

基于鲁棒优化的交直流混合配电网供电能力评估

魏 炜¹,赵学良¹,朱 洁²,徐 弢¹,赵 贺²,李子衿²,罗凤章¹

(1. 天津大学 智能电网教育部重点实验室,天津 300072;2. 国网北京市电力公司,北京 100031)

摘要:提出了一种适用于高比例可再生能源接入的中压交直流混合配电网供电能力评估方法。针对可再生能源出力的随机波动性,基于鲁棒优化思想构建了供电能力评估模型;针对运行安全被破坏的情况,提出了以配电网运行风险最小为目标、以交直流换流器等为调控对象的优化控制策略,充分挖掘系统的供电潜力。算例结果表明所提方法能够合理评估不确定环境下交直流混合配电网的供电能力,为配电网的安全运行提供参考。

关键词:交直流混合配电网;供电能力;高比例可再生能源;鲁棒优化

中图分类号:TM 712

文献标志码:A

DOI:10.16081/j.epae.201909044

0 引言

高比例可再生能源的接入使得配电网呈现出运行方式多样化、电力电量平衡概率化、运行风险复杂化等新特征,可再生能源的波动性甚至超过负荷成为系统运行不确定性的主要来源,需要应用新型配电技术应对这种不确定性。另一方面,电力电子技术的不断进步使得基于电压源换流器(VSC)的柔性直流配电技术开始在配电网中得到应用^[1],交直流混合配电网将成为未来智能配电网发展的重要形式之一。与纯交流配电网相比,交直流混合配电网可以利用换流器的控制特性优化潮流分布、增强无功调节能力,对于抑制高比例可再生能源接入带来的不确定性,保障配电网安全高效运行将起到很好的支撑作用。

配电系统供电能力是指在满足安全运行约束条件下的最大负载能力^[2]。供电能力是衡量配电网经济性和可靠性的综合性指标,对于配电网规划和运行方式调整都有重要的指导意义。对于未考虑可再生能源接入的传统配电系统,已有大量文献对其供电能力评估模型进行了分析讨论,从分析方法方面大体可分为基于馈线互连和主变互连的线性规划模型^[3-4]、基于潮流计算的重复潮流模型^[5]和最优潮流模型^[6]、基于安全边界的供电能力评估模型^[7]等。此外,还有学者针对供电能力评估涉及的变电站低压侧接线^[8]、供电可靠性^[9]、用户负荷分级与互动^[10]等问题展开讨论。对于考虑可再生能源接入的主动配电系统供电能力评估,现有文献重点针对可再生能源接入带来的不确定性开展研究,文献^[11]应用

盲数理论对可再生能源发电出力的随机波动性进行描述,文献^[12]采用场景生成的方法对可再生能源的随机波动性进行处理,但上述研究未计及直流系统。对于引入直流环节的配电系统,现有文献重点对直流环节控制特性开展供电能力分析,文献^[13]讨论了采用柔性开关代替传统馈线间联络开关接入配电网后的供电能力评估模型和计算方法;文献^[1]在文献^[13]的基础上,进一步考虑了配电网电压约束,提出了柔性互连的城市配电网供电能力评估方法,但未考虑可再生能源的接入;文献^[14]采用概率函数圆描述可再生能源出力的随机性,构建了多指标的直流配电网供电能力评估体系,但其研究对象仅限于直流配电网本身,未考虑交直流配电网之间的相互影响。对于高比例可再生能源接入的交直流混合配电系统,一方面,可再生能源随机波动性会对供电能力产生较大影响,接入比例越高,影响越大;另一方面,交直流换流器等控制设备的引入可有效改善交直流配电网运行状况。上述两方面因素在供电能力评估中都需要加以考虑,但目前尚未有该方向问题的研究报道。

本文提出了一种适用于高比例可再生能源接入的中压交直流混合配电网供电能力评估方法。针对可再生能源随机波动性的影响,基于鲁棒优化思想构建了供电能力评估模型,并对不同负荷水平下的运行安全性进行判定;针对系统运行安全约束被破坏的情况,提出了一种以配电网运行风险最小为目标,以交直流换流器等为调控对象的优化模型,以充分挖掘交直流混合配电网的供电潜力。

1 可再生能源发电鲁棒模型

风电、光伏等可再生能源的发电出力具有很强的随机波动性,当其接入容量较大时会给配电网的安全运行带来挑战。对于可再生能源出力随机波动性的处理,有随机规划、机会约束、区间优化和鲁棒

收稿日期:2018-12-08;修回日期:2019-08-12

基金项目:国家重点研发计划项目(2016YFB0900500,2016YFB0900503)

Project supported by the National Key R&D Program of China(2016YFB0900500,2016YFB0900503)

优化等多种方法。随机规划^[15]和机会约束^[16]着重于考虑不确定变量分布规律对问题的影响,适合求解成本收益类的问题;区间优化^[17]是基于不确定变量的上下界求解目标函数的上下界,与最恶劣场景没有严格的对应关系;鲁棒优化^[18]旨在寻找最恶劣场景下的最优解,更适用于求解配电网运行安全相关优化问题,并且鲁棒优化不需要大量统计数据,模型构造相对简单,可以很好地保证解的可行性,近年来被大量应用于电力系统的经济调度和规划问题中。

鲁棒优化描述不确定变量的常用方法为盒式不确定集。实际系统中,可再生能源发电出力往往不会同时到达区间端点,通常需要加入不确定性预算,并根据实际情况对其进行调节。本文采用带有不确定预算的盒式不确定集对风电、光伏的发电出力进行描述,描述方法如下:

$$\left\{ \begin{array}{l} \left| \frac{P_{pv,i} - \bar{P}_{pv,i}}{\bar{P}_{pv,i}} \right| \leq \alpha_{pv,i}, \left| \frac{P_{wd,j} - \bar{P}_{wd,j}}{\bar{P}_{wd,j}} \right| \leq \alpha_{wd,j} \\ \sum \alpha_{pv,i} + \sum \alpha_{wd,j} \leq \Gamma \end{array} \right. \quad (1)$$

其中, $\bar{P}_{pv,i}$ 、 $\bar{P}_{wd,j}$ 分别为第 i 个光伏、第 j 台风机的发电出力基值, $P_{pv,i}$ 、 $P_{wd,j}$ 为相应的发电出力实际值; $\alpha_{pv,i}$ 、 $\alpha_{wd,j}$ 分别为光伏、风机的波动幅度; Γ 为不确定预算,其取值越大,鲁棒优化的保守性越强, Γ 的取值可以根据实际情况设定或由中心极限定理确定。

2 交直流混合配电网的控制模型

广义地,交直流混合配电网是指含有直流环节的配电网,直流环节可以是柔性开关或直流系统。本文重点对含直流系统的交直流混合配电网开展研究。

2.1 VSC 控制模型

换流器是实现直流系统与交流系统连接的重要设备,VSC 因其具有良好的可控性和双向潮流的特点而受到广泛关注。VSC 可以同时控制 2 个运行参数,根据控制参数的不同,可分为多种控制方式,最典型的有以下 4 种方式: PQ 控制,交流侧有功功率与无功功率为定值; $U_{dc}Q$ 控制,直流侧电压与交流侧无功功率为定值; $U_{ac}\theta$ 控制,交流侧电压与交流侧相角为定值; $U_{ac}P$ 控制,交流侧电压与交流侧有功功率为定值。

2.2 VSC 协调控制模型

在交直流混合配电网中,可以通过对 VSC 的控制实现对整个交直流混合配电网运行方式的灵活调整。VSC 之间的协调控制可分为主从控制和多点电压下垂控制,本文主要针对主从控制方式开展研究,其示意图如图 1 所示。在主从控制方式下,通常会指定某个 VSC 作为主换流站,控制方式为 $U_{dc}Q$ 控

制;其他换流器为从换流站,控制方式为 PQ 控制。图 1 中选定 VSC_1 为主换流站, VSC_2 和 VSC_3 为从换流站。

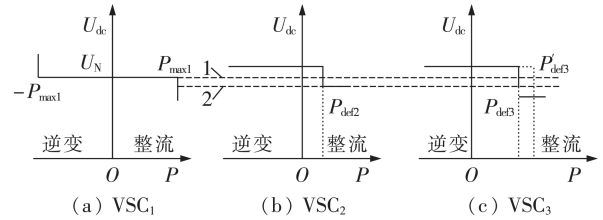


图1 VSC主从协调控制

Fig.1 Master-slave coordinated control of VSC

当直流系统运行方式发生变化时,VSC 的控制模式有以下 2 种调整方式。

(1)从换流站的控制方式和控制参数保持不变,由主换流站承担功率的变化。若主换流站传输的功率达到上限,需要切换主换流站。如图 1 所示,假定由于系统运行状态变化, VSC_1 传输功率达到其上限,此时 VSC_2 切换为主换流站, VSC_1 切换为从换流站,系统运行状态由曲线 1 切换至曲线 2。

(2)根据运行方式的变化调整从换流站的控制参数。如图 1 所示, VSC_3 的有功功率设定值由 P_{def3} 调整至 P'_{def3} 。

实际运行中,通过合理地调整各换流站的控制模式和控制参数,可以改变整个交直流配电系统的运行方式,有助于提升电网对可再生能源的适应性和负荷供给能力。

3 基于鲁棒优化的交直流混合配电网供电能力评估模型及求解方法

3.1 交直流混合配电网供电能力评估模型

3.1.1 目标函数

基于鲁棒优化的交直流混合配电网供电能力是指当可再生电源发电出力在特定区间内波动时,配电网在安全运行前提下沿既定负荷增长方向所能供给的最大负荷,具体模型如下:

$$\min_{[P_{wd}, P_{pv}]} \max f = \lambda \sum_{i=1}^N \Delta P_L(i) + \sum_{i=1}^N P_{L0}(i)$$

其中, λ 为系统供电能力裕度指标; $\Delta P_L(i)$ 为归一化的节点 i 有功负荷增长系数; $P_{L0}(i)$ 为节点 i 的负荷基值; N 为负荷节点总数; $[P_{wd}, P_{pv}]$ 为风机、光伏出力的波动区间向量。

3.1.2 约束条件

(1)等式约束。

$$P_{DG}(i) - P_L(i) = U_i \sum_{j \in i} U_j (G_{ij} \cos \theta_{ij} + B_{ij} \sin \theta_{ij}) \quad (2)$$

$$Q_{DG}(i) - Q_L(i) = U_i \sum_{j \in i} U_j (G_{ij} \sin \theta_{ij} - B_{ij} \cos \theta_{ij}) \quad (3)$$

$$P_{DG}(i) - P_L(i) = U_i^d \sum_{j=1}^n G_{ij}^d U_j^d \quad (4)$$

$$P_L(i) = P_{L0}(i) + \lambda \Delta P_L(i) \quad (5)$$

$$Q_L(i) = P_L(i) \tan \varphi_i \quad (6)$$

其中, U_i 、 U_i^d 分别为交流节点、直流节点的电压幅值; G_{ij} 、 B_{ij} 和 θ_{ij} 分别为交流节点之间的互导、互纳和相角差; G_{ij}^d 为直流节点之间的互导; n 为直流节点总数; $P_{DG}(i)$ 、 $P_L(i)$ 和 $Q_{DG}(i)$ 、 $Q_L(i)$ 分别为节点 i 所连可再生能源、负荷的有功功率和无功功率; φ_i 为节点 i 的负荷功率因数角。

(2) 不等式约束。

$$U_{i,\min} \leq U_i \leq U_{i,\max} \quad (7)$$

$$|I_{ij}| \leq I_{ij,\max} \quad (8)$$

$$S_{T,\min} \leq S_T \leq S_{T,\max} \quad (9)$$

$$S_{VSCk,\min} \leq S_{VSCk} \leq S_{VSCk,\max} \quad (10)$$

$$(1 - \alpha_i) \bar{P}_{DG}(i) \leq P_{DG}(i) \leq (1 + \alpha_i) \bar{P}_{DG}(i) \quad (11)$$

其中, I_{ij} 为节点 i 和 j 之间线路的电流; $U_{i,\max}$ 、 $U_{i,\min}$ 分别为节点电压上、下限; $I_{ij,\max}$ 为支路电流上限; $S_{T,\max}$ 、 $S_{T,\min}$ 分别为变压器负载上、下限; $S_{VSCk,\max}$ 、 $S_{VSCk,\min}$ 分别为 VSC 负载上、下限; $\bar{P}_{DG}(i)$ 为可再生能源发电出力基值; α_i 为波动幅度。

3.2 供电能力评估方法

由于评估模型涉及交直流换流器的优化控制和交直流潮流计算,直接采用锥优化、Benders 分解法等进行求解较为困难。本文借鉴文献[19]的处理方法,构建双层迭代求解模型。外层采用重复潮流法确定系统新增负荷水平,并采用遗传算法判定当前供电水平下可再生能源发电出力的随机波动是否影响系统运行安全;内层针对系统运行安全被破坏的情况,采用粒子群优化算法对调控设备进行优化。交直流混合配电网潮流算法采用文献[20]中的算法,以下为评估步骤。

(1) 设定负荷基值 $P_{L0}(i)$ 和功率因数角 φ_i 、归一化有功负荷增长系数 $\Delta P_L(i)$ 、供电能力裕度指标 λ 、有功负荷增长步长 h 、截止阈值 ε 、VSC 控制策略等初始参数。

(2) 在给定初始参数的基础上,依据式(5)和式(6)计算各节点负荷。

(3) 判断新负荷水平下在可再生能源发电出力波动区间内系统运行安全性是否会被破坏。如果系统保持安全运行状态,则 $\lambda = \lambda + h$,返回步骤(2),否则转至步骤(4)。

(4) 通过优化调控设备判断系统是否可以重新回到安全运行状态。如果可以,则返回步骤(2);否则将系统负荷水平还原至本次未增长时的水平,并置负荷增长步长 $h = h / 4$ 。判断 h 是否小于给定的阈

值 ε ,如果小于截止阈值 ε ,转至步骤(5),否则返回步骤(2)。

(5) 计算结束,输出供电能力计算结果。

3.2.1 系统运行安全性判定

系统运行安全性判定需要针对新的负荷水平,分析判断可再生能源发电出力在波动区间内变化时,配电网是否会出现节点电压越限、支路电流越限、变压器负载越限和 VSC 负载越限等运行安全性问题。由于电力系统的强非线性,上述指标的越限往往对应不同的可再生能源发电出力组合。为此,需针对各个指标进行逐一判定。

鉴于遗传算法具有较强的寻优能力,本文采用遗传算法以系统最低节点电压、最高节点电压、最大支路电流、最高变压器负载、最高 VSC 负载这 5 项指标作为适应度函数分别进行安全性判定。个体编码如下:

$$X = [P_{DG}(1), \dots, P_{DG}(i), \dots, P_{DG}(N_{DG})] \quad (12)$$

其中, N_{DG} 为不可控可再生能源总数。

基于遗传算法计算的结果,若任何一项指标超过其安全运行极限,系统安全运行就可能被破坏。

3.2.2 调控设备优化

针对系统运行安全性被破坏的情况,通过调整 VSC 控制模式和控制参数等措施帮助系统重新恢复到安全运行状态。

本文提出了一种系统调控设备优化控制模型,优化目标为各节点电压、支路电流、变压器负载和 VSC 负载与参考值的偏差最小。由于各个指标采用的量纲不同,难以直接相加,本文采用线性加权的方法作为评价函数对运行风险进行描述,描述方法如下:

$$\begin{aligned} \min f_{risk} = & \omega_1 |U_{\min} - U_*| + \omega_2 |U_{\max} - U_*| + \\ & \omega_3 [\text{sign}(I_{\max} - I_*) + 1] + \omega_4 [\text{sign}(R_{T,\max} - R_{T,*}) + 1] + \\ & \omega_5 [\text{sign}(R_{VSC,\max} - R_{VSC,*}) + 1] \end{aligned} \quad (13)$$

其中, $\omega_1 - \omega_5$ 为各个风险指标的权重,考虑到系统运行时,一般不允许出现设备容量越界,而节点电压越接近 1 p.u. 表明系统运行安全性越强,故 $\omega_3 - \omega_5$ 的取值会远大于 ω_1 、 ω_2 的取值; $U_{\min}$ 、 $U_{\max}$ 、 $I_{\max}$ 、 $R_{T,\max}$ 和 $R_{VSC,\max}$ 分别为潮流计算结果中全系统节点电压最小值、节点电压最大值、支路电流最大值、变压器负载率最大值和 VSC 负载率最大值, U_* 、 I_* 、 $R_{T,*}$ 和 $R_{VSC,*}$ 分别为上述电气量的参考值; $\text{sign}()$ 为阶跃函数,用于判断变量是否越界。

本文采用粒子群优化算法对上述模型进行求解。以 f_{risk} 作为评价函数,以定功率模式下 VSC 的有功和无功功率设定值作为粒子位置进行寻优。

4 算例分析

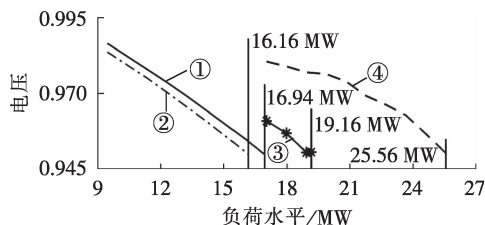
本文算例是在文献[20]算例的基础上进行适当改造,电网拓扑如附录中图A1所示。交流电网电压等级为10 kV,直流电网电压等级为 ± 10 kV,总负荷为 $9.46+j5.54 \text{ MV}\cdot\text{A}$,系统参数详见附录中表A1和表A2。VSC的协调控制策略如下:VSC₁采用 $U_{dc}Q$ 控制,VSC₂和VSC₃采用 PQ 控制;VSC₂和VSC₃的有功功率值设定为直流配电网净负荷的 $1/3$,剩余负荷和网损由VSC₁承担,所有VSC的无功功率值设定为0。系统共接入1座分布式风力发电站(Wind₁)和7座分布式光伏电站(PV₁—PV₇),接入位置见附录中图A1,出力基值分别为0.2、0.5、0.8、0.8、0.8、0.8、0.8 MV·A,波动区间范围为 $\pm 10\%$, Γ 的初始值为0.8。其中,PV₂—PV₇的功率因数为0.95(超前)。负荷增长系数向量 ΔP_L 由初始负荷 P_{L0} 进行归一化计算后获得,在负荷增长过程中假定功率因数保持恒定,初始时 $\lambda=0$,步长 h 为总有功负荷的10%, $\varepsilon=0.05h$, $\omega_1=\omega_2=1$, $\omega_3=\omega_4=\omega_5=100$, U_* 、 I_* 、 $R_{T,*}$ 和 $R_{VSC,*}$ 均为1 p.u.。

4.1 供电能力评估

为说明本文所提方法的效果,设置4种不同的分析情景,分别求解其供电能力。情景1:不考虑可再生能源发电设备的波动性,基于确定性的方法求解系统的供电能力。情景2:基于鲁棒优化的思想求解计及可再生能源波动性的系统供电能力,但不对VSC控制模式和参数进行优化。情景3:在情景2的基础上,针对系统安全性被破坏的情况对VSC₂和VSC₃的有功控制参数进行优化。情景4:在情景2的基础上,针对系统安全性被破坏的情况对VSC₂和VSC₃的有功和无功控制参数同时进行优化。

计算得到上述4种情景下的系统供电能力如图2所示。图中电压为标幺值。4种情景下的最大供电能力分别为16.94、16.16、19.16和25.56 MW。4种情景下系统供电能力的限制因素都是交流配电网2的节点85电压水平偏低。各情景下系统达到最大供电能力时的交直流配电网间的功率流向如图3所示。图中正值表示整流,负值表示逆变。

由图2和图3可知,情景2与情景1相比,考虑了



① 情景1, ② 情景2, ③ 情景3, ④ 情景4

图2 不同负荷水平下节点电压

Fig.2 Node voltage under different load levels

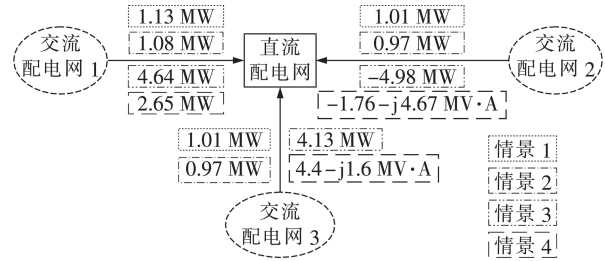


图3 各情景下交直流配电网潮流

Fig.3 Power flow of AC/DC distribution network in four scenarios

可再生能源波动性,计算得到的最大供电能力减少了0.78 MW。对比2种情景下的可再生能源发电出力,情景2下可再生能源发电出力处于波动区间下界,表明可再生能源发电对提高系统供电能力有利。同时,由于可再生能源本身固有的随机波动性,采用确定性的供电能力评估方法存在一定的偏差。情景3与情景2相比,考虑了对VSC₂和VSC₃的有功参数进行优化,使得系统供电能力提高了3 MW。对比图3中情景2和情景3下的VSC控制参数,可以看出,VSC₂控制参数由0.97 MW变为-4.98 MW,说明直流配电网由从交流配电网2得到有功支撑变为向交流配电网2提供有功支撑。由于交流配电网2的节点85距离VSC₂注入节点较近,相比情景2能够获得更好有功支撑,从而有利于提高整个系统的供电能力。情景4与情景3相比,考虑了对VSC₂和VSC₃的有功和无功控制参数同时进行优化,使得系统的供电能力提高了6.4 MW。对比图3中情景3和情景4下的VSC控制参数可以看出,VSC₂的控制参数由-4.98 MW变为-1.76-j4.67 MV·A,表明VSC₂虽然减小了向交流配电网2提供的有功支撑,但提供了大量的无功支撑。因为无功对电压幅值的影响比有功更明显,提供较多的无功支撑能够进一步改善交流配电网2的电压水平,从而进一步提高整个系统的供电能力。

4.2 影响因素分析

在不改变网架拓扑、线路参数、系统负荷和可再生能源规划位置的情况下,影响供电能力的主要因素包括VSC容量、VSC控制模式、控制主站选择、可再生能源的渗透率 and 不确定预算。下面以情景4为例,对上述影响因素逐一展开分析。

4.2.1 VSC容量的影响

在情景4下系统达到最大供电能力时,VSC₂的负载达到最大容量,VSC₁和VSC₃的负载均未达到最大容量,说明VSC₂的容量是系统供电能力的制约因素。计算不同VSC₂容量下的供电能力如图4所示。从图4可以看出,系统供电能力受VSC₂容量影响较大,随着VSC₂容量的增大而增加,但VSC₂每增加1 MV·A的容量,供电能力增长幅度逐渐变小。

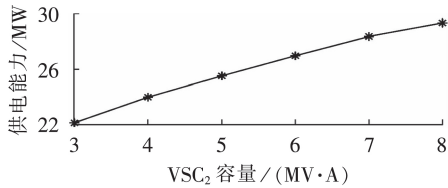
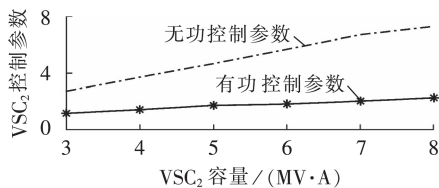
图4 不同VSC₂容量下的最大供电能力Fig.4 Maximum power supply capacity under different VSC₂ capacities

图5为不同容量下的VSC₂最优控制参数变化情况。可见随着VSC₂容量的增大,有功和无功控制参数都有所增加,但无功控制参数的增加幅度要大于有功控制参数,这表明VSC₂的无功支撑对系统供电能力的提升作用更为明显。

图5 不同容量下的VSC₂最优控制参数Fig.5 Optimal control parameters under different VSC₂ capacities

4.2.2 VSC控制模式的影响

将VSC₂控制模式由PQ控制切换为 $U_{ac}P$ 控制,即保持交流侧电压幅值和有功功率恒定,其他VSC控制模式保持不变。在不同的VSC₂交流侧电压幅值设定值下,对有功控制参数进行优化,计算相应的供电能力结果如表1所示。表中,交流侧电压设定值、最低电压均为标幺值, S_{VSC2} 、 P_{VSC2} 、 Q_{VSC2} 分别为流经VSC₂的视在功率、有功功率和无功功率。

表1 交流侧电压设定值的影响情况
Table 1 Influence of reference value of AC-side voltage of VSC₂

交流侧电压设定值	供电能力 / MW	最低电压	$S_{VSC2} / (MV \cdot A)$	P_{VSC2} / MW	$Q_{VSC2} / Mvar$
1.000	21.54	0.9708	5.00	1.55	4.75
0.995	23.00	0.9651	5.00	1.69	4.70
0.990	24.76	0.9576	5.00	1.71	4.69
0.987	25.56	0.9506	4.99	1.76	4.67
0.985	24.98	0.9505	4.96	1.82	4.61
0.980	23.90	0.9504	4.06	2.32	3.33
0.975	21.92	0.9502	3.20	2.39	2.19

由表1可以看出,当电压幅值设定为0.990~1.000 p.u.时,VSC容量是制约供电能力的主要因素;当电压幅值设定为0.975~0.985 p.u.时,电压成为制约供电能力的主要因素;当电压幅值设定为0.987 p.u.时,供电能力近似达到最大值为25.56 MW,与有功无功联合优化的计算结果相等。

4.2.3 控制主站的影响

VSC协调控制策略仍采用主从控制,但将VSC₁切换为PQ控制,VSC₃切换为 $U_{dc}Q$ 控制,计算得到系统最大供电能力为25.23 MW。可以看出,主换流站的不同对系统供电能力影响较小。

4.2.4 可再生能源渗透率对供电能力的影响

计算得到不同可再生能源渗透率下系统供电能力如图6所示。从图6中可以看出,可再生能源的接入有利于系统供电能力的提升,渗透率从30%提高到80%,供电能力提高了6.62 MW,且二者近似成线性关系。

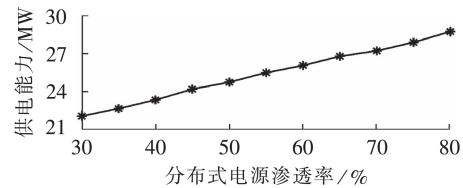


图6 不同可再生能源渗透率下的供电能力

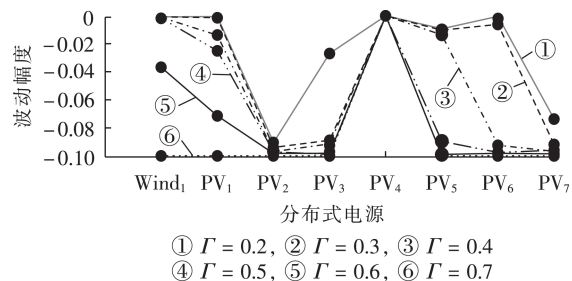
Fig.6 Power supply capacity under different penetration ratios of renewable energy

4.2.5 不确定预算的影响

考虑不确定预算 Γ 变化的情况,系统供电能力和可再生能源出力波动如表2和图7所示。从表2中可以看出,随着 Γ 的增加,计算模型的保守性逐渐增强,供电能力逐渐减小。通过观察图7中各可再生能源出力波动性的变化情况可以看出,随着 Γ 的增加,PV₂、PV₇、PV₃、PV₆、PV₅、PV₁、Wind₁的出力依次到达波动区间的下限。这个顺序基本与该发电设备和节点85间电气距离的远近保持一致,说明距离关键节点越近的可再生能源发电设备对供电能力的影响越大。同时,由图7可以看出,在 Γ 变化过程中,光伏发电设备PV₄的出力一直保持不变,这主要是

表2 Γ 对供电能力的影响Table 2 Impact of Γ on power supply capacity

Γ	供电能力 / MW	Γ	供电能力 / MW
0.2	26.53	0.5	25.85
0.3	26.30	0.6	25.66
0.4	26.08	0.7	25.56

图7 不同 Γ 下的可再生能源出力波动Fig.7 Fluctuation of renewable energy output under different values of Γ

由于PV₄所在节点与节点85间被主换流站VSC₁分割为互不影响的两部分。

5 结论

高比例可再生能源接入和交直流混合配电技术的应用使得配电网呈现新的运行特征,传统的供电能力评估方法不再适用。本文提出一种适用于高比例可再生能源接入的中压交直流混合配电网的供电能力评估方法,通过算例分析可以得出结论如下:

(1)本文所提模型充分考虑了可再生能源的随机波动性,评估结果能更好地指导系统在不确定环境下的安全运行;

(2)通过交直流换流器等调控设备,尤其是对交直流换流器无功控制参数的合理优化,可以最大限度地挖掘系统潜力,显著提高其供电能力;

(3)在不改变网架拓扑结构和线路参数的前提下,通过VSC扩容能够有效提高系统的供电能力,同时,可再生能源渗透率的提升在一定程度上也有助于提高系统供电能力。

本文在模型和算法方面还有诸多可继续深入研究之处。在模型方面,如何合理考虑储能、联络开关等的影响是未来的研究方向;在算法方面,采用内点法和锥优化方法缩短计算时间是下一步研究重点。

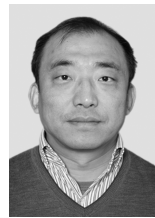
附录见本刊网络版(<http://www.epae.cn>)。

参考文献:

- [1] 肖峻,蒋迅,郭伟,等. 分区柔性互联城市电网的最大供电能力分析[J]. 电力自动化设备,2017,37(8):66-73.
XIAO Jun, JIANG Xun, GUO Wei, et al. Total power-supply capability of urban power grid with flexibly-interconnected partitions[J]. Electric Power Automation Equipment, 2017, 37(8):66-73.
- [2] 郭焱林,刘俊勇,魏震波,等. 配电网供电能力研究综述[J]. 电力自动化设备,2018,38(1):33-43.
GUO Yanlin, LIU Junyong, WEI Zhenbo, et al. Load supply capacity of distribution network[J]. Electric Power Automation Equipment, 2018, 38(1):33-43.
- [3] 肖峻,谷文卓,郭晓丹,等. 配电系统供电能力模型[J]. 电力系统自动化,2011,35(24):47-52.
XIAO Jun, GU Wenzhuo, GUO Xiaodan, et al. A supply capability model for distribution systems[J]. Automation of Electric Power Systems, 2011, 35(24):47-52.
- [4] 肖峻,祖国强,贺琪博,等. 馈线联络对配电网最大供电能力的作用机理[J]. 电力系统自动化,2015,39(8):38-44,52.
XIAO Jun, ZU Guoqiang, HE Qibo, et al. Influence mechanism of feeder links on total supply capability for distribution networks[J]. Automation of Electric Power Systems, 2015, 39(8):38-44,52.
- [5] 靳小龙,穆云飞,贾宏杰,等. 面向最大供电能力提升的配电网主动重构策略[J]. 电工技术学报,2014,29(12):137-147.
JIN Xiaolong, MU Yunfei, JIA Hongjie, et al. An active reconfiguration strategy for distribution network based on maximum power supply capability[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2014, 29(12):137-147.
- [6] 肖峻,刘世嵩,李振生,等. 基于潮流计算的配电网最大供电能力模型[J]. 中国电机工程学报,2014,34(31):5516-5524.
XIAO Jun, LIU Shisong, LI Zhensheng, et al. Model of total supply capability for distribution network based on power flow calculation[J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(31):5516-5524.
- [7] 肖峻,张苗苗,司超然,等. 配电网的供电能力分布[J]. 电网技术,2017,41(10):3326-3335.
XIAO Jun, ZHANG Miaomiao, SI Chaoran, et al. Supply capability distribution of distribution systems[J]. Power System Technology, 2017, 41(10):3326-3335.
- [8] 肖峻,龙梦皓,程敏,等. 计及变电站低压侧接线的配电网最大供电能力计算与分析[J]. 电力自动化设备,2018,38(2):18-27.
XIAO Jun, LONG Menghao, CHENG Min, et al. Calculation and analysis of total supply capability of distribution network considering connection mode at low voltage side of substation[J]. Electric Power Automation Equipment, 2018, 38(2):18-27.
- [9] 刘洪,李吉峰,张家安,等. 考虑可靠性的中压配电系统供电能力评估[J]. 电力系统自动化,2017,41(12):154-160.
LIU Hong, LI Jifeng, ZHANG Jiaan, et al. Power supply capability evaluation of medium voltage distribution system considering reliability[J]. Automation of Electric Power Systems, 2017, 41(12):154-160.
- [10] 肖峻,李思岑,王丹,等. 计及用户分级与互动的配电网最大供电能力模型[J]. 电力系统自动化,2015,39(17):19-25.
XIAO Jun, LI Sichen, WANG Dan, et al. Model of total supply capability for distribution network considering customer classification and interaction[J]. Automation of Electric Power Systems, 2015, 39(17):19-25.
- [11] 张嘉堃,韦钢,朱兰,等. 基于盲数模型的含分布式电源配电网供电能力评估[J]. 电力系统自动化,2016,40(8):64-70.
ZHANG Jiakun, WEI Gang, ZHU Lan, et al. Blind-number model based power supply capability evaluation of distribution networks with distributed generators[J]. Automation of Electric Power Systems, 2016, 40(8):64-70.
- [12] 高亚静,朱静,程华新,等. 计及不确定性因素基于多场景的主动配电系统短期供电能力评估[J]. 中国电机工程学报,2016,36(22):6076-6085.
GAO Yajing, ZHU Jing, CHENG Huaxin, et al. Evaluation on the short-term power supply capacity of active distribution system based on multiple scenarios considering uncertainties[J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(22):6076-6085.
- [13] 肖峻,刚发运,黄仁乐,等. 柔性配电网的最大供电能力模型[J]. 电力系统自动化,2017,41(5):30-38.
XIAO Jun, GANG Fayun, HUANG Renle, et al. Total supply capability model for flexible distribution network[J]. Automation of Electric Power Systems, 2017, 41(5):30-38.
- [14] 叶莘,韦钢,马雷鹏,等. 含分布式电源的直流配电网供电能力评估[J]. 电力系统自动化,2017,41(9):58-64.
YE Shen, WEI Gang, MA Leipeng, et al. Power supply capability evaluation of DC distribution network with distributed generator[J]. Automation of Electric Power Systems, 2017, 41

- (9):58-64.
- [15] 杨洪明,王爽,易德鑫,等. 考虑多风电场出力相关性的电力系统随机优化调度[J]. 电力自动化设备,2013,33(1):114-120.
YANG Hongming, WANG Shuang, YI Dexin, et al. Stochastic optimal dispatch of power system considering multi-wind power correlation[J]. Electric Power Automation Equipment, 2013, 33(1):114-120.
- [16] 任建文,渠卫东. 基于机会约束规划的孤岛模式下微电网动态经济调度[J]. 电力自动化设备,2016,36(3):73-78.
REN Jianwen, QU Weidong. Dynamic economic dispatch based on chance-constrained programming for islanded microgrid[J]. Electric Power Automation Equipment, 2016, 36(3):73-78.
- [17] 张刘冬,袁宇波,孙大雁,等. 基于两阶段鲁棒区间优化的风储联合运行调度模型[J]. 电力自动化设备,2018,38(12):59-66,93.
ZHANG Liudong, YUAN Yubo, SUN Dayan, et al. Joint Operation model of wind-storage system based on two-stage robust interval optimization [J]. Electric Power Automation Equipment, 2018, 38(12):59-66,93.
- [18] 王婷婷,白晓清,李佩杰,等. 计及可再生能源不确定性的配电网鲁棒最优潮流[J]. 电力自动化设备,2018,38(6):87-94.
WANG Tingting, BAI Xiaoqing, LI Peijie, et al. Robust optimal power flow in distribution network considering uncertainty of renewable distributed generation [J]. Electric Power Automation Equipment, 2018, 38(6):87-94.
- [19] 张海鹏,林舜江,刘明波. 考虑光伏不确定性的低压配电网分散无功补偿鲁棒优化配置[J]. 电网技术,2016,40(12):3880-3887.
ZHANG Haipeng, LIN Shunjiang, LIU Mingbo. Robust optimal allocation of reactive power compensation in low voltage distribution networks considering uncertainty of photovoltaic generation [J]. Power System Technology, 2016, 40(12):3880-3887.
- [20] 孙充勃,李鹏,王成山,等. 含多直流环节的混合结构有源配电网潮流计算方法[J]. 电力系统自动化,2015,39(21):59-65.
SUN Chongbo, LI Peng, WANG Chengshan, et al. A novel power flow algorithm for active distribution system with multiple DC components [J]. Automation of Electric Power Systems, 2015, 39(21):59-65.

作者简介:



魏 炜

魏 炜(1976—),男,宁夏石嘴山人,副教授,博士,主要研究方向为智能配电网、综合能源系统规划及评估(E-mail:weiw@tju.edu.cn);

赵学良(1993—),男,河北唐山人,硕士研究生,通信作者,主要研究方向为配用电系统综合评估(E-mail:zhaoxueliang@tju.edu.cn);

朱 洁(1971—),女,北京人,工程师,硕士,主要研究方向为智能配电网规划(E-mail:Zhujiej11@sina.com)。

Power supply capability evaluation of AC / DC hybrid distribution network based on robust optimization

WEI Wei¹, ZHAO Xueliang¹, ZHU Jie², XU Tao¹, ZHAO He², LI Zijin², LUO Fengzhang¹

(1. Key Laboratory of Smart Grid of Ministry of Education, Tianjin University, Tianjin 300072, China;

2. State Grid Beijing Electric Power Company, Beijing 100031, China)

Abstract: A power supply capacity evaluation method for medium voltage AC / DC hybrid distribution network is presented. Based on the idea of robust optimization, a power supply capacity evaluation model is constructed for the stochastic volatility of renewable energy. In view of the damage of operation safety, the optimal control strategy of AC / DC converter and other control equipments are proposed to fully exploit the power supply potential of the system. The results of the example show that the proposed method can reasonably evaluate the power supply capacity of the AC / DC hybrid distribution network in uncertain environment and can provide references for the safe operation of distribution network.

Key words: AC / DC hybrid distribution network; power supply capacity; high penetration of renewable energy; robust optimization

附 录

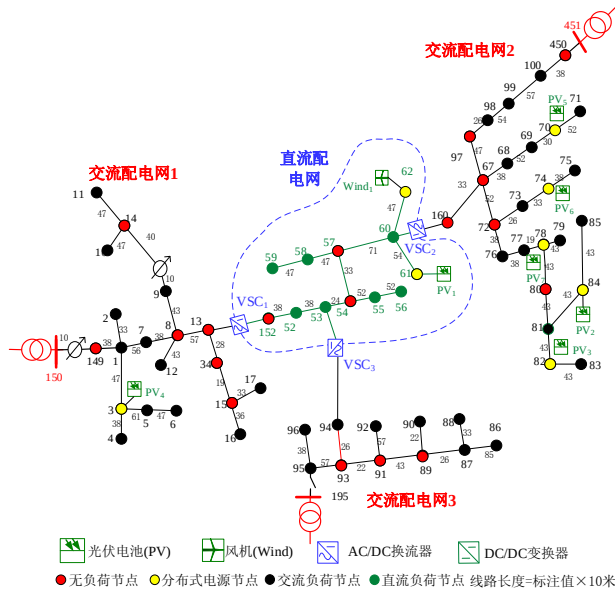


图 A1 交直流混合配电网结构

Fig.A1 Structure of AC/DC hybrid distribution network

表 A1 负荷数据

Table A1 Load data

节点 编号	负荷类 型	A 相		B 相		C 相	
		有功 /kW	无功 /kvar	有功 /kW	无功 /kvar	有功 /kW	无功 /kvar
1	Y-PQ	80	60	80	60	80	60
2	Y-PQ	40	30	40	30	40	30
4	Y-PQ	80	60	80	60	80	60
5	Y-I	40	30	40	30	40	30
6	Y-Z	80	60	80	60	80	60
7	Y-PQ	40	30	40	30	40	30
9	Y-PQ	80	60	80	60	80	60
10	Y-I	40	30	40	30	40	30
11	Y-Z	80	60	80	60	80	60
12	Y-PQ	40	30	40	30	40	30
16	Y-PQ	80	60	80	60	80	60
17	Y-PQ	40	30	40	30	40	30
68	Y-PQ	40	30	40	30	40	30
69	Y-PQ	80	60	80	60	80	60
70	Y-PQ	40	30	40	30	40	30
71	Y-PQ	80	60	80	60	80	60
73	Y-PQ	80	60	80	60	80	60
74	Y-Z	80	60	80	60	80	60
75	Y-PQ	80	60	80	60	80	60
76	D-I	70	75	70	75	70	75
77	Y-PQ	80	60	80	60	80	60
79	Y-Z	80	60	80	60	80	60
81	Y-PQ	80	60	80	60	80	60
83	Y-PQ	40	30	40	30	40	30
85	Y-PQ	80	60	80	60	80	60
86	Y-PQ	80	60	80	60	80	60
87	Y-PQ	80	60	80	60	80	60
88	Y-PQ	80	60	80	60	80	60
90	Y-I	80	60	80	60	80	60
92	Y-PQ	80	60	80	60	80	60
94	Y-PQ	80	60	80	60	80	60
95	Y-PQ	40	30	40	30	40	30

96	Y-PQ	40	30	40	30	40	30
98	Y-PQ	80	60	80	60	80	60
99	Y-PQ	80	60	80	60	80	60
100	Y-Z	80	60	80	60	80	60
交流 负荷 汇总	7290+ j5535	2430	1845	2430	1845	2430	1845
52	Y-P	400	0	0	0	0	0
53	Y-P	400	0	0	0	0	0
55	Y-P	300	0	0	0	0	0
56	Y-P	300	0	0	0	0	0
58	Y-P	300	0	0	0	0	0
59	Y-P	235	0	0	0	0	0
60	Y-P	235	0	0	0	0	0
直流 负荷 汇总		2170					

表 A2 线路数据

Table A2 Line data

首端节点	末端节点	导线型号	长度/km
1	2	JKLYJ-150	0.33144
1	3	JKLYJ-150	0.47348
1	7	JKLYJ-240	0.56818
3	4	JKLYJ-150	0.37879
3	5	JKLYJ-150	0.61553
5	6	JKLYJ-150	0.47348
7	8	JKLYJ-240	0.37879
8	12	JKLYJ-150	0.42614
8	9	JKLYJ-150	0.42614
8	13	JKLYJ-240	0.56818
202	14	JKLYJ-150	0.40492
13	34	JKLYJ-150	0.28409
14	11	JKLYJ-150	0.47348
14	10	JKLYJ-150	0.47348
15	16	JKLYJ-150	0.36023
15	17	JKLYJ-150	0.33288
34	15	JKLYJ-150	0.18939
67	68	JKLYJ-150	0.37879
67	72	JKLYJ-150	0.52083
67	97	JKLYJ-240	0.47348
68	69	JKLYJ-150	0.52083
69	70	JKLYJ-150	0.30553
70	71	JKLYJ-150	0.52083
72	73	JKLYJ-150	0.26083
72	76	JKLYJ-150	0.37879
73	74	JKLYJ-150	0.33288
74	75	JKLYJ-150	0.38758
76	77	JKLYJ-150	0.38758
77	78	JKLYJ-150	0.18939
78	79	JKLYJ-150	0.42614
78	80	JKLYJ-150	0.42614
80	81	JKLYJ-150	0.42614
81	82	JKLYJ-150	0.42614
82	83	JKLYJ-150	0.42614
81	84	JKLYJ-150	0.42614
84	85	JKLYJ-150	0.42614
86	87	JKLYJ-150	0.43227
87	88	JKLYJ-150	0.33144
87	89	JKLYJ-150	0.26083
89	90	JKLYJ-150	0.21614
89	91	JKLYJ-150	0.42614
91	92	JKLYJ-150	0.56818
91	93	JKLYJ-150	0.21614
93	94	JKLYJ-240	0.26083
93	95	JKLYJ-240	0.56818
95	96	JKLYJ-150	0.37879
97	98	JKLYJ-240	0.26083
98	99	JKLYJ-240	0.54167

99	100	JKLYJ-240	0.56818
100	450	JKLYJ-240	0.38515
149	1	JKLYJ-240	0.38758
160	67	JKLYJ-240	0.33288
150	201	JKLYJ-240	0.1
9	202	JKLYJ-150	0.1
201	149	SWCH	1
450	451	SWCH	1
195	95	SWCH	1
152	52	DCL10	0.38758
52	53	DCL10	0.37879
53	54	DCL10	0.23674
54	55	DCL10	0.52083
55	56	DCL10	0.52083
57	58	DCL10	0.47348
57	60	DCL10	0.71045
58	59	DCL10	0.47348
60	61	DCL10	0.54167
60	62	DCL04	0.47348
54	57	DCL10	0.33288