功补偿装置时,$k_i=1$,否则$k_i=0$;l为系统节点数;r为年贴现率;n为无功补偿装置可使用年限;$C_{\mathrm{I}i}$为节点i无功补偿装置的初始投资费用;$C_{\mathrm{M}i}$为节点i无功补偿装置的运行维护成本;$C_{\mathrm{D}i}$为节点i无功补偿装置的报废成本。

b. 典型场景下发电厂商损失的利润期望值f_2。

$$f_2=\sum_{t=1}^{S}\left[p_tc_3T\sum_{i=1}^{G}(P_i^{t0}-P_i^t)\right] \tag{5}$$

其中,S为DG出力及负荷典型场景的个数;G为系统中允许进行有功调节的DG台数;p_t为第t个场景发生的概率;c_3为上网电价;T为年运行小时数;P_i^{t0}和P_i^t分别为第i台DG在第t个场景下有功调节前的出力值及有功调节后的实际出力值。

因此本文无功规划模型的目标函数为:

$$\min f=f_1+f_2 \tag{6}$$

由于节点电压约束的存在,目标函数式(6)可以调整为如下带有节点电压惩罚项的目标函数f^{c}:

$$\min f^{\mathrm{c}}=f_1+f_2+\lambda\sum_{t=1}^{S}\sum_{i=1}^{l}\Delta U_i^t \tag{7}$$

$$\Delta U_i^t=\begin{cases}U_i^{\min}-U_i^t & U_i^t\leqslant U_i^{\min}\\ U_i^t-U_i^{\max} & U_i^t\geqslant U_i^{\max}\\ 0 & U_i^{\min}<U_i^t<U_i^{\max}\end{cases} \tag{8}$$

其中,λ为惩罚系数;U_i^t为节点i在第t个场景下的电压值;$U_i^{\max}$和$U_i^{\min}$分别为节点i电压允许上、下限。式(7)等号右侧的第三项为节点电压惩罚项。

1.3.2 无功规划模型

综上所述,本文建立的基于DG有功-无功调节能力的配电网无功规划模型可以表示如下:

$$\min f^{\mathrm{c}} \tag{9}$$

$$\text{s.t. }\begin{aligned}&P_{\mathrm{G}i}^t-P_{\mathrm{L}i}^t=U_i^t\sum_{j=1}^{l}U_j^t(G_{ij}\cos\delta_{ij}-B_{ij}\sin\delta_{ij})\\&Q_{\mathrm{G}i}^t-Q_{\mathrm{L}i}^t-Q_{ci}^t=U_i^t\sum_{j=1}^{l}U_j^t(G_{ij}\sin\delta_{ij}-B_{ij}\cos\delta_{ij})\end{aligned} \tag{10}$$

$$\begin{cases}P_i^{\min}\leqslant P_i^t\leqslant P_i^{\max}\\ Q_i^{\min}\leqslant Q_i^t\leqslant Q_i^{\max}\end{cases} \tag{11}$$

$$Q_{ci}^{\min}\leqslant Q_{ci}^t\leqslant Q_{ci}^{\max} \tag{12}$$

其中,$P_{\mathrm{G}i}^t$、$Q_{\mathrm{G}i}^t$、$P_{\mathrm{L}i}^t$、$Q_{\mathrm{L}i}^t$分别为第t个场景下节点i处电源注入的有功功率和无功功率以及所连接的有功负荷和无功负荷;G_{ij}和B_{ij}为节点导纳矩阵参数;δ_{ij}为节点i、j之间的电压相角差;Q_i^t为第i台DG在第t个场景下的无功实际出力;$P_i^{\max}$、$P_i^{\min}$、$Q_i^{\max}$、$Q_i^{\min}$分别为第i台DG有功和无功出力上、下限;Q_{ci}^t为第t个场景下节点i处无功补偿装置的出力值,$Q_{ci}^{\max}$和$Q_{ci}^{\min}$分别为其出力上、下限。

式(9)—(12)形成了完整的无功规划模型。式(10)为第t个场景下的潮流等式约束;式(11)为第t个场景下DG有功-无功调节能力约束;式(12)为无功补偿装置容量约束。

本文无功规划模型的决策变量为系统无功补偿装置的安装位置和容量,即$(k_1,k_2,\cdots,k_m)$、$[(Q_{\mathrm{c}1}^{\min},Q_{\mathrm{c}1}^{\max}),\cdots,(Q_{cm}^{\min},Q_{cm}^{\max})]$,其中$m$为安装无功补偿装置的节点总数。通过对模型分析可得,目标函数式(7)等号右侧的第二项和第三项之和的理论最小值为0,当所有节点电压均处于合格范围之内并且无需DG进行有功调节时能够获得该值。而当无功补偿装置和DG无功综合调节无法将所有电压不合格节点调整至合格范围内时,如果不进行DG有功调节,系统会出现电压越限问题,此时,由于节点电压惩罚项系数λ的存在,系统会进行DG有功调节来满足节点电压约束。

2　无功规划模型求解

2.1　求解算法

在上述模型中，DG 的有功出力值、无功出力值以及连续型无功补偿设备的补偿值均为连续型变量。而无功补偿装置的安装容量以及固定电容器、电抗器的补偿值均为离散型变量。因此，求解上述无功规划模型即为求解一个混合整数非线性规划问题。本文考虑到粒子群优化算法[18]在求解混合整数非线性规划问题时的独特优势以及原始对偶内点法[19]在求解非线性规划问题时的快速收敛性，提出了一种嵌入原始对偶内点法的粒子群优化算法对该模型进行求解。

2.1.1　粒子群优化算法

粒子群优化算法首先随机生成一系列粒子，每个粒子代表一组决策变量，然后，根据适应度函数值判断单个粒子自身最优位置信息和全部粒子的最优位置信息并进行迭代和更新，最终得到最优决策解。粒子群优化算法的更新迭代公式如下：

$$\begin{cases} V_i^{j+1}=\omega V_i^j+c_1r_1(P_i-X_i^j)+c_2r_2(P_g-X_i^j) \\ X_i^{j+1}=X_i^j+V_i^{j+1} \end{cases} \tag{13}$$

其中，X_i^j 为第 i 个粒子在第 j 次迭代中的位置；V_i^j 为第 i 个粒子在第 j 次迭代中的更新速度；P_i 为粒子自身最优位置；P_g 为全部粒子的最优位置；ω 为权重因子；c_1、c_2 为学习因子；r_1、r_2 为 0~1 间的随机数。

2.1.2　原始对偶内点法

原始对偶内点法适合求解大规模非线性规划问题，其收敛速度快，求解精度高。在求解本文无功规划模型过程中，首先由粒子群优化算法生成一系列随机粒子，每个粒子代表一组无功补偿装置的安装位置、安装容量。然后，对于一个确定的粒子 X_i^j，即 $\{(k_1,k_2,\cdots,k_m),[(Q_{c1}^{\min},Q_{c1}^{\max}),\cdots,(Q_{cm}^{\min},Q_{cm}^{\max})]\}_i^j$，通过原始对偶内点法对无功规划模型式(9)—(12)进行求解。值得注意的是，本文所提无功规划模型中的固定电容器、电抗器补偿值均为离散变量。因此，在应用原始对偶内点法对无功规划模型进行求解时，首先将上述离散变量连续化，采用原始对偶内点法对模型进行可行域全局寻优；然后对寻优结果中的离散变量进行归整处理再次对模型进行求解，最终可得到合理的最优解，即粒子的适应度函数值。

2.2　算法流程

结合 2.1.1 和 2.1.2 节，本文所提无功规划模型的求解流程如图 4 所示。

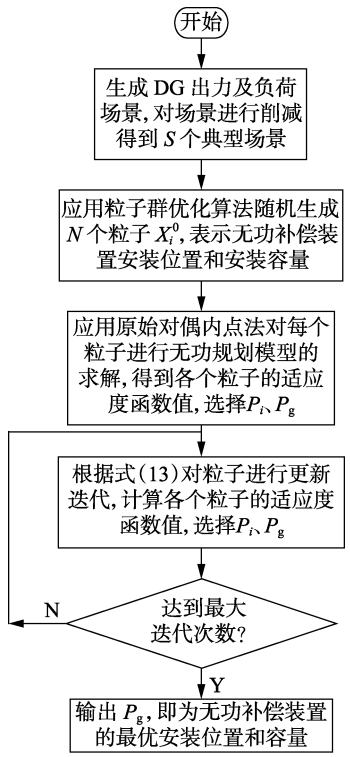

图 4　算法流程图

Fig.4　Flowchart of algorithm

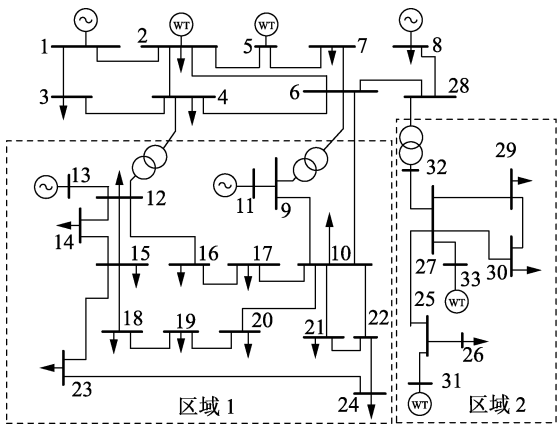

图 5　自定义 IEEE 33 节点系统

Fig.5　Modified IEEE 33-bus system

3　算例分析

3.1　算例概述

为了验证上述算法和无功规划模型的有效性，本文以如图 5 所示的自定义 IEEE 30 节点系统作为仿真系统。其中节点 2、5、31、33 分别接入 4 座风电场；节点 11、13 分别接入 2 座小水电。风电场 2、5 额定容量均为 50 MV·A，运行功率因数为 0.98；风电场 31、33 额定容量均为 20 MV·A，运行功率因数为 0.98；所有小水电额定容量均为 20 MV·A，运行功率因数为 0.85。风电场 2 和 5、风电场 31 和 33 出力相关性均为 0.4，小水电 11 和 13 之间相关性为 0.5。假设系统电压合格范围为 0.94~1.06 p.u.。

固定电容器、电抗器初始投资 $C_I=70$ 元/kvar，静止无功发生器(SVG)初始投资 $C_I=300$ 元/kvar。年运行维护费用 C_M 为初始投资的 6%，报废率 C_D 为初始投资的 2%；贴现率 $r=0.1$，可使用年限 $n=10$ a；DG 及负荷典型场景数 $S=50$；风电上网电价 $c_3=0.3$

元/(kW·h);在粒子群优化算法当中,粒子数为15,迭代次数为15,权重因子 $\omega=0.5$,学习因子 c_1 和 c_2 均为2。

3.3 考虑DG有功-无功调节能力的无功规划方案仿真

本节对4种无功规划模型进行算例仿真。Case 1为本文所提无功规划模型,即考虑极端高压场景由电网侧无功补偿装置、发电侧DG有功-无功综合调节;Case 2为极端高压场景由电网侧无功补偿装置、发电侧DG无功综合调节,DG有功不参与调节;Case 3为极端高压场景仅由发电侧DG有功-无功综合调节;Case 4为极端高压场景仅由电网侧无功补偿装置调节。4种无功规划模型的求解结果如表1所示,节点18—22、24为固定电容器安装节点;节点25、32为固定电抗器安装节点;节点30、31为SVG安装节点。

表1 4种无功规划模型结果

Table 1 Results of four reactive power planning models

安装节点	安装容量/Mvar			
	Case 1	Case 2	Case 3	Case 4
18	0	0	0	2
19	2	2	2	3
20	0	0	0	3
21	2	2	2	0
22	1	1	1	3
24	7	7	7	6
25	1	1	1	3
30	1	1	1	3
31	3	6	0	2
32	0	0	0	3
总容量/Mvar	17	20	14	28

由于Case 3中的极端高压场景仅由发电侧DG有功-无功综合调节,因此其所需无功补偿装置投资最少;Case 4中的极端高压场景不借助DG的协同调节作用,仅由无功补偿装置调节,则需要安装大量无功补偿装置以应对小概率极端电压场景,无功补偿装置投资最大;而Case 2中的极端高压场景由电网侧无功补偿装置、发电侧DG无功综合调节,其所需无功补偿装置投资次之;Case 1中的极端高压场景由电网侧无功补偿装置、发电侧DG有功-无功综合调节,其所需无功补偿装置投资排在第三位。

通过对比分析可知,Case 4需要安装大量无功补偿装置以满足最极端的场景,但这些场景在实际运行中出现概率极低,其余3种无功规划模型的总成本如表2所示。结合表3中Case 1和Case 3有功调节结果可知,Case 3中无功补偿装置投资费用最小,但是由于其需要进行DG有功调节的场景过多且所需调节值大,使得总成本最大,而Case 1尽管需要进行有功调节,但是其需要进行有功调节的场景少,调节值小;通过适当降低这些小概率场景下DG的有功出力,一方面可以提升其无功调节能力,另一方面可以缓解高压越限程度,极大地降低对无功补偿装置的容量需求,因而其有功调度成本明显小于节约的无功补偿装置投资费用,总体经济性最优。因此,采用本文中的无功规划模型可以显著地减少系统的支付总成本。

表2 3种无功规划模型的经济性比较

Table 2 Economic comparison among three reactive power planning models

	参数	Case 1	Case 2	Case 3
电网侧	无功补偿装置容量/Mvar	17	20	14
	无功补偿装置投资费用/万元	54.7	78.0	31.4
	节约投资百分比/%	29.9	—	59.7
发电厂	有功调节成本/万元	8.3	—	185.4
	电厂利润/万元	1 922.7	1 931.1	1 745.7
	损失利润百分比/%	0.43	—	9.6
总成本/万元		63.0	78.0	216.8

表3 Case 1和Case 3有功调节结果

Table 3 Active power regulation results of Case 1 and Case 3

场景	有功调节量/MW		
	Case 1	Case 2	Case 3
4	0	0	6.10
5	0	0	5.03
8	0.45	0	11.29
13	0	0	5.15
14	0	0	5.60
15	0	0	0.39
26	0	0	1.10
34	7.69	0	17.36

此外,以Case 2为标准模型,通过对表2中节约投资百分比和损失利润百分比分析可得:对于Case 1,发电厂商仅需损失0.43%的利润即可为电网侧节约29.9%的投资费用,因此,发电厂商作为利益受损的一方是可以接受此策略的;而在Case 3中,虽然电网侧可以节约59.7%的投资费用,但是发电厂商却需要损失9.6%的利润,因此,此模型对发电厂商是无法接受的。所以,在极端高压场景下考虑无功补偿装置、DG有功-无功综合调节,可以保证发电厂商在不损失过多利润的情况下最大限度地降低电网侧无功补偿装置的投资费用。

4 结论

本文基于DG及负荷的典型场景,建立了考虑DG有功-无功调节能力的无功规划模型。算例仿真结果验证了在极端高压场景下利用DG有功调节来调节电压的可行性,及基于该思路建立的无功规划模型的有效性。本文提出的无功规划模型不仅可以显著地降低电网侧无功补偿装置的投资,也可以极大地减小系统的支付总成本。

参考文献:

[1] 张沈习,程浩忠,邢海军,等. 配电网中考虑不确定性的分布式电源规划研究综述[J]. 电力自动化设备,2016,36(8):1-9.
ZHANG Shenxi,CHENG Haozhong,XING Haijun,et al. Review of DG planning considering uncertainties for distribution network[J]. Electric Power Automation Equipment,2016,36(8):1-9.

[2] 钱科军,袁越. 分布式发电技术及其对电力系统的影响[J]. 继电器,2007,35(13):25-29.
QIAN Kejun,YUAN Yue. Distributed generation technology and its impact on power systems[J]. Relay,2007,35(13):25-29.

[3] 江洁,王主丁,张宗益,等. 基于有效生成初始种群的配电网无功规划优化遗传算法[J]. 电网技术,2009,33(8):60-65.
WANG Jie,WANG Zhuding,ZHANG Zongyi,et al. Effective initial population generation based genetic algorithm for optimal capacitor placement in radial distribution networks[J]. Power System Technology,2009,33(8):60-65.

[4] 林少华,吴杰康,莫超,等. 基于二阶锥规划的含分布式电源配电网动态无功分区与优化方法[J].电网技术,2018,42(1):238-246.
LIN Shaohua,WU Jiekang,MO Chao,et al. Dynamic partition and optimization method for reactive power of distribution networks with distributed generation based on second-order cone programming[J]. Power System Technology,2018,42(1):238-246.

[5] 刘学平,刘天琪,李兴源. 含风电机组的配电网无功优化补偿[J]. 电力系统保护与控制,2010,38(20):130-135.
LIU Xueping,LIU Tianqi,LI Xingyuan. Optimal reactive power planning in distribution system with wind power generators[J]. Power System Protection and Control,2010,38(20):130-135.

[6] 刘沛津,谷立臣. 含风电场的电力系统无功规划优化[J]. 电网技术,2010,34(7):175-180.
LIU Peijin,GU Licheng. Optimization of reactive power planning for power system containing wind farms[J]. Power System Technology,2010,34(7):175-180.

[7] 谢俊,王璐,傅旭华,等. 考虑风电功率概率分布不确定性的含风电配电网无功规划方法[J]. 电力自动化设备,2016,36(6):40-47.
XIE Jun,WANG Lu,FU Xuhua,et al. Reactive power planning with consideration of wind power probability distribution uncertainty for distribution network[J]. Electric Power Automation Equipment,2016,36(6):40-47.

[8] 张沈习,程浩忠,张立波,等. 含风电机组的配电网多目标无功规划[J]. 电力系统保护与控制,2013,41(1):40-46.
ZHANG Shenxi,CHENG Haozhong,ZHANG Libo,et al. Multi-objective reactive power planning in distribution system incorporation with wind turbine generation[J]. Power System Protection and Control,2013,41(1):40-46.

[9] 杨素琴,罗念华,韩念杭. 分布式电源并网动态无功优化调度的研究[J]. 电力系统保护与控制,2013,41(17):122-126.
YANG Suqin,LUO Nianhua,HAN Nianhang. Study on dynamic reactive power optimization dispatching for a local power system[J]. Power System Protection and Control,2013,41(17):122-126.

[10] 郭康,徐玉琴,张丽,等. 计及光伏电站随机出力的配电网无功优化[J]. 电力系统保护与控制,2012,40(10):53-58.
GUO Kang,XU Yuqin,ZHANG Li,et al. Reactive power optimization of distribution network considering PV station random output[J]. Power System Protection and Control,2012,40(10):53-58.

[11] 吕清洁,王韶,刘庭磊. 含分布式发电的配电网有功-无功综合优化[J]. 电力系统保护与控制,2012,40(10):71-76,83.
LÜ Qingjie,WANG Shao,LIU Tinglei. Active/reactive power integrated optimization in distribution networks with distribution networks with distributed generation[J]. Power System Protection and Control,2012,40(10):71-76,83.

[12] 魏昊焜,刘健,高慧. 分布式电源的本地电压控制策略[J]. 电力自动化设备,2016,36(9):40-45.
WEI Haokun,LIU Jian,GAO Hui. Local voltage control of distributed generations[J]. Electric Power Automation Equipment,2016,36(9):40-45.

[13] 任佳依,顾伟,王勇,等. 基于模型预测控制的主动配电网多时间尺度有功无功协调调度[J]. 中国电机工程学报,2018,38(5):1397-1407.
REN Jiayi,GU Wei,WANG Yong,et al. Multi-time scale active and reactive power coordinated optimal dispatch in active distribution network based on model predictive control[J]. Proceedings of the CSEE,2018,38(5):1397-1407.

[14] 陈丽,张晋国,苏海锋. 考虑并网光伏电源出力时序特性的配电网无功规划[J]. 电工技术学报,2014,29(12):120-127.
CHEN Li,ZHANG Jinguo,SU Haifeng. Reactive power planning for distribution system with grid-connected photovoltaic system considering time-sequence characteristics[J]. Transactions of China Electrotechnical Society,2014,29(12):120-127.

[15] 马溪原. 含风电电力系统的场景分析方法及其在随机优化中的应用[D]. 武汉:武汉大学,2014.
MA Xiyuan. Scenario analysis and stochastic programming of wind-integrated power system[D]. Wuhan:Wuhan University,2014.

[16] 周辛南,柯德平,孙元章. 基于配电网静态电压质量机会性约束的可再生能源分布式发电容量规划[J]. 电力自动化设备,2015,35(9):143-149.
ZHOU Xinnan,KE Deping,SUN Yuanzhang. DG planning based on chance constraint of distribution network static voltage quality for renewable energies[J]. Electric Power Automation Equipment,2015,35(9):143-149.

[17] 陈丽,侯晨伟,张晋国. 基于全寿命周期成本的配电网多阶段无功规划[J]. 河北大学学报(自然科学版),2015,35(3):316-323.
CHEN Li,HOU Chenwei,ZHANG Jinguo. Multi-stage reactive power planning based on life cycle cost for distribution network[J]. Journal of Hebei University(Natural Science Edition),2015,35(3):316-323.

[18] KENNEDY J,EBERHART R. Particles warm optimization[C]// Proceedings of ICNN'95-International Conference on Neural Networks. Perth,Australia:IEEE,1995:1942-1948.

[19] 单明,周步祥,张彦军,等. 基于原-对偶内点法的无功优化不可行问题研究[J]. 电网技术,2006,30(增刊2):181-184.
SHAN Ming,ZHOU Buxiang,ZHANG Yanjun,et al. Infeasibility study of reactive power optimization based on primal dual interior point mathod[J]. Power System Technology,2006,30(Supplyment 2):181-184.

作者简介:

沈阳武

沈阳武(1985—),男,湖北咸宁人,高级工程师,博士,研究方向为新能源并网控制、电力系统稳定分析(**E-mail**:shenyangwu@126.com);

熊尚峰(1977—),男,湖南长沙人,高级工程师,硕士,主要研究方向为新能源和

电力系统自动化(**E-mail**:xiongsf@163.com);

沈非凡(1994—),男,湖北咸宁人,博士研究生,主要研究方向为电力系统稳定控制与经济运行(**E-mail**:shenfeifan@whu.edu.cn)。

Reactive power planning of distribution network based on active-reactive power adjustment capability of distributed generation

SHEN Yangwu[1],XIONG Shangfeng[1],SHEN Feifan[2],LIANG Liqing[1],ZHANG Chen[2],ZHANG Xi[2],KE Deping[2]

(1. State Grid Hunan Electric Power Company Limited Research Institute,Changsha 410007,China;
2. School of Electrical Engineering,Wuhan University,Wuhan 430072,China)

Abstract:The traditional reactive power planning methods often require the distribution network to invest a large quantity of reactive power compensation devices when dealing with small probability extreme voltage scenes. Therefore,a reactive power planning model of distribution network is proposed based on the scenes of distributed generation and load,which fully uses the active-reactive power adjustment capability of distributed generation,makes the active power adjustment capability of distribution generation as an additional voltage adjustment measure under small probability extreme voltage scenes,and takes the minimum sum of investment cost of reactive power compensation devices and the active power adjustment cost of distributed generation as the objective to reduce the total payment of power system. A particle swarm optimization algorithm embedded with the original dual interior point method is proposed to solve the model. The simulation analysis of self-defined IEEE 30-bus system verifies the economy of the proposed model and the effectiveness of the proposed algorithm.

Key words:distribution network;reactive power planning;distributed power generation;voltage adjustment with active power;small probability event;scene

(上接第38页 continued from page 38)

王 瀚(1993—),男,辽宁大连人,硕士研究生,主要研究方向为储能装置优化配置(**E-mail**:wanghan_ee@tju.edu.cn);

舒 欣(1983—),男,湖北钟祥人,博士,主要研究方向为电力系统运行与分析、新能源并网运行分析(**E-mail**:15997411312@163.com)。

Optimal planning method for regional multi-microgrid system with high renewable energy penetration

WANG Shouxiang[1],ZHANG Qi[1],WANG Han[1],SHU Xin[2]

(1. Key Laboratory of Smart Grid of Ministry of Education,Tianjin University,Tianjin 300072,China;
2. State Grid Hubei Electric Power Company,Wuhan 430077,China)

Abstract:Considering the fact that nearby microgrids can potentially support each other,a RMMS(Regional Multi-Microgrid System) is built,and an optimal allocation of DGs(Distributed Generators) and energy storages in RMMS is presented,which may contribute to an improved RMMS economic performance. An optimal planning method for RMMS with high renewable energy penetration is proposed,which maximizes the annual total profits and employs the immune genetic algorithm to obtain an optimal configuration of DGs and energy storages with the consideration of the requirements from RMMS renewable energy penetration and mutual power support between microgrids. The IEEE 33-node system is taken as an example to obtain the annual total profits of each microgrid and RMMS with several penetration levels of renewable energy sources. Test results verify that the establishment of RMMS provides additional economic benefits of these microgrids. Moreover,it also proves that the configuration of various types of DGs improves the economic performance of these microgrids compared with the systems with single type of DGs.

Key words:high renewable energy penetration;regional multi-microgrid system;distributed power generation;energy storages;immune genetic algorithm;optimal planning