

考虑节点运行风险差异的多端柔性配电网络自适应潮流优化

刘文霞¹, 王凌飞¹, 徐艺铭¹, 成锐¹, 王志强¹, 王朝亮², 许烽²

(1. 华北电力大学 电气与电子工程学院, 北京 102206; 2. 国网浙江电力有限公司电力科学研究院, 浙江 杭州 310014)

摘要:为更好地平衡配电网运行优化中的安全性和经济性,提出考虑节点电压越限风险差异的多端柔性配电网络潮流自适应优化方法。基于柔性开关设备(SOP)结构,建立 SOP 传输损耗模型;以网损与加权的节点电压偏差之和为目标函数,计及系统初始电压偏差状态和分布式电源(DG)实时渗透率,建立目标函数中网损和电压偏差的自适应权重模型,考虑电气距离、DG 位置和源荷出力相关性,提出各节点电压偏差的赋权策略,从而构建配电网运行优化模型。以改进的 3 个 IEEE 33 节点馈线组为例,将模型转化为凸优化模型后采用内点法求解,结果表明所提模型是有效的,权重自适应策略可改善电压,降低网损,并提高优化模型对不同渗透率下配电网的适用性。

关键词:运行优化;多端柔性开关设备;柔性配电网;自适应

中图分类号:TM 732

文献标识码:A

DOI:10.16081/j.issn.1006-6047.2019.05.001

0 引言

大量分布式风电和光伏等新能源的并网可以有效降低网络损耗,减少环境污染。然而,新能源受外界环境影响较大,其出力的不确定性和波动性给配电网带来诸多问题,使配电网的运行面临严峻挑战^[1]。

当分布式电源(DG)出力波动较大时,通过网络重构可以平衡负载,降低网损^[2],而我国配电网大多采用闭环设计、开环运行的结构^[3],考虑到联络开关的动作次数以及开断带来的冲击电流,很难实现网络的实时重构;同时,DG 出力较大时馈线末端电压可能偏高,现有配电网以分接头和电容器为主的电压调节手段无法满足大量随机性能源并网的调节要求^[4];为了满足重要用户高可靠性供电需求,电网通常采用多路供电方式,这会造成系统冗余增加,而且开环运行下的故障处理无法满足敏感用户不间断供电的需求。上述问题综合反映了现有配电技术在应对大规模 DG 并网时的技术局限性,并促进了对以安装柔性开关设备 SOP(Soft Open Point)为主要特征的柔性配电网的研究^[5-6]。SOP 是一种安装于传统联络开关(TS)处的电力电子设备^[7],其可完全控制两端间功率传输的能力及故障时的 Vf 控制模式^[8-9],为解决上述问题提供了有效途径。

国内外针对 SOP 在有源配电网中的应用已经开展了相关研究。国家 863 计划项目已着手建立示范工程,如北京计划将两端 SOP 应用于 10 kV 馈线

末端,实现不同变电站出线间的闭环运行^[10],杭州计划采用 SOP 将 10 kV 和 20 kV 这 2 个电压等级的馈线互联,实现不同电压等级间的联网运行。文献[11]分析了 SOP 在单个潮流断面和时序潮流断面下对有源配电网电压和网损的优化作用;文献[12]分析了正常运行情况下 SOP 通过调节无功补偿和有功传输实现供电分区互联,均衡分区之间的负载,对系统提供动态电压支撑,解决局部供电能力不足问题的能力;文献[13-14]研究了 SOP 在不同容量下的配电网中提高 DG 渗透率的作用,并以英国配电网作为算例证明了其经济可行性;文献[15-16]考虑 DG 的不确定性和储能设备的接入,证明了在中压配电网中对于均衡负载和稳定电压,安装 1 个 SOP 就能达到和多个联络开关接近的效果。

上述文献中基于 SOP 的优化运行大多采用 15 min 以上的控制周期,以网损或线路均衡度为目标函数,将电压作为约束条件。考虑到控制周期内负荷和 DG 出力均可能有较大波动,DG 出力预测也会有误差,单一的目标函数在系统渗透率较高时难以保证电压在 2 次控制期间始终合格。为了在优化过程中兼顾网络损耗和电压质量,文献[17]将电压偏差和网损归一化后计入目标函数,并赋予两者固定的权重系数,但是固定的权重系数在电压偏差不严重时会影响策略的经济性,而在电压偏差严重时又难以保证电压不越限;文献[18]同样以电压偏差和网损为目标函数,采用层次分析法确定两者的权重,其中电压偏差项仅计及无优化时突破电压阈值的节点。一般而言,间歇性能源渗透率越高,电压的波动性越大,而且系统运行中越靠近馈线末端和 DG 接入点的节点电压波动越大^[19],因此,电压越限风险不仅与优化前的节点电压有关,而且与光伏渗透率、负荷预测误差以及光伏接入位置等因素相关。

此外,上述文献对 SOP 在配电网运行优化中的

收稿日期:2018-08-26;修回日期:2019-03-01

基金项目:国家重点研发计划资助项目(2017YFB0903100);
国家电网公司科技项目(521104170043)

Project supported by the National Key R&D Program of China
(2017YFB0903100) and the Science and Technology Project of
State Grid Corporation of China(521104170043)

研究仅停留在双端结构,对多端 SOP 还未涉及。与双端 SOP 相比,多端 SOP 可以在末端将不同馈线连接,以平衡负载,提高线路利用率,延缓变压器升级改造,而且设备一端故障时不影响另外两端间功率的传输,可靠性也有所提高。在现代配电网中,多条馈线通过末端环网开关直接联络的现象很常见^[20],通过安装多端 SOP 实现多条馈线柔性互联的柔性配电网将成为未来的重要发展方向之一。

本文以多端柔性配电网中 SOP 的运行优化为研究对象,依据电网各时刻的电压偏差程度和 DG 渗透率建立电压偏差和网损权重可自适应调整的目标函数,同时依据不同场景下系统中各节点电压越限风险差异构建节点电压偏差的权重模型,并建立计及网损的 SOP 模型,保证策略的精度和有效性,为柔性配电网中多端 SOP 的运行优化提供理论支撑。

1 计及传输损耗的多端 SOP 建模

双端 SOP 可由多种基于电压源型变流器 VSC (Voltage Source Converter) 的装置连接形成,其中以背靠背电压源型变流器 B2B VSC (Back-to-Back Voltage Source Converter) 结构最为简单,它可以精准地控制馈线间传输的有功功率并提供一定的电压支撑,故本文分析在该结构直流侧并联 1 个 VSC 形成的多端 SOP,拓扑结构如图 1 所示。正常状态下每个 VSC 可以控制自身直流侧电压 U_{dc} 、交流侧电压 U_{ac} 及输出的有功功率 P 、无功功率 Q 中的 2 个变量^[21],故 SOP 的每个端口根据 VSC 控制的变量,可以分别视为 PV 节点或 PQ 节点。

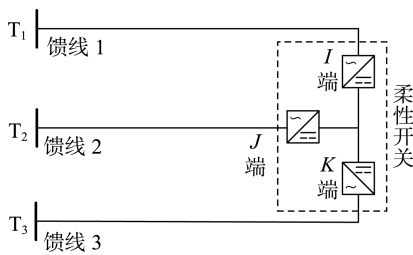


图 1 3 个 VSC 并联成的多端 SOP

Fig.1 Multi-terminal SOP consisted of three parallel-connected VSCs

VSC 由半导体开关和电容器连接构成,半导体开关的导通损耗、开关损耗以及电容器的损耗是 VSC 损耗的主要来源^[22]。根据文献^[23], I 端变流器的有功功率损耗可以近似表示为交流侧输出电流的函数:

$$P_{VSC,loss}^I = a^I (I_{VSC}^I)^2 + b^I I_{VSC}^I + c^I \quad (1)$$

其中, $P_{VSC,loss}^I$ 为 SOP 在节点 I 处变流器的有功损耗; c^I 为 SOP 在节点 I 处变流器输出为 0 时的损耗; b^I 、 a^I 分别为 SOP 在节点 I 处变流器损耗对电流和电流

平方的系数; I_{VSC}^I 为 SOP 在节点 I 处输出的电流。考虑到厂家一般只给出节点 I 处变流器输出为 0 时的损耗 c^I 以及运行于额定状态时的损耗 $P_{VSC,loss,rate}^I$,这种模型的系数 a^I 、 b^I 难以确定,且额定状态下二次项的值一般大于一次项^[23],故将式(1)简化为:

$$P_{VSC,loss}^I = k^I (I_{VSC}^I)^2 + c^I \quad (2)$$

$$(I_{VSC}^I)^2 = [(P^I)^2 + (Q^I)^2] / (V^I)^2 \quad (3)$$

$$k^I = (P_{VSC,loss,rate}^I - c^I) / (I_{VSC,rate}^I)^2 \quad (4)$$

其中, k^I 为 SOP 在节点 I 处变流器损耗对电流平方的系数; P^I 和 Q^I 分别为 SOP 在节点 I 处输出的有功功率和无功功率; $I_{VSC,rate}^I$ 为 SOP 在节点 I 处运行于额定状态时的输出电流。这种简化在一定程度上使计算出的损耗偏小,且在 $I_{VSC}^I = 0.5 I_{VSC,rate}^I$ 附近时差值取到最大,与实际值偏差在 20% 左右,因此这种近似是可取的。考虑有功损耗的 SOP 的运行控制应满足以下约束:

$$P^I + P^J + P^K + P_{VSC,loss}^I + P_{VSC,loss}^J + P_{VSC,loss}^K = 0 \quad (5)$$

$$\sqrt{(P^I)^2 + (Q^I)^2} \leq S_{SOP}^I \quad (6)$$

$$\sqrt{(P^J)^2 + (Q^J)^2} \leq S_{SOP}^J \quad (7)$$

$$\sqrt{(P^K)^2 + (Q^K)^2} \leq S_{SOP}^K \quad (8)$$

其中, P^I 、 P^J 、 P^K 和 Q^I 、 Q^J 、 Q^K 分别为 3 个变流器各自输出的有功功率和无功功率; $P_{VSC,loss}^I$ 、 $P_{VSC,loss}^J$ 分别为 SOP 在节点 J 和节点 K 处变流器的有功损耗,计算方法与 $P_{VSC,loss}^I$ 相同; S_{SOP}^I 、 S_{SOP}^J 、 S_{SOP}^K 分别为 3 个变流器的额定容量。

2 考虑节点运行风险的自适应目标函数

节点电压在运行中越限的风险大小既与其优化前的电压状况有关,也与其优化后的电压波动情况有关。本节结合电气距离、DG 位置和源荷出力相关性,给出各节点电压偏差的赋权策略,并计及系统初始电压偏差状态和随机电源实时渗透率,建立目标函数中电压偏差和网损的自适应权重模型。

2.1 考虑节点运行风险差异的多属性目标函数

在电力系统运行过程中,网损与电压波动是衡量系统运行状况的 2 个关键指标,鉴于此,本文同时考虑系统网损与电压偏差情况,建立计及系统运行特征的多属性目标函数。考虑到系统网损与电压偏差属于性质不同的指标,在建立多属性目标前,需要对两者进行归一化处理。对归一化处理后的数据进行加权组合建立目标函数,如式(9)所示。

$$\begin{cases} f = \alpha f_1 + \beta f_2 \\ f_1 = f_{loss} / f_{loss0} \\ f_2 = f_{Bias} / f_{Bias0} \end{cases} \quad (9)$$

其中, α 、 β 分别为 f_1 、 f_2 的权重系数,由优化前系统

的运行状态确定; f_{loss} 、 f_{Bias} 分别为系统优化后的网损、电压偏差; $f_{\text{loss}0}$ 、 $f_{\text{Bias}0}$ 分别为系统未经优化时的网损、电压偏差。

f_{loss} 可直接采用系统网损之和,即:

$$f_{\text{loss}} = \sum_{k=1}^3 \sum_{g=1}^{m_k} \Delta P_{k,g} + P_{\text{VSC},\text{loss}}^I + P_{\text{VSC},\text{loss}}^J + P_{\text{VSC},\text{loss}}^K \quad (10)$$

其中, k 为馈线编号; g 为支路编号; m_k 为第 k 个配电系统的支路数; $\Delta P_{k,g}$ 为第 k 条馈线中第 g 条支路的有功功率损耗,计算公式如式(11)所示。

$$\Delta P_{k,g} = I_{k,g}^2 R_{k,g} \quad (11)$$

其中, $I_{k,g}$ 、 $R_{k,g}$ 分别为第 k 条馈线中第 g 条支路的电流和电阻。

f_{Bias} 可取加权后的电压偏差之和,即:

$$f_{\text{Bias}} = \sum_{k=1}^3 \sum_{e=1}^{n_k} W_{k,e} (U_{k,e}^2 - 1)^2 \quad (12)$$

其中, $U_{k,e}$ 为第 k 条馈线中节点 e 的电压; $W_{k,e}$ 为其权重; n_k 为第 k 个配电系统的节点数。式(12)中电压采用平方的形式是为了便于对部分潮流约束条件进行线性化处理。

对于配电网而言,当负荷和DG出力发生波动时,一般靠近馈线末端的节点和靠近DG接入位置的节点电压波动较大,其权重也应该设定得大一些。故权重的设置考虑节点与馈线首端的电气距离以及DG接入位置和出力这2个因素。式(13)为针对单条馈线的单一节点电压偏差权重模型。

$$W_e = \frac{Z_e^0}{Z_{\text{max}}^I} + \sum_{i=1}^n \frac{S_i^t}{S^t} \frac{Z_i^0 - Z_i^e}{Z_i^0} \quad (13)$$

其中, W_e 为该条馈线中节点 e 电压偏差的权重; Z_e^0 为节点 e 到馈线始端的阻抗; Z_{max}^I 为该馈线始端到各末端间阻抗的最大值; S_i^t 为 t 时刻第 i 个DG的视在功率; n 为DG总数; S^t 为该馈线负荷视在功率之和; Z_i^0 为DG接入点到平衡节点的阻抗; Z_i^e 为节点 e 到DG接入点的阻抗。特别地,当 $Z_i^e > Z_i^0$ 时,修正 $Z_i^e - Z_i^0 = 0$ 。

2.2 目标函数自适应权重系数的建模

配电网潮流优化要兼顾降低网络损耗和改善电压水平,现有文献一般给定两部分函数一确定比值,这使得系统电压偏差较小时优化策略的经济性不佳,而电压偏差较大时这种策略又难以保证电压在2次控制期间始终合格。因此本文提出根据系统当前运行状态确定两者权重大小的方法。

在式(9)中, f_2 主要表征系统电压偏差的优化情况,系统电压偏差越严重,这项指标在目标函数中的比重就应越大。系统的电压偏差状况可以由初始电压偏差系数 β_1 和周期内电压波动系数 β_2 来衡量,两者均与电压越限风险的大小成正相关。

β_1 由系统不优化时的加权电压偏差之和 $f_{\text{Bias}0}$ 确定,可按式(14)计算。

$$\beta_1 = f_{\text{Bias}0} / \sum_{k=1}^3 \sum_{e=1}^{n_k} [W_{k,e} (U_{\text{max}}^2 - U_{\text{min}}^2)^2] \quad (14)$$

其中, U_{max} 、 U_{min} 分别为节点电压幅值上限和下限。

β_2 既受渗透率的影响,也受DG所处位置的影响。其中DG位置带来的影响已经在式(13)中计入到各节点电压偏差的权重中, β_2 只需要计及渗透率的影响,计算方式如下:

$$\beta_2 = \left(S_{\text{sum}}^t + \sum_{i=1}^n S_i^t \right) / S_{\text{sum}}^t \quad (15)$$

其中, S_{sum}^t 为整个系统负荷在 t 时刻的视在功率之和。

故 α 、 β 取值如下:

$$\begin{cases} \alpha = 1 \\ \beta = \beta_1 \beta_2 \end{cases} \quad (16)$$

3 基于内点法的模型求解方法

内点法是求解最优潮流的常用方法,其最显著的特点是迭代次数与系统规模的关系不大^[24],但是该方法只能用于求解凸优化,故求解前需要将模型转化为凸优化模型。

3.1 含多端SOP的最优潮流模型

最优潮流模型应当在式(2)~(16)的基础上增加系统潮流约束,考虑到已有的目标函数中电压和电流均是以平方的形式出现的,故采用节点功率平衡方程,以便于对部分潮流约束条件的线性化。

$$\begin{cases} P_{k,e}^{\text{SOP}} + P_{k,e}^{\text{DG}} + \sum_{g \in \phi_{k,e}} (P_{k,g} - I_{k,g}^2 R_{k,g}) = P_{k,e}^{\text{load}} + \sum_{g \in \varphi_{k,e}} P_{k,g} \\ Q_{k,e}^{\text{SOP}} + Q_{k,e}^{\text{DG}} + \sum_{g \in \phi_{k,e}} (Q_{k,g} - I_{k,g}^2 X_{k,g}) = Q_{k,e}^{\text{load}} + \sum_{g \in \varphi_{k,e}} Q_{k,g} \end{cases} \quad (17)$$

其中, $P_{k,e}^{\text{SOP}}$ 、 $P_{k,e}^{\text{DG}}$ 、 $Q_{k,e}^{\text{SOP}}$ 、 $Q_{k,e}^{\text{DG}}$ 分别为SOP和DG在第 k 条馈线中节点 e 注入的有功功率和无功功率; $P_{k,e}^{\text{load}}$ 、 $Q_{k,e}^{\text{load}}$ 分别为第 k 条馈线中节点 e 处负荷消耗的有功功率和无功功率; $P_{k,g}$ 、 $Q_{k,g}$ 、 $R_{k,g}$ 、 $X_{k,g}$ 、 $I_{k,g}$ 分别为第 k 条馈线中第 g 条支路始端传输的有功、无功功率及其电阻、电抗和电流; $\phi_{k,e}$ 为第 k 条馈线中以节点 e 为末端节点的支路编号集合; $\varphi_{k,e}$ 为第 k 条馈线中以节点 e 为始端节点的支路编号集合。

式(17)仅计及单个节点的功率平衡,还需要方程约束支路上的电压、电流,记第 k 条馈线中第 g 条支路始、末端分别为节点 e 和 f ,电压分别为 $U_{k,e}$ 、 $U_{k,f}$,则补齐潮流约束如下:

$$I_{k,g}^2 = \frac{P_{k,g}^2 + Q_{k,g}^2}{U_{k,e}^2} \quad (18)$$

$$U_{k,f}^2 = U_{k,e}^2 - 2(R_{k,g}P_{k,g} + X_{k,g}Q_{k,g}) + (R_{k,g}^2 + X_{k,g}^2)I_{k,g}^2 \quad (19)$$

$$(U_{k,e}^{\min})^2 \leq U_{k,e}^2 \leq (U_{k,e}^{\max})^2 \quad (20)$$

$$0 \leq I_{k,g}^2 \leq (I_{k,g}^{\max})^2 \quad (21)$$

其中, $U_{k,e}^{\max}$ 、 $U_{k,e}^{\min}$ 分别为第 k 条馈线中节点 e 电压的最大和最小值; $I_{k,g}^{\max}$ 为第 k 条馈线中第 g 条支路的额定电流。

3.2 最优潮流模型的转化及求解方法

以式(9)中的 f 取最小值, 即 $\min(f)$ 为目标, 式(2)~(21)中除该式外的其余部分为约束条件, 可构成一个完整的最优潮流模型。采用变量 $I_{2,k,g}$ 、 $U_{2,k,e}$ 代替 $I_{k,g}^2$ 、 $U_{k,e}^2$ 可将式(2)、(3)、(11)、(17)、(19)线性化。此时式(12)转化为:

$$f_{\text{Bias}} = \sum_{k=1}^3 \sum_{e=1}^{n_k} W_{k,e} (U_{2,k,e} - 1)^2 \quad (22)$$

式(22)为二次凸函数。对于式(18), 可以将其转化为锥约束^[18]:

$$\begin{vmatrix} 2P_{k,g} \\ 2Q_{k,g} \\ I_{2,k,g} - U_{2,k,e} \end{vmatrix} \leq I_{2,k,g} + U_{2,k,e} \quad (23)$$

转化完成后的模型是一个凸规划, 可用内点法求解^[25]。具体求解过程中, 本文借助 YALMIP 算法包进行建模, 并调用 IPOPT 工具箱求解模型。

4 算例分析

4.1 算例系统的基本设定

以 3 个改进的 IEEE 33 节点配电系统作为算例, DG 出力 and 单个 IEEE 33 节点系统负荷的出力曲线如图 2 所示, 该曲线可由负荷预测和 DG 出力预测方法获得, 在安装有配电信息采集系统的配电网, 也可以通过实时采集的方式得到。假定 2 台光伏系统分别接入节点 1-14、1-17 (1 表示系统编号, 14、17 为节点编号, 其他类似), 额定容量均为 200 kW·A, 功率因数均为 0.9; 4 台风电机组分别接入节点 1-15、2-14、2-16、2-17, 额定容量分别为 300 kW·A、300 kW·A、300 kW·A、500 kW·A, 功率因数均为 0.9; 1 个多端 SOP 连接节点 1-18、2-18、3-18, 连接线阻

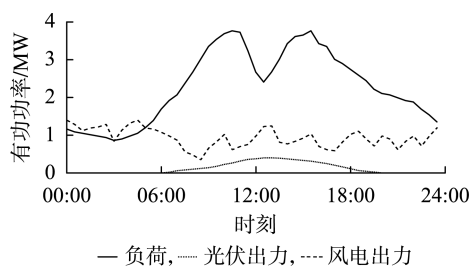


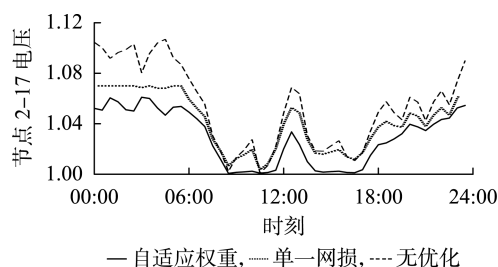
图 2 DG 出力 and 单个 IEEE 33 节点系统的负荷变化曲线

Fig.2 Curves of DG output and load variation of single IEEE 33-bus system

抗取为 IEEE 33 节点配电系统最大联络线阻抗的一半, SOP 三端容量均为 1 MV·A, 平衡节点电压取为 1.05 p.u.。对于 SOP 中的变流器, c^l 可取为 0.002 MW, 额定状态下的损耗率 $P_{\text{VSC,loss,rate}}^l$ 一般在 1.5%~6%之间^[14,23], 本文取为 2%。

4.2 自适应策略有效性检验

算例以 15 min 为控制周期, 并采用本文自适应策略控制 SOP 输出。运行 24 h, 算例中各节点电压均保持在 0.96~1.06 p.u. 之间, 保有较大裕度 (IEEE 33 节点配电系统首端的基准电压为 12.66 kV, 接近 10 kV 等级, 供电电压允许偏差为额定电压的 $\pm 7\%$ ^[26])。选取电压波动最大、 $W_{k,e}$ 也最大的节点 2-17, 绘制其 1 d 的电压波动状况, 并与仅使网损最小的控制策略对比, 如图 3 所示 (图中电压为标么值, 后同)。



—自适应权重, —单一网损, ---无优化

图 3 节点 2-17 的电压曲线

Fig.3 Curves of voltage at Bus 2-17

根据图 3, 在 00:00—06:00 时段, 单一网损最小的控制策略仅能将节点 2-17 电压控制在上限 1.07 p.u., 这使得系统难以应对 2 次控制之间的负荷和 DG 波动, 而采用自适应权重策略可很好地解决这个问题。在网损方面, 表 1 统计了典型时段下 2 种策略的网损, 在渗透率最高的 00:00—06:00 时段, 自适应权重策略为追求安全性, 牺牲了一定的经济性, 在渗透率较低的 08:00—12:00 时段以及渗透率处于中等水平的 18:00—22:00 时段内, 与仅使网损最小的控制策略相比, 自适应策略的网损略有升高, 但对网损仍有较大的优化。

表 1 典型时段下系统各场景的能量损耗

Table 1 Energy loss of each system scenario for typical periods

时段	能量损耗/(MW·h)		
	自适应权重	单一网损	无优化
00:00—06:00	0.528	0.460	0.661
08:00—12:00	2.913	2.885	3.125
18:00—22:00	1.231	1.195	1.357

4.3 自适应参数对电压和网损优化效果的影响

为分析自适应参数 $W_{k,e}$ 和 β 对电压和网损优化效果的具体影响, 本文对如下 3 种目标函数的优化场景进行对比。

场景 1: SOP 的 3 个节点均设置为 PQ 节点, 以

15 min 为一个控制周期,目标函数中 β 自适应取值, $W_{k,e}$ 均取 1。

场景 2: SOP 的 3 个节点均设置为 PQ 节点,以 15 min 为一个控制周期,目标函数中 $W_{k,e}$ 自适应取值, β 取固定值 1。

场景 3: SOP 的 3 个节点均设置为 PQ 节点,以 15 min 为一个控制周期,目标函数中 $W_{k,e}$ 和 β 均自适应取值。

由于 1、2 号改进 IEEE 33 节点系统中节点 1-17、2-17 的 DG 装机容量和波动性都最大,其电压幅值对应的权重也最大,所以重点分析节点 1-17、2-17 的电压,并与节点 3-18 的电压进行对比。图 4 描述了 3 种场景下在 SOP 动作完成瞬间节点 1-17、2-17、3-18 的电压幅值,表 2 中统计了各典型时段系统的网损。

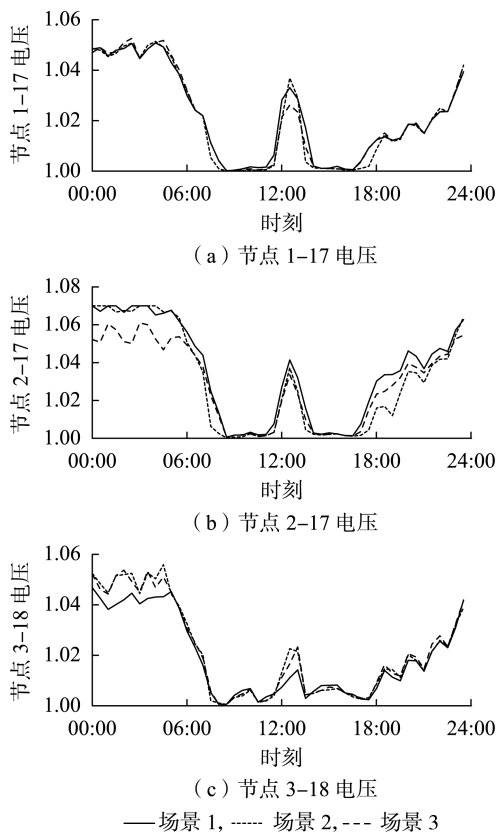


图 4 3 种场景下节点 1-17、2-17、3-18 电压

Fig.4 Voltages of Bus 1-17, 2-17 and 3-18 under three scenarios

表 2 典型时段下系统各场景的能量损耗

Table 2 Energy loss of each scenario during typical periods

时段	能量损耗/(MW·h)			
	场景 1	场景 2	场景 3	无优化
00:00—06:00	0.495	0.464	0.528	0.661
08:00—12:00	2.913	2.972	2.913	3.125
18:00—22:00	1.228	1.305	1.231	1.357

由图 4(b) 可见, β 的自适应变化主要在 DG 出力较大时拉低了馈线 2 末端的电压, 在渗透率较低

时减弱了对电压的约束, 其对馈线 1、3 影响较小, 但仍有这种趋势。结合表 2, 这种控制模式使得系统在渗透率较低的 08:00—12:00 时段和渗透率处于中等水平的 18:00—22:00 时段内的网损较 β 取固定值 1 时有显著下降, 在渗透率最高的 00:00—06:00 时段, 自适应的 β 使网损小幅升高, 但 β 固定的控制方式下节点 2-17 电压已经接近或达到上限, 使得系统难以应对 2 次控制间隔之间负荷和 DG 的波动。

对比图 4(a) — (c), $W_{k,e}$ 的引入主要在 DG 出力较大时抬升了没有 DG 的馈线 3 的末端电压, 降低了馈线 2 的末端电压。这主要是由于 DG 的存在会增大接入点附近的 $W_{k,e}$, 不存在 DG 的馈线 3 节点的 $W_{k,e}$ 普遍小于渗透率较高的馈线 2, 这使得自适应策略在系统渗透率较大时增强了对馈线 2 电压的约束能力, 将一部分 DG 过剩的出力传输到了馈线 3, 这种作用在 DG 出力越大时越显著。馈线 1 渗透率介于两者之间, 因此受 $W_{k,e}$ 影响较小。

本文所提电压偏差项的自适应权重系数 β 与系统渗透率及优化前的电压偏差状况均成正相关, 在系统渗透率高、电压偏差大时增强了对电压的约束, 在渗透率低、电压偏差小时则更偏重于系统的经济性; 同时, 节点电压偏差权重的 $W_{k,e}$ 正相关于节点电压的越限风险, 通过增强对线路末端和 DG 接入点附近电压越限风险较大节点的电压约束, 改善了系统整体的电压质量。

5 结论和展望

本文依据电网各时刻的电压偏差程度和 DG 渗透率建立了电压偏差和网损权重可自适应调整的目标函数, 同时依据不同场景下系统中各节点电压越限风险差异构建了节点电压偏差的权重模型, 通过 3 个改进的 IEEE 33 节点配电系统的仿真计算验证了模型的有效性。多端 SOP 在有源配电网的引入可以改善系统网损和电压偏差, 自适应权重策略的应用则可以进一步改善电压, 降低网损。该模型很好地平衡了配电网潮流优化中的安全性和经济性, 对不同渗透率的配电网均有很好的适用性。

本文在潮流优化过程中仅考虑了 SOP 的调节作用, 而没有计及储能设备、无功补偿装置以及变压器分接头的作用, 适用于更复杂系统的自适应潮流优化策略还有待进一步研究。

参考文献:

- [1] 刘佳, 徐谦, 程浩忠, 等. 考虑 N-1 安全的分布式电源多目标协调优化配置[J]. 电力自动化设备, 2017, 37(7): 84-92.
LIU Jia, XU Qian, CHENG Haozhong, et al. Multi-objective coordinated DG planning with N-1 security[J]. Electric Power Automation Equipment, 2017, 37(7): 84-92.
- [2] WV Y K, LEE C Y, LIV L C, et al. Study of reconfiguration for the distribution system with distributed generators[J]. IEEE Transac-

- tions on Power Delivery, 2010, 25(3):1678-1685.
- [3] 李春燕, 杨强, 魏蔚, 等. 计及风速与负荷相关性的配电网重构方法[J]. 电力自动化设备, 2016, 36(2):148-153.
LI Chunyan, YANG Qiang, WEI Wei, et al. Spinning reserve cost apportionment for power system with wind farm[J]. Electric Power Automation Equipment, 2016, 36(2):148-153.
- [4] 肖浩, 裴玮, 邓卫, 等. 分布式电源对配电网电压的影响分析及优化控制策略[J]. 电工技术学报, 2016, 31(1):203-213.
XIAO Hao, PEI Wei, DENG Wei, et al. Analysis of the impact of distributed generation on distribution network voltage and its optimal control strategy[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2016, 31(1):203-213.
- [5] 肖峻, 刚发运, 蒋迅, 等. 柔性配电网: 定义、组网形态与运行方式[J]. 电网技术, 2017, 41(5):1435-1442.
XIAO Jun, GANG Fayun, JIANG Xun, et al. Flexible distribution network: definition, morphology and operation mode[J]. Power System Technology, 2017, 41(5):1435-1442.
- [6] 杨欢, 蔡云旒, 屈子森, 等. 配电网柔性开关设备关键技术及其发展趋势[J]. 电力系统自动化, 2018, 42(7):1-13.
YANG Huan, CAI Yunli, QU Zisen, et al. Research on key techniques and development trend of soft open points for distribution network[J]. Automation of Electric Power Systems, 2018, 42(7):1-13.
- [7] 王成山, 孙充勃, 李鹏, 等. 基于 SNOP 的配电网运行优化及分析[J]. 电力系统自动化, 2015, 39(9):82-87.
WANG Chengshan, SUN Chongbo, LI Peng, et al. SNOP-based operation optimization and analysis of distribution networks[J]. Automation of Electric Power Systems, 2015, 39(9):82-87.
- [8] AITHAL A, LONG C, CAO W, et al. Impact of soft open point on feeder automation[C]//International Energy Conference(ENERGYCON). Leuven, Belgium: IEEE, 2016:1-6.
- [9] CAO W, WU J, JENKINS N, et al. Operating principle of soft open points for electrical distribution network operation[J]. Applied Energy, 2016, 164:245-257.
- [10] 黄仁乐, 程林, 李洪涛. 交直流混合主动配电网关键技术研究[J]. 供用电, 2016, 36(8):46-51.
HUANG Renle, CHENG Lin, LI Hongtao. Research on the key technology of AC/DC hybrid active distribution network[J]. Distribution & Utilization, 2016, 36(8):46-51.
- [11] 王岸. SNOP 的研究及其在配电网中的应用[D]. 北京: 北京交通大学, 2015.
WANG An. Research on SNOP and its application in distribution network[D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2015.
- [12] 余潇潇, 张璞, 张凯. 柔性直流背靠背装置在北京配电网中的应用[J]. 电力建设, 2016, 37(5):132-137.
YU Xiaoxiao, ZHANG Pu, ZHANG Kai. Application of VSC-HVDC back-to-back device in Beijing distribution network[J]. Electric Power Construction, 2016, 37(5):132-137.
- [13] BLOEMINK J M, GREEN T C. Benefits of distribution-level power electronics for supporting distributed generation growth[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2013, 28(2):911-919.
- [14] BLOEMINK J M, GREEN T C. Increasing distributed generation penetration using soft normally-open points[C]//Power and Energy Society General Meeting. Minneapolis, Minnesota, USA: IEEE, 2010:1-8.
- [15] BLOEMINK J M, GREEN T C. Increasing photovoltaic penetration with local energy storage and soft normally-open points[C]//Power and Energy Society General Meeting. Detroit, MI, USA: IEEE, 2011:1-8.
- [16] CAO W, WU J, JENKINS N. Feeder load balancing in MV distribution networks using soft normally-open points[C]//PES Innovative Smart Grid Technologies Conference Europe(ISGT-Europe). Istanbul, Turkey: IEEE, 2014:1-6.
- [17] 晏阳, 廖清芬, 刘涤尘, 等. 基于潮流系数的 SNOP 配置及主动配电系统优化[J]. 南方电网技术, 2015, 9(11):92-98.
YAN Yang, LIAO Qingfen, LIU Dichen, et al. Power flow betweenness based SNOP allocation and active distribution network optimization[J]. Southern Power System Technology, 2015, 9(11):92-98.
- [18] 赵金利, 李雨薇, 李鹏, 等. 基于二阶锥规划的有源配电网 SNOP 电压无功时序控制方法[J]. 高电压技术, 2016, 42(7):2134-2141.
ZHAO Jinli, LI Yuwei, LI Peng, et al. Sequential voltage regulation of soft normally open point in active distribution network based on second-order cone programming[J]. High Voltage Engineering, 2016, 42(7):2134-2141.
- [19] 陈芳, 王玮, 徐丽杰, 等. 分布式电源接入对配电网电压变化的分析[J]. 电力系统及其自动化学报, 2012, 24(4):145-149.
CHEN Fang, WANG Wei, XU Lijie, et al. Analyzing the voltage variation of distribution network including distributed generation[J]. Proceedings of the CSU-EPSA, 2012, 24(4):145-149.
- [20] 王成山, 宋关羽, 李鹏, 等. 基于智能软开关的智能配电网柔性互联技术及展望[J]. 电力系统自动化, 2016, 40(22):168-175.
WANG Chengshan, SONG Guanyu, LI Peng, et al. Research and prospect for soft open point based flexible interconnection technology for smart distribution network[J]. Automation of Electric Power Systems, 2016, 40(22):168-175.
- [21] 郑超, 周孝信, 李若梅, 等. VSC-HVDC 稳态特性与潮流算法的研究[J]. 中国电机工程学报, 2005, 25(6):1-5.
ZHENG Chao, ZHOU Xiaoxin, LI Ruomei, et al. Study on the steady characteristic and algorithm of power flow for VSC-HVDC[J]. Proceedings of the CSEE, 2005, 25(6):1-5.
- [22] 黄晓波. 风力发电系统变流器的效率分析[D]. 杭州: 浙江大学, 2014.
HUANG Xiaobo. Analysis on efficiency of converter for wind power generation system[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2014.
- [23] DAELEMANS G, SRIVASTAVA K, REZA M, et al. Minimization of steady-state losses in meshed networks using VSC HVDC[C]//Power & Energy Society General Meeting. Calgary, Alberta, Canada: IEEE, 2009:1-5.
- [24] 李彩华, 郭志忠, 樊爱军. 原-对偶内点法最优潮流在电力系统中的应用[J]. 电力自动化设备, 2002, 22(8):4-7.
LI Caihua, GUO Zhizhong, FAN Aijun. Application of primal-dual interior point method of optimal power flow to power system[J]. Electric Power Automation Equipment, 2002, 22(8):4-7.
- [25] 王成山, 宋关羽, 李鹏, 等. 一种联络开关和智能软开关并存的配电网运行时序优化方法[J]. 中国电机工程学报, 2016, 36(9):2315-2321.
WANG Chengshan, SONG Guanyu, LI Peng, et al. A hybrid optimization method for distribution network operation with SNOP and tie switch[J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(9):2315-2321.
- [26] 李庚银. 电力系统分析基础[M]. 北京: 机械工业出版社, 2013:146.

作者简介:



刘文霞

刘文霞(1967—),女,吉林长春人,教授,博士,主要研究方向为电力系统风险及可靠性评估、经济调度(E-mail:liuwenxia001@163.com);

王凌飞(1994—),男,山东泰安人,硕士研究生,主要研究方向为电力系统分析、配电网运行优化(E-mail:ncepu_wanglingfei@

163.com);

徐艺铭(1995—),女,吉林长春人,硕士研究生,主要研究方向为配电网规划及运行优化(E-mail:735856643@qq.com)。

(下转第14页 continued on page 14)

Optimal dispatch game model for virtual power plant considering security of distribution network

SUN Guoqiang¹, QIAN Weihang¹, HUANG Wenjin², XU Zheng², WEI Zhinong¹, ZANG Haixiang¹, ZHOU Yizhou¹

(1. College of Energy and Electrical Engineering, Hohai University, Nanjing 211100, China;

2. Yancheng Power Supply Company of State Grid Jiangsu Electric Power Co., Ltd., Yancheng 224002, China)

Abstract: The previous optimal dispatch models of VPP (Virtual Power Plant) only consider the economy of VPP and the obtained optimal dispatch schemes often fail to meet the security requirements of the distribution network, which may cause the problems of line over-load, node voltage over-limit and so on and affect the safe and stable operation of the power system. In order to balance the economy of VPP and the security of distribution network, an optimal dispatch game model of VPP based on non-cooperative game theory is established and the stochastic programming method is applied to deal with the uncertainties of electricity price and renewable energy sources, such as wind power and photovoltaic power. The optimal results of optimal dispatch model of VPP, security model of distribution network and non-cooperative game model are compared based on the case of an eight-lead distribution network in the north of a city. The results show that, when VPP and distribution network play game in a non-cooperative way, the VPP will take a relatively conservative dispatch scheme by reducing the power generation of each aggregation unit, which will increase the profits of VPP and maintain high security of distribution network, verifying the validity and rationality of the proposed non-cooperative game model.

Key words: virtual power plant; non-cooperative game; stochastic programming method; distribution network; security; optimal dispatch; models

(上接第 6 页 continued from page 6)

Adaptive power flow optimization of multi-terminal flexible distribution network considering voltage operation risk difference

LIU Wenxia¹, WANG Lingfei¹, XU Yiming¹, CHENG Rui¹, WANG Zhiqiang¹, WANG Chaoliang², XU Feng²

(1. School of Electrical and Electronic Engineering, North China Electric Power University, Beijing 102206, China;

2. State Grid Zhejiang Electric Power Research Institute, Hangzhou 310014, China)

Abstract: In order to balance the security and economy in optimal operation of distribution network better, an adaptive power flow optimization method is proposed for multi-terminal flexible distribution network, which considers over-limit difference of node voltage. A transmission loss model of SOP (Soft Open Point) is built based on its structure. The sum of power loss and weighted node voltage deviation is taken as the objective function, the self-adaptive weight model of power loss and voltage deviation in the objective function is built with the consideration of initial voltage deviation and real-time penetration of DG (Distributed Generator), and the weighting strategy of voltage deviation at each node is proposed with the consideration of electrical distance, DG position and output correlation between source and load, thus an optimal operation model of distribution network is built. Three improved IEEE 33-bus feeder groups are taken as examples, the models are converted to convex optimization models and solved by interior point method, and results show that the proposed model is effective, the proposed strategy can improve voltage, reduce power loss, and improve the applicability of the model to distribution network under different penetrations.

Key words: operation optimization; multi-terminal SOP; flexible distribution network; self-adaption