

新能源配电网多运行指标协同的灵敏性分析方法

张庆晖¹ 吴长元^{2,3} 吴杰康² 吴帆⁴ 唐惠玲² 陈灵敏²

(1. 广东省城乡规划设计研究院, 广东 广州 510290; 2. 广东工业大学自动化学院, 广东 广州 510006;
3. 广东电网有限责任公司韶关供电局, 广东 韶关 512028;
4. 广西博阳电力勘察设计有限公司, 广西 南宁 530028)

摘要: 配电网电压和网损指标协同控制一直受到高度重视。在新能源环境下, 配电网电压和网损指标协同控制的难度更大并更具挑战性。根据配电网中各个物理量之间的变化关系与交互作用特性, 将物理量分为独立参数变量、状态变量和控制变量3种类型, 建立配电网在新能源环境下电压和网损运行指标, 构建针对分布式电源和传统无功补偿装置的配电网潮流分布、节点电压和网损的灵敏度矩阵。以局部电压稳定指标作为分布式电源接入电网后电压和无功分布的技术指标, 以分布式电源的投资和运行维护成本作为经济指标, 分析分布式电源大规模接入电网后对电压和网损造成的影响。以IEEE 30系统为实例, 通过仿真计算对所建的模型和算法进行了验证。

关键词: 配电网; 新能源; 多运行指标协同; 分布式电源; 无功补偿装置

中图分类号: TM73 文献标志码: A 文章编号: 1003-6954(2019)05-0024-05

DOI:10.16527/j.cnki.cn51-1315/tm.2019.05.005

Sensitivity Analysis Method for Multiple Operational Index Coordination of Distribution Network with Renewable Energy

Zhang Qinghui¹, Wu Changyuan^{2,3}, Wu Jiekang², Wu Fan⁴, Tang Huiling², Chen Lingmin²

(1. Guangdong Institute of Urban and Rural Planning and Design, Guangzhou 510290, Guangdong, China;
2. School of Automation, Guangdong University of Technology, Guangzhou 510006, Guangdong, China;
3. Shaoguan Power Supply Bureau, Guangdong Power Grid Corporation, Shaoguan 512028, Guangdong, China;
4. Guangxi Bo Yang Electric Power Survey and Design Co., Ltd., Nanning 530028, Guangxi, China)

Abstract: Collaborative control of voltage and loss indices in distribution network has always been an important work and has been highly valued. In the renewable energy environment, the coordinated control of voltage and loss index in distribution network is more difficult and challenging. According to the changing relationship and interaction characteristics of each physical quantity in distribution network, physical quantity are divided into three types: independent parameter variable, state variable and control variable, voltage and loss operation index of distribution network under new energy environment is established, and the sensitivity matrix for power flow distribution, node voltage and loss of distribution network is constructed for distributed generation and traditional reactive power compensation devices. Taking the local voltage stability index as the technical index, and the investment and operation and maintenance cost of the distributed generation as the economic index, the impact of large-scale distributed generation on the voltage and power loss is analyzed. The simulation results of an example of the IEEE 30 system verify the applicability and feasibility of the proposed method.

Key words: distribution network; renewable energy; multiple operational index collaboration; distributed generation; reactive power compensation device

0 引言

电压和网损是电力系统运行指标, 电压质量水

平的高低直接反映电网的无功平衡, 网损的大小直接反映电力系统节能降耗水平。无功控制和优化的结果影响电力系统无功功率的平衡, 进而影响电压质量水平和网损。

对于无功优化问题, 国内外许多专家学者近几十年来进行了大量的研究工作, 取得了丰富的研究

基金项目: 国家自然科学基金项目(51567002, 50767001); 广东省公益研究与能力建设专项资金项目(2014A010106026); 广东自然科学基金项目(S2013010012431, 2014A030313509)

成果,比如线性规划方法^[1-3]、非线性规划方法^[4-5]、混合整数规划方法^[6-8]、动态规划方法^[9-11]。线性规划方法通过对优化模型和离散变量进行了线性化和连续化处理,往往导致计算结果与实际值误差较大。非线性规划方法模型直观、精度较高,但计算量较大。混合整数规划方法是一种两步优化方法,问题模型维数增加容易削弱整体最优性,大大增加了计算时间。动态规划方法的数学模型很难与实际问题相匹配,并且随着状态变量数目的增加,动态规划方法的数学模型也变得越来越复杂。

人工智能算法是在一些直观研究的基础上建立起来的一种算法。近年来,由于智能算法能够较好地处理离散变量和非线性问题,因此受到自然有效类比的启发,在电力系统无功优化领域得到了广泛的应用。典型的算法主要有神经网络算法^[12]、粒子群优化^[13-14]、遗传算法^[15-17]、模拟退火算法^[18-20]。人工智能算法不需要限制性假设来搜索空间。它随机产生初始种群,并根据概率转移原理,采用适当的启发式方法搜索最优解。该算法具有全局优化能力,弥补了传统数学规划方法的不足。对于不同的人工智能算法,由于不同的优化算法和策略,它们具有不同的优化特性。在深入研究每一种人工智能算法的独特优化特性的基础上,通常采用不同算法组合而成的混合智能算法。

下面针对分布式电源接入对配电网电压和网损的影响,通过建立配电网在新能源环境下电压和网损运行指标,构建针对分布式电源和传统无功补偿装置的配电网潮流分布、节点电压和网损的灵敏度矩阵,分析分布式电源大规模接入电网后对电压和网损造成的影响^[21]。

1 灵敏度分析方法

1.1 灵敏性指标

在电力系统分析时,通过灵敏度分析方法,分析物理系统中影响电压、网损的变量变化态势和互动、制约关系,进而分析电压和网损对这些变量的敏感程度。按照控制理论,从电压和网损控制的角度看,有控制变量、状态变量和输出变量3种变量。电源有功功率和无功功率、负荷有功功率和无功功率等影响电网的电压和网损,这些控制变量在不同运行

方式下总会有微小或大幅的变化,从而导致电网一些相关的状态变量和输出变量也发生微小或大幅的变化。利用灵敏度分析的方法,构建电压和网损对于电源及负荷的有功功率和无功功率等变化的灵敏度指标,通过在不同运行方式下对这些灵敏度指标的计算,可以确定电压和网损的变化情况^[21-24]。

假设,线路电导、电纳分别为 G 、 B ,节点电压的幅值、相角分别为 V_i 、 θ_i ,发电机机端电压的幅值、相角分别为 V_G 、 θ_G ,平衡节点电压的幅值、相角分别为 V_S 、 θ_S ,传统发电机组有功和无功功率分别为 P_G 、 Q_G ,分布式电源有功和无功功率分别为 P_{DG} 、 Q_{DG} ,并联电容器无功功率为 Q_C 。那么, $\frac{dV_i}{dP_D}$ 和 $\frac{dV_i}{dQ_D}$ 是节点电压对于负荷变化的灵敏度指标, $\frac{dQ_G}{dP_D}$ 和 $\frac{dQ_G}{dQ_D}$ 是发电机无功功率对于负荷功率变化的灵敏度指标, $\frac{dP_{loss}}{dP_D}$ 和 $\frac{dP_{loss}}{dQ_D}$ 是网络损耗对于负荷功率变化的灵敏度指标; $\frac{dP_{loss}}{dP_G}$ 和 $\frac{dP_{loss}}{dQ_G}$ 或 $\frac{dP_{loss}}{dP_{DG}}$ 和 $\frac{dP_{loss}}{dQ_{DG}}$ 是网络损耗对于发电机组出力或分布式电源出力变化的灵敏度指标等^[21-33]。

1.2 灵敏度矩阵

电力系统在某一运行条件下可由 n 个非线性网络方程表示,其紧凑形式可表示为

$$f(x, \mu) = 0 \tag{1}$$

式中: x 为状态变量; μ 为控制变量。当系统处于稳态运行状态时,式(1)可变为

$$f(x_0, \mu_0) = 0 \tag{2}$$

式中 x_0 和 μ_0 分别为系统稳态运行时的状态变量和控制变量。当系统运行状态变化后,系统稳态平衡方程变为

$$f(x_0 + \Delta x, \mu_0 + \Delta \mu) = 0 \tag{3}$$

式中 Δx 和 $\Delta \mu$ 分别为系统运行状态变化后,状态变量和控制变量的偏差。

利用泰勒级数分析方法,在点 x_0 和 μ_0 处展开式(3),得

$$f(x_0, \mu_0) + \frac{\partial f}{\partial x} \Delta x + \frac{\partial f}{\partial \mu} \Delta \mu = 0 \tag{4}$$

从而得到针对状态变量和控制变量的灵敏度方程^[22-33]:

$$\frac{\partial f}{\partial x} \Delta x + \frac{\partial f}{\partial u} \Delta u = 0 \quad (5)$$

$\frac{\partial f}{\partial x}$ 反映函数或变量对状态变量的灵敏度关系，

$\frac{\partial f}{\partial u}$ 反映函数或变量对控制变量的灵敏度关系，从而

可以构造控制、状态变量与雅可比矩阵 $\frac{\partial f}{\partial x}$ 和 $\frac{\partial f}{\partial u}$ 的线性关系^[22-33]为

$$\Delta x = - \left(\frac{\partial f}{\partial x} \right)^{-1} \frac{\partial f}{\partial u} \Delta u = S \Delta u \quad (6)$$

$$S = - \left(\frac{\partial f}{\partial x} \right)^{-1} \frac{\partial f}{\partial u} \quad (7)$$

式中 S 即为灵敏度矩阵。

1.3 潮流的灵敏度矩阵

计及分布式电源的节点功率方程为

$$\Delta P_i = P_{Gi} + P_{DG_i} - P_{Di} - V_i \sum_{j=1}^n V_j (G_{ij} \cos \theta_{ij} + B_{ij} \sin \theta_{ij}) = 0 \quad (8)$$

$$\Delta Q_i = Q_{Gi} + Q_{DG_i} + Q_{Ci} - Q_{Di} - V_i \sum_{j=1}^n V_j (G_{ij} \sin \theta_{ij} - B_{ij} \cos \theta_{ij}) = 0 \quad (9)$$

式中: P_i 和 Q_i 、 P_{Gi} 和 Q_{Gi} 、 P_{DG_i} 和 Q_{DG_i} 、 P_{Di} 和 Q_{Di} 分别为节点 i 注入的有功功率与无功功率、传统发电机组的有功功率与无功出力、分布式电源输出的有功功率与无功功率、负荷的有功功率与无功功率; Q_{Ci} 为节点 i 并联电容器输出的无功功率; V_i 、 V_j 、 θ_{ij} 分别为电网节点 i 、 j 电压大小及两个节点之间电压的相位差; G_{ij} 和 B_{ij} 为电网支路 ij 的电导和电纳。

设 p 为扰动变量 则扰动变量、控制变量以及状态变量可表示为: $p_i = [P_{Di} \ Q_{Di}]^T$ 、 $u_i = [P_{Gi} \ Q_{Gi}]^T$ 、 $x_i = [\theta_i \ V_i]^T$ 。因此 假设雅可比矩阵为 J_x 潮流的灵敏度方程^[22-33]可表示为

$$J_x \Delta x + J_u \Delta u + J_p \Delta p = 0 \quad (10)$$

$$\text{式中: } J_{x(i,j)} = \begin{bmatrix} \frac{\partial \Delta P_i}{\partial \theta_i} & \frac{\partial \Delta P_i}{\partial V_j} \\ \frac{\partial \Delta Q_i}{\partial \theta_j} & \frac{\partial \Delta Q_i}{\partial V_j} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} H_{ij} & N_{ij} \\ K_{ij} & L_{ij} \end{bmatrix};$$

$$J_{u(i,j)} = \begin{bmatrix} \frac{\partial \Delta P_i}{\partial P_{Gj}} & \frac{\partial \Delta P_i}{\partial Q_{Gj}} \\ \frac{\partial \Delta Q_i}{\partial P_{Gj}} & \frac{\partial \Delta Q_i}{\partial Q_{Gj}} \end{bmatrix};$$

$$J_{p(i,j)} = \begin{bmatrix} \frac{\partial \Delta P_i}{\partial P_{Dj}} & \frac{\partial \Delta P_i}{\partial Q_{Dj}} \\ \frac{\partial \Delta Q_i}{\partial P_{Dj}} & \frac{\partial \Delta Q_i}{\partial Q_{Dj}} \end{bmatrix}。$$

由式(9)可得状态变量的偏移量:

$$\Delta x = J_x^{-1} (J_u \Delta u + J_p \Delta p) = S_{xu} \Delta u + S_{xp} \Delta p \quad (11)$$

式中: S_{xu} 为状态变量 $x_i = [\theta_i \ V_i]^T$ 随着控制变量 $u_i = [P_{Gi} \ Q_{Gi}]^T$ 的变化而发生响应的矩阵; S_{xp} 为状态变量 $x_i = [\theta_i \ V_i]^T$ 随着系统中负荷的扰动 $p_i = [P_{Di} \ Q_{Di}]^T$ 变化程度的矩阵。

1.4 节点电压灵敏度矩阵

考虑分布式电源及无功补偿装置 节点注入功率表达式为

$$P_i = P_{Gi} + P_{DG_i} - P_{Di} = V_i \sum_{j=1}^n V_j (G_{ij} \cos \theta_{ij} + B_{ij} \sin \theta_{ij}) \quad (12)$$

$$Q_i = Q_{Gi} + Q_{DG_i} + Q_{Ci} - Q_{Di} = V_i \sum_{j=1}^n V_j (G_{ij} \sin \theta_{ij} - B_{ij} \cos \theta_{ij}) \quad (13)$$

节点电压对节点负荷有功功率的灵敏度矩阵^[22-33]可表示为

$$S_{V_i P_{Di}} = \left[\frac{\partial V_i}{\partial P_{Di}} \right] = \left[\frac{\partial P_{Di}}{\partial V_i} \right]^{-1} \quad (14)$$

节点电压对节点负荷无功功率的灵敏度矩阵^[22-33]可表示为

$$S_{V_i Q_{Di}} = \left[\frac{\partial V_i}{\partial Q_{Di}} \right] = \left[\frac{\partial Q_{Di}}{\partial V_i} \right]^{-1} \quad (15)$$

节点电压对节点分布式电源有功出力的灵敏度矩阵^[22-33]可表示为

$$S_{V_i P_{DG_i}} = \left[\frac{\partial V_i}{\partial P_{DG_i}} \right] = \left[\frac{\partial P_{DG_i}}{\partial V_i} \right]^{-1} \quad (16)$$

节点电压对节点分布式电源无功出力的灵敏度矩阵^[22-33]可表示为

$$S_{V_i Q_{DG_i}} = \left[\frac{\partial V_i}{\partial Q_{DG_i}} \right] = \left[\frac{\partial Q_{DG_i}}{\partial V_i} \right]^{-1} \quad (17)$$

节点电压对节点无功补偿无功功率的灵敏度矩阵^[22-33]可表示为

$$S_{V_i Q_{Ci}} = \left[\frac{\partial V_i}{\partial Q_{Ci}} \right] = \left[\frac{\partial Q_{Ci}}{\partial V_i} \right]^{-1} \quad (18)$$

1.5 网损灵敏度矩阵

系统有功网损可表示为

$$P_{\text{loss}} = \sum_{i=1}^n \sum_{j \in i} G_{ij} (k_{ij}^2 V_i^2 + V_j^2 - 2k_{ij} V_i V_j \cos \theta_{ij}) \quad (19)$$

式中 k_{ij} 为节点 i 和节点 j 间支路变压器变比 若该支路无变压器 则 $k_{ij} = 1$ 。

系统网损对无功补偿的灵敏度矩阵^[22-33]可表示为

$$S_{P_{\text{loss}}Q_{Ci}} = \begin{bmatrix} \frac{\partial P_{\text{loss}}}{\partial Q_{Ci}} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\partial P_{\text{loss}}}{\partial \theta_i} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \frac{\partial Q_{Ci}}{\partial \theta_i} \end{bmatrix}^{-1} + \begin{bmatrix} \frac{\partial P_{\text{loss}}}{\partial V_i} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \frac{\partial Q_{Ci}}{\partial V_i} \end{bmatrix}^{-1} \quad (20)$$

系统网损对节点分布式电源有功出力的灵敏度矩阵^[22-33]可表示为

$$S_{P_{\text{loss}}P_{DGi}} = \begin{bmatrix} \frac{\partial P_{\text{loss}}}{\partial P_{DGi}} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\partial P_{\text{loss}}}{\partial \theta_i} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \frac{\partial P_{DGi}}{\partial \theta_i} \end{bmatrix}^{-1} + \begin{bmatrix} \frac{\partial P_{\text{loss}}}{\partial V_i} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \frac{\partial P_{DGi}}{\partial V_i} \end{bmatrix}^{-1} \quad (21)$$

系统网损对节点分布式电源无功出力的灵敏度矩阵^[22-33]可表示为

$$S_{P_{\text{loss}}Q_{DGi}} = \begin{bmatrix} \frac{\partial P_{\text{loss}}}{\partial Q_{DGi}} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\partial P_{\text{loss}}}{\partial \theta_i} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \frac{\partial Q_{DGi}}{\partial \theta_i} \end{bmatrix}^{-1} + \begin{bmatrix} \frac{\partial P_{\text{loss}}}{\partial V_i} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \frac{\partial Q_{DGi}}{\partial V_i} \end{bmatrix}^{-1} \quad (22)$$

系统网损对节点注入有功功率 P_i 和无功功率 Q_i 的灵敏度矩阵^[22-33]可表示为

$$S_{P_{\text{loss}}P_i} = \begin{bmatrix} \frac{\partial P_{\text{loss}}}{\partial P_i} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\partial P_{\text{loss}}}{\partial \theta_i} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \frac{\partial P_i}{\partial \theta_i} \end{bmatrix}^{-1} + \begin{bmatrix} \frac{\partial P_{\text{loss}}}{\partial V_i} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \frac{\partial P_i}{\partial V_i} \end{bmatrix}^{-1} \quad (23)$$

$$S_{P_{\text{loss}}Q_i} = \begin{bmatrix} \frac{\partial P_{\text{loss}}}{\partial Q_i} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\partial P_{\text{loss}}}{\partial \theta_i} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \frac{\partial Q_i}{\partial \theta_i} \end{bmatrix}^{-1} + \begin{bmatrix} \frac{\partial P_{\text{loss}}}{\partial V_i} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \frac{\partial Q_i}{\partial V_i} \end{bmatrix}^{-1} \quad (24)$$

式(23)和式(24)可写成如下形式:

$$\begin{bmatrix} S_{P_{\text{loss}}P_i} \\ S_{P_{\text{loss}}Q_i} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\partial P_{\text{loss}}}{\partial P_i} \\ \frac{\partial P_{\text{loss}}}{\partial Q_i} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\partial \theta_i}{\partial P_i} & \frac{\partial V_i}{\partial P_i} \cdot \frac{1}{V_i} \\ \frac{\partial \theta_i}{\partial Q_i} & \frac{\partial V_i}{\partial Q_i} \cdot \frac{1}{V_i} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \frac{\partial P_{\text{loss}}}{\partial \theta_i} \\ \frac{\partial P_{\text{loss}}}{\partial V_i} \cdot V_i \end{bmatrix} = [J^T]^{-1} \begin{bmatrix} \frac{\partial P_{\text{loss}}}{\partial \theta_i} \\ \frac{\partial P_{\text{loss}}}{\partial V_i} \cdot V_i \end{bmatrix} \quad (25)$$

$$\frac{\partial P_{\text{loss}}}{\partial \theta_i} = -2V_i \sum_{j=1}^N V_j G_{ij} \cos \theta_{ij} \quad (26)$$

$$\frac{\partial P_{\text{loss}}}{\partial V_i} V_i = 2V_i \sum_{j=1}^N V_j G_{ij} \cos \theta_{ij} \quad (27)$$

式中 J 为牛顿-拉夫逊潮流计算的雅克比矩阵。

2 实例计算与分析

以图 1 所示的 IEEE 30 系统为例,分析分布式

电源接入电网后对节点电压和网损的影响。考虑 DG 有功出力分别为 20 MW、40 MW 和 60 MW 接入节点 15 对系统节点电压的影响如图 2 所示,对节点电压偏差的影响如图 3 所示。由图 2 和图 3 可看出,接入分布式电源后,对节点电压的提升作用随着 DG 出力的增大而增大,而且对接入节点的电压提升作用更明显。

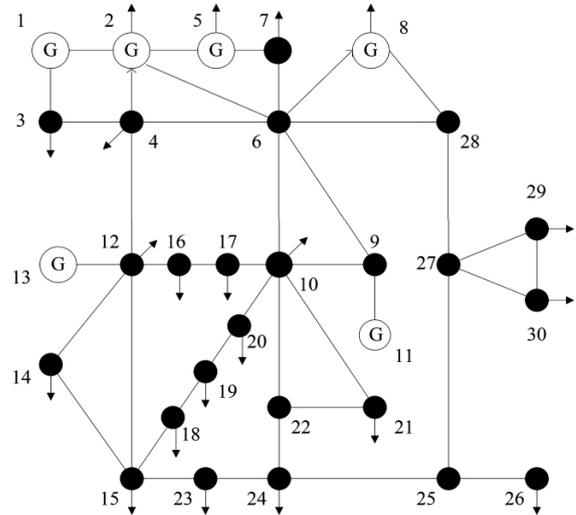


图 1 IEEE 30 配电系统

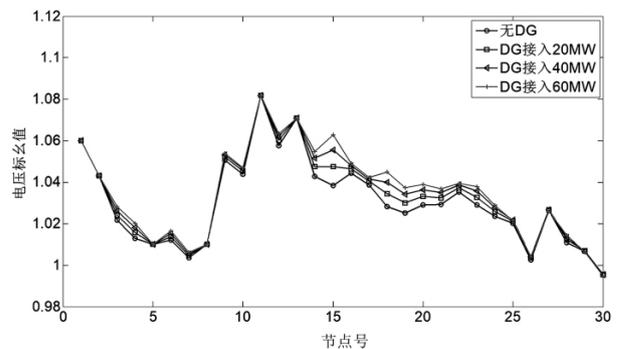


图 2 分布式电源出力对节点电压的影响

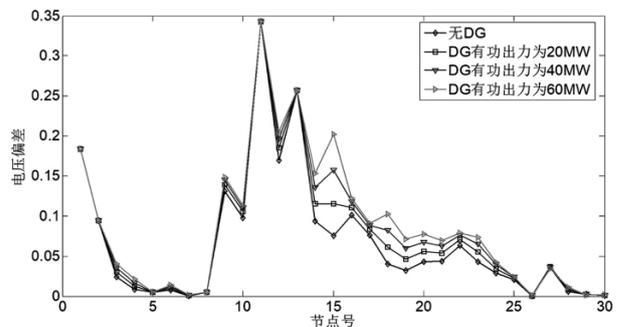


图 3 分布式电源出力对节点电压偏移的影响

分布式电源接入电网后对支路有功网损的影响如图 4 所示。随着 DG 出力的增加部分支路的有功网损降低,如支路 1、2、3、4 等;部分支路有功网损增

加,如支路22和支路30。分布式电源接入电网后可能增大也可能减小系统网损,这取决于分布式电源接入的位置、其与负荷量的相对大小以及网络的拓扑结构等因素。因此,分布式电源接入电网前必须要根据系统结构和负荷情况,确定最佳接入位置和接入容量。

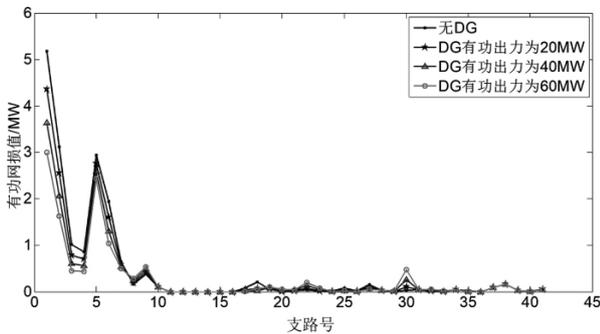


图4 分布式电源出力对网损的影响

3 结论

前面建立了配电网在新能源环境下电压和网损运行指标,构建针对分布式电源和传统无功补偿装置的配电网潮流分布、节点电压和网损的灵敏度矩阵,分析分布式电源大规模接入电网后对电压和网损造成的影响。通过实例仿真计算,结果表明:

1) 配电网电压和网损等指标随着运行方式而变化,在新能源环境下这种变化更具复杂性和不确定性。因此,电压和网损等运行指标协同需要针对不同的配网拓扑结构,并考虑技术和经济的目标要求。受不同的技术和经济指标的制约,电压和网损等指标受到极大的影响。

2) 配电网电压在传统无功补偿装置输出无功功率和分布式电源输出有功和无功功率的共同作用下具有较大的灵敏性。要保证电压合格率,需要在不同负荷需求水平下对传统无功补偿装置输出无功功率和分布式电源输出有功和无功功率进行动态协同。

3) 在新能源环境下,配电网网损对分布式电源接入位置及有功和无功功率具有较大的灵敏性,分布式电源接入的位置可能增大也可能减小系统网损。

参考文献

[1] 刘明波,陈学军,程劲晖. 三种无功优化线性规划建模方法的比较[J]. 电力系统及其自动化学报,1999,11(2):33-38.

[2] Farivar M, Neal R, Clarke C, et al. Optimal Inverter VAR Control in Distribution Systems With high PV Penetration [C]//2012 IEEE Power and Energy Society General Meeting. San Diego, USA: 2012: 1-7.

[3] Xu Y, Dong Z Y, Wong K P, et al. Optimal Capacitor Placement to Distribution Transformers for Power Loss Reduction in Radial Distribution Systems [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2013, 28(4): 4072-4079.

[4] 柳进,常修猛,柳焯. 内点法在偶对潮流优化中的应用[J]. 电力系统自动化, 2007, 31(5): 29-33.

[5] 刘明波,程莹,林声宏. 求解无功优化的内点线性和内点非线性规划方法比较[J]. 电力系统自动化, 2002, 1(1): 22-26.

[6] 汪隆君,郭俊宏,王钢,等. 主动配电网孤岛划分的混合整数规划模型[J]. 电工技术学报, 2016, 31(15): 136-146.

[7] 赵晋泉,刘绪,林昌年,等. 单相光伏大量接入的三相不平衡配电网无功优化[J]. 电力系统自动化, 2016, 40(13): 13-18.

[8] 孙田,邵鹏,杨知方,等. 动态无功优化的多阶段求解方法[J]. 电网技术, 2016, 40(6): 1804-1810.

[9] 郑爱霞,陈星莺,余昆,等. 基于关联矩阵和动态规划法的地区电网无功优化[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(6): 128-134.

[10] 黄伟,戎荣. 动态规划法在供电系统无功优化中的应用[J]. 广东电力, 2010, 23(10): 14-17.

[11] 张鹏,刘玉田. 配电系统电压控制和无功优化的简化动态规划法[J]. 电力系统及其自动化学报, 1999, 11(4): 49-53.

[12] Dai C H, Chen W R, Zhu Y F, et al. Seeker Optimization Algorithm for Optimal Reactive Power Dispatch [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2009, 24(3): 1218-1231.

[13] 岑文辉,李国有,孔慧. 应用人工神经网络进行无功/电压控制[J]. 中国电机工程学报, 1992, 12(3): 62-67.

[14] 李娟,杨琳,刘金龙,等. 基于自适应混沌粒子群优化算法的多目标无功优化[J]. 电力系统保护与控制, 2011, 39(9): 26-31.

[15] 赵波,郭创新,张鹏翔,等. 基于分布式协同粒子群优化算法的电力系统无功优化[J]. 中国电机工程学报, 2005, 25(21): 4-10.

[16] 蒋平,梁乐. 基于内点法和遗传算法相结合的交直流系统无功优化[J]. 高电压技术, 2015, 41(3): 724-729.

[17] 崔挺,孙元章,徐箭,等. 基于改进小生境遗传算法的电力系统无功优化[J]. 中国电机工程学报, 2011, 31(19): 43-50.

(下转第36页)

2016 37(8):134-140.

[9] 付菊霞,陈洁,滕扬新,等.基于集合经验模态分解的风电混合储能系统能量管理协调控制策略[J/OL]. 电工技术学报:1-8 [2019-03-29]. <https://doi.org/10.19595/j.cnki.1000-6753.tces.181729>.

[10] 韩晓娟,陈跃燕,张浩,等.基于小波包分解的混合储能技术在平抑风电场功率波动中的应用[J]. 中国电机工程学报 2013 33(19):8-13.

[11] 卢芸,徐骏.基于小波包分解的风电混合储能容量配置方法[J]. 电力系统保护与控制 2016 44(11):149-154.

[12] Yujie Wang, Zhendong Sun, Zonghai Chen. Development of Energy Management System Based on a Rule-based Power Distribution Strategy for Hybrid Power Sources [J/OL]. Energy (2019). <https://doi.org/10.1016/j.energy.2019.03.155>.

[13] 吴冠男,张明理,徐建源,等.考虑抗扰性能的风电混合储能系统协调控制策略研究[J]. 电力系统保护与控制 2017 45(22):164-169.

[14] 雷勇,林晓冬.超导磁储能-蓄电池混合储能系统在平抑风电场功率波动中的应用[J]. 高电压技术, 2019 45(3):983-992.

[15] Xiyun Yang, Hong Yue, Jie Ren. Fuzzy Empirical Mode Decomposition for Smoothing Wind Power with Battery Energy Storage System [J]. IFAC Papers OnLine 2017, 50(1):8769-8774.

[16] 何正友,钱清泉.电力系统暂态信号分析中小波基的选择原则[J]. 电力系统自动化 2003 27(10):45-48.

[17] Chen H, Cong T N, Yang W et al. Progress in Electrical Energy Storage System: A Critical Review [J]. Progress in Natural Science 2009, 19(3):291-312.

作者简介:

詹仲强(1987) 硕士研究生,主要从事新能源并网技术研究;

付菊霞(1993) 在读硕士研究生,研究方向为清洁能源发电、储能技术。

(收稿日期:2019-04-08)

(上接第 28 页)

[18] 黄俊辉,汪惟源,王海潜,等.基于模拟退火遗传算法的交直流系统无功优化与电压控制研究[J]. 电力系统保护与控制 2016 44(10):37-43.

[19] 刘科研,盛万兴,李运华.基于改进遗传模拟退火算法的无功优化[J]. 电网技术 2007 31(3):13-18.

[20] 蔡昌春,丁晓群,王斌.混沌模拟退火算法在无功优化中的应用[J]. 高电压技术 2008 34(3):578-582.

[21] 郭清元,吴杰康,莫超,等.基于混合整数二阶锥规划的新能源配电网电压无功协同优化模型[J]. 中国电机工程学报 2017 38(5):1385-1396.

[22] 陈曦.基于灵敏度方法的电网安全校正策略研究[D]. 北京:华北电力大学 2010.

[23] 段献忠,袁骏,何仰赞,等.电力系统电压稳定灵敏度分析方法[J]. 电力系统自动化,1997 21(4):9-12.

[24] 袁骏,段献忠,何仰赞,等.电力系统电压稳定灵敏度分析方法综述[J]. 电网技术,1997 21(9):7-10.

[25] 陈曦,任建文,杨玉坤,等.基于灵敏度方法的电压越限分析[J]. 陕西电力 2010 21(9):77-80.

[26] 蒋贤强,徐青山.考虑需求响应的交直流配网调度研究[J]. 电力需求侧管理 2019 21(2):19-23.

[27] 白晓燕,苏毅,成煜.基于仿射特性的约束灵敏度分析及应用综述[J]. 电网与清洁能源 2014 30(8):20-26.

[28] 王晓丰.基于模糊机会约束模型的负荷恢复过程中风场有功出力调度[J]. 自动化应用 2019(2):94-98.

[29] 张云菊,何晔,李秀萍,等.基于数据挖掘的电压无功灵敏度分析及应用[J]. 自动化与仪器仪表,2018(5):211-214.

[30] 赵兴迪.基于量测数据的配电网线损计算方法[J]. 电工技术 2018(12):7-9.

[31] 李国武,李艳琼,刘娇扬,等.考虑集群划分的分布式储能容量规划方法[J]. 电力系统及其自动化学报,2018 30(12):1-10.

[32] 李晏君,张章煌,陈玮,等.兼顾抗毁度的含风电配电网多目标重构[J]. 电力系统保护与控制 2019 47(4):1-8.

[33] 孟波,孟现岭,靳玉凯,等.灵敏度分析法在静态电压稳定中的应用[J]. 技术与市场 2014 47(4):1-8.

作者简介:

张庆晖(1969) 高级工程师,研究方向为电力系统规划等;
吴长元(1991) 硕士研究生,研究方向为电力系统运行与控制等;

吴杰康(1965) 教授,博士生导师,研究方向为电力系统运行与控制、智能电网等;

吴帆(1990) 助理工程师,研究方向为电力系统运行与控制等;

唐惠玲(1975) 副教授,研究方向为电力系统运行与控制等;

陈灵敏(1981) 讲师,研究方向为电力系统运行与控制等。

(收稿日期:2019-06-05)