

城市电网分区柔性互联装置的定容方法

肖峻¹, 蒋迅¹, 黄仁乐², 张凯³, 舒彬³, 郭伟⁴

(1. 智能电网教育部重点实验室, 天津大学, 天津市 300072; 2. 国网北京市电力公司, 北京市 100031;
3. 北京电力经济技术研究院, 北京市 100055; 4. 国网天津市电力公司, 天津市 300000)

摘要: 分区柔性互联是解决大型城市交流电网发展问题的一个新思路, 容量是影响互联装置造价的关键因素。提出了分区互联装置的定容方法。首先, 介绍了城市电网分区互联装置的基本概念。其次, 分析了基于模块化多电平换流器(MMC)的分区互联装置的功率运行范围, 建立了装置容量和最大无功输出的分段线性关系, 并分析得出改善无功输出能力的方法, 为定容方法提供依据。然后, 依据有功需求和无功需求, 提出装置定容方法, 其中, 有功需求是为了解决分区故障后的元件过载问题所需支援的有功功率, 无功需求是为了解决分区发生暂态故障后的电压失稳问题所需支援的动态无功功率。定容方法还考虑了装置的功率支援是否会破坏送端分区安全性或导致联络线过载。最后, 所述方法应用于国内外首个 220 kV 分区柔性互联示范工程的实际方案论证。

关键词: 城市电网; 分区; 互联装置; 无功输出; 过载; 电压失稳

0 引言

高比例可再生能源接入是中国面临的迫切问题, 由于可再生能源随机性和间歇性^[1-3]的特点, 给城市电网带来了一些问题: ① 区外输电逐步取代本地电源, 降低了城市电网的动态调压能力; ② 风电、光伏等可再生能源的大规模发电并网, 还会引起电网电压偏差和电压波动, 影响电能质量^[4-5]; ③ 给电网运行灵活性带来挑战^[6]。

采用柔性电力电子装置可能提高城市电网自身的灵活调节能力, 是改善大规模可再生能源并网现状的一个新思路。目前大型城市电网受制于短路容量的限制和 500 kV/220 kV 电磁环网的安全隐患, 一般采取 220 kV 电压等级分区运行模式^[7]。随着电力电子技术的发展, 分区间通过潮流可控的柔性电力电子装置进行互联, 能在不提供短路电流^[8]的基础上, 增强电网调节能力, 提高电网的安全稳定性, 促进高比例可再生能源的消纳。

柔性互联后主要作用体现在两个方面: 一方面, 实现分区间功率的互供能缓解城市电网分区运行所面临的电力平衡和 $N-1$ 故障后潮流过载的问题。

另一方面, 分区发生故障的暂态过程中, 互联装置两端都能提供动态无功功率以支撑电网电压, 平抑电压波动, 这为大量可再生能源并网后的电压稳定提供了一个新手段。

目前, 有关城市电网分区互联运行方式下的研究已涉及电网的静态安全性分析^[9]、经济性评估方法^[10]及装置的选址^[11], 但有关装置容量的确定方法在国内外并未见报道。由于分区互联装置的容量大小决定了装置造价, 研究装置定容方法是规划阶段的重要内容。类似的工程是南京西环 220 kV 电网统一潮流控制器(UPFC), 在选择 UPFC 容量时主要考察了未来电网结构和负荷变化情况下装置消除潮流过载问题的作用^[12], 但该工程针对单方向柔性潮流控制, 在两个 220 kV 城网分区间双向柔性潮流控制的装置容量论证尚属空白。本文研究了城市电网分区柔性互联装置的定容问题, 并在国内外首个示范工程方案论证中应用。

1 分区互联装置的基本概念

分区互联装置是指能在不增加短路电流的前提下, 实现城市电网分区间相互联络并能灵活控制联络线潮流的柔性电力电子装置。由于柔性直流换流站占地少^[8], 适合在城市电网中应用, 因此分区互联装置也特指基于柔性直流技术的装置。目前, 分区互联装置尚在示范阶段, 下面就示范工程装置的结构实现和运行模式进行介绍。

收稿日期: 2017-01-20; 修回日期: 2017-04-05。

上网日期: 2017-06-14。

国家高技术研究发展计划(863 计划)资助项目(2015AA050102)。

1.1 装置的结构实现

示范工程分区互联装置采用基于半桥式模块化多电平换流器(MMC)的两端背靠背结构,用于实现两个高压分区间的柔性互联^[13]。

MMC 具有高度模块化的特点,其主电路和控制系统均采用模块化设计,通过调整子模块数量可实现 MMC 系统的电压和功率等级的灵活配置,便于系统扩容,有利于缩短工程设计和加工周期^[14]。同时,MMC 具有公共直流母线,这使得 MMC 可以工作在背靠背的高压大功率有功变换场合,适合本文研究场景。

1.2 装置的运行模式

电网运行状态对装置提出了需求,装置主要工作于以下 3 种运行模式。

1) 模式 1: 负载均衡模式

正常运行状态下,装置在保持紧急支援容量的前提下,根据两个分区的负荷水平,控制有功功率由轻载分区向重载分区流动,以均衡两个分区的负载率并优化潮流分布。

2) 模式 2: 紧急有功支援模式

由于故障或检修而导致某一个分区因有功缺额出现过载时,装置控制有功功率从另一分区向该分区紧急支援,消除过载问题。

3) 模式 3: 动态无功支撑模式

某个分区出现电压失稳风险时,装置紧急提供动态无功功率以支撑电压,避免电压失稳,达到提高暂态电压稳定性的目的。

模式 1 是正常状态,模式 2 和 3 是紧急状态,装置主要目的是紧急状态发挥作用,在保持足够剩余容量的前提下还可参与正常运行时的电压无功优化。

2 分区互联装置的容量和无功输出的关系

未来可再生能源大量并入电网的趋势下,城市电网不得不面临电压稳定和无功补偿方面的问题。现有研究表明,改变 MMC 输出线电压,就可以改变 MMC 与交流电网间等效电抗上的电压,从而改变装置注入电网的无功功率大小。由于 MMC 输出线电压幅值受到电压调制比的约束,因此装置无功输出大小也受到相应约束限制^[15-16]。在提出合理的定容方法前,有必要进一步分析无功功率输出限制,建立装置容量和无功输出的关系,为得到装置的容量需求提供依据。

2.1 功率运行范围

分区互联装置一侧 MMC 接入系统的等效电路如图 1 所示^[15], U_{dc} 为装置直流侧系统的电压, I_{dc} 为

直流电流。通常,MMC 通过联接变压器接入交流系统,将其等效为一个变比为 k 的理想变压器与漏感 L_{tr} 串联, L_0 为桥臂串联电感,忽略 MMC 与联接变压器之间的电阻,则 MMC 与交流系统间的等效电抗 $X_{eq} = \omega(L_{tr} + L_0/2)$ 。

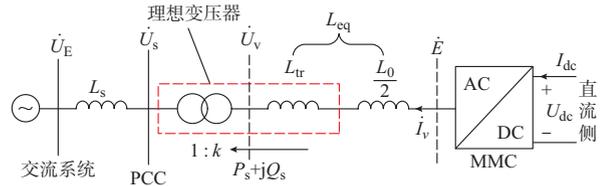


图 1 MMC 接入系统等效电路
Fig.1 Equivalent circuit of MMC connecting to power system

定义图 1 公共连接点 (PCC) 处电压 $\dot{U}_s = U_s \angle 0^\circ$, 联接变压器阀侧电压 $\dot{U}_v = k\dot{U}_s$, MMC 输出线电压 $\dot{E} = E \angle \alpha$ 。设定 PCC 注入交流系统的有功功率为 P_s , 无功功率为 Q_s , 则功率运行约束^[17] 如式(1)所示。

$$\begin{cases} P_s^2 + \left[Q_s + \frac{(kU_s)^2}{X_{eq}} \right]^2 \leq \left(\frac{kU_s E_{max}}{X_{eq}} \right)^2 \\ P_s^2 + \left[Q_s + \frac{(kU_s)^2}{X_{eq}} \right]^2 \geq \left(\frac{kU_s E_{min}}{X_{eq}} \right)^2 \\ P_s^2 + Q_s^2 \leq S_r^2 = (3U_{dc} I_{bN})^2 \end{cases} \quad (1)$$

式中: I_{bN} 为装置的桥臂额定电流; E_{max} 和 E_{min} 分别为装置输出线电压最大值和最小值,分别对应装置的电压调制比上下限 M_{max} 和 M_{min} , 即

$$E_{max} = \frac{\sqrt{3}U_{dc}}{\sqrt{2}} M_{max} \quad (2)$$

$$E_{min} = \frac{\sqrt{3}U_{dc}}{\sqrt{2}} M_{min} \quad (3)$$

在式(1)所示功率运行约束中,约束 1 为最大电压调制比约束;约束 2 为最小电压调制比约束;约束 3 为桥臂电流约束。上述 3 个约束的详细分析见附录 A。根据以上约束绘制装置的功率运行范围如图 2 所示。由图 2 可以得到分区互联装置的功率运行范围。但是,已知装置容量,并不能直接得到无功输出的极限,这在规划装置容量时很不方便。因此需进一步推导得出容量和最大无功输出的关系。

2.2 容量和最大无功输出的关系

2.2.1 关系推导

分区发生暂态故障时,要求分区互联装置能输出足够的无功功率用于无功补偿来稳定电压,因此设计装置时主要关心的是无功输出是否能满足要求,至于装置吸收无功功率的能力,分析方法类似。

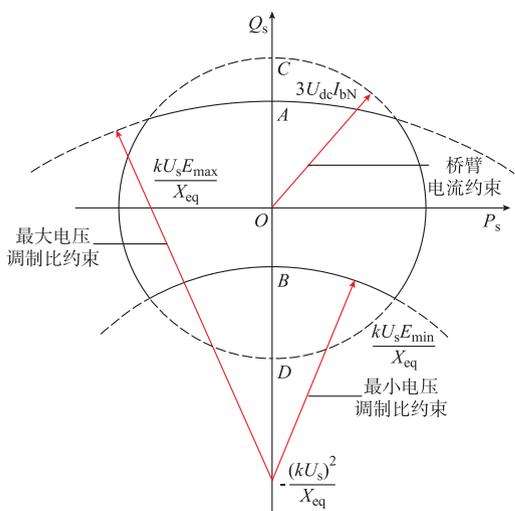


图2 分区互联装置的功率运行范围
Fig.2 Power operation range of partition interconnection device

假设图2中A点为 $(0, Q_A)$, C点为 $(0, Q_C)$,有

$$Q_A = \frac{kU_s(E_{\max} - kU_s)}{X_{\text{eq}}} \quad (4)$$

$$Q_C = S_r = 3U_{\text{dc}} I_{\text{bn}} \quad (5)$$

结合式(2)进一步得到:

$$Q_A = \frac{kU_s}{X_{\text{eq}}} \left(\frac{\sqrt{3} M_{\max} U_{\text{dc}}}{2\sqrt{2}} - kU_s \right) \quad (6)$$

需要指出,当PCC电压 U_s 较低且满足式(7)时,可以发现 Q_A 始终小于 Q_C ,此时装置的无功出力受到限制,不能达到容量上限,最大无功输出 Q_{\max} 可由式(8)得到。

$$U_s \leq \frac{2\sqrt{6} I_{\text{bn}} X_{\text{eq}}}{kM_{\max}} \quad (7)$$

$$Q_{\max} = Q_A = \frac{kU_s}{X_{\text{eq}}} \left(\frac{M_{\max}}{2\sqrt{6} I_{\text{bn}}} S_r - kU_s \right) \quad (8)$$

考虑大型城市电网一般采用220 kV电压等级分区运行模式^[7],电压 U_s 较高,故 U_s 满足:

$$U_s > \frac{2\sqrt{6} I_{\text{bn}} X_{\text{eq}}}{kM_{\max}} \quad (9)$$

此时,通过比较 Q_A 和 Q_C 的大小关系可以发现容量 S_r 和最大无功输出 Q_{\max} 的关系存在一个转折点,假设转折点处容量和最大无功输出值分别为 S_{tp} 和 Q_{tp} ,则 $S_r < S_{\text{tp}}$ 时,有

$$Q_{\max} = Q_A = \frac{kU_s}{X_{\text{eq}}} \left(\frac{M_{\max}}{2\sqrt{6} I_{\text{bn}}} S_r - kU_s \right) \quad (10)$$

$S_r \geq S_{\text{tp}}$ 时,有

$$Q_{\max} = Q_C = S_r \quad (11)$$

令式(10)和式(11)相等(即 $Q_A = Q_C$)可以得到转折点处容量和最大无功输出如式(12)所示。

$$S_{\text{tp}} = Q_{\text{tp}} = \frac{2\sqrt{6} (kU_s)^2 I_{\text{bn}}}{kM_{\max} U_s - 2\sqrt{6} I_{\text{bn}} X_{\text{eq}}} \quad (12)$$

综上所述,城市电网分区互联装置的容量和最大无功输出的一般关系如下:

$$Q_{\max} = \begin{cases} \frac{kU_s}{X_{\text{eq}}} \left(\frac{M_{\max}}{2\sqrt{6} I_{\text{bn}}} S_r - kU_s \right) & S_r < S_{\text{tp}} \\ S_r & S_r \geq S_{\text{tp}} \end{cases} \quad (13)$$

2.2.2 容量和最大无功输出的关系曲线

根据式(13)绘制 $Q_{\max} - S_r$ 关系如图3所示。

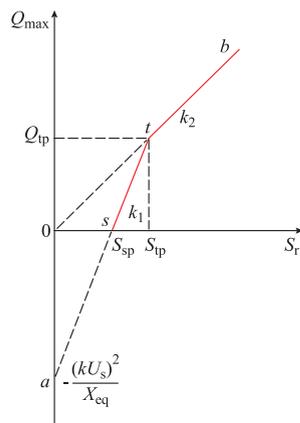


图3 容量和最大无功输出关系曲线
Fig.3 Curve of relation between capacity and maximum output of reactive power

根据图3得到以下结论。

1) 装置容量 S_r 和最大无功输出 Q_{\max} 呈分段线性关系。本文将转折点 t 命名为无功输出效率转折点,转折容量 S_{tp} 可由式(12)计算得到。

该点以前的 st 段斜率 $k_1 = kM_{\max} U_s / (2\sqrt{6} I_{\text{bn}} X_{\text{eq}}) > 1$,因此 st 段上设计装置容量增加很少,无功输出能力增加很多,称 st 段为无功输出的高效率段;相应的,该点以后的 tb 段斜率 $k_2 = 1$,称为无功输出的低效率段。

2) s 点对应装置的无功输出起步点,表示设计容量只有大于该点,装置才能输出感性无功功率,将该点容量命名为起步容量 S_{sp} :

$$S_{\text{sp}} = \frac{2\sqrt{6} kU_s I_{\text{bn}}}{M_{\max}} \quad (14)$$

设计装置时,其容量应大于起步容量 S_{sp} 。

3) 图3表明了 Q_{\max} 和 S_r 的一一对应关系,故已知所需的最大无功输出,就可求得对应的装置容量,求解如下:

$$S_r = \begin{cases} \frac{2\sqrt{6} I_{\text{bn}}}{M_{\max}} \left(kU_s + \frac{X_{\text{eq}} Q_{\max}}{kU_s} \right) & Q_{\max} < Q_{\text{tp}} \\ Q_{\max} & Q_{\max} \geq Q_{\text{tp}} \end{cases} \quad (15)$$

式中: U_s 一般取在额定值附近。

需要说明的是,分区发生暂态故障时, U_s 通常会比额定值低,此时装置的实际无功功率输出会更多。因此,取 U_s 在额定值附近计算所需装置容量是具有一定裕度的。

2.2.3 提高无功输出能力的方法

为了提高分区互联装置的无功输出能力,可以适当调节联接变压器的变比 k 或者减小装置与 PCC 间的等效电抗 X_{eq} 。

1) 适当减小变比 k

基于 $Q_{max}-S_r$ 曲线的分段线性关系,为确定变比 k 对曲线的影响,对图 3 中起步容量 S_{sp} 和转折容量 S_{tp} 进行敏感性分析:

$$\begin{cases} \frac{dS_{sp}}{dk} = \frac{2\sqrt{6}U_s I_{bN}}{M_{max}} > 0 \\ \frac{dS_{tp}}{dk} = \frac{2\sqrt{6}U_s^3 I_{bN} M_{max} k^2 - 48U_s^2 I_{bN}^2 X_{eq} k}{(M_{max}U_s k - 2\sqrt{6} I_{bN} X_{eq})^2} \end{cases} \quad (16)$$

由式(16)可以看出,随着变比 k 减小,起步容量 S_{sp} 不断减小,转折容量先减小,减小到 $k < 4\sqrt{6} I_{bN} X_{eq} / (M_{max} U_s)$ 后又逐渐增大。

如图 4(a)所示,调节联接变压器挡位减小变比 k ,曲线①将逐次变化到曲线④。可以看出,无功输出起步点 s 在不断左移;无功输出效率转折点 t 随着 k 的减小,向左移动一定程度后右移。由此得到,适当减小变比可改善曲线,使无功输出能力整体提升。

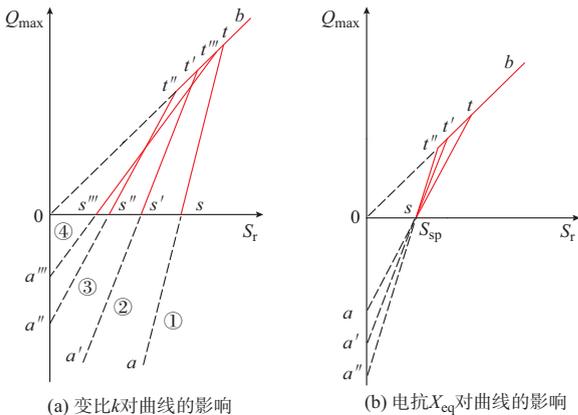


图 4 参数对无功输出能力的影响

Fig.4 Effects of parameters on reactive power output ability

需要指出,由于调节变压器挡位速度较慢,不能满足动态无功要求,只能作为扩大静态无功功率的手段。

2) 减小等效电抗

由式(17)对等效电抗的敏感性分析可知,减小电抗 X_{eq} ,起步容量 S_{sp} 不变,转折容量不断减小。

$$\begin{cases} \frac{dS_{sp}}{dX_{eq}} = 0 \\ \frac{dS_{tp}}{dX_{eq}} = \left(\frac{2\sqrt{6} k U_s I_{bN}}{M_{max} k U_s - 2\sqrt{6} I_{bN} X_{eq}} \right)^2 \end{cases} \quad (17)$$

如图 4(b)所示,电抗 X_{eq} 的减小不会改变无功输出起步点 s ,但会使无功输出效率转折点左移,增大曲线 st 段斜率,无功输出能力也得到增加。一个手段是减小联接变压器电抗;另一个手段是减小桥臂电抗,但是若桥臂电抗设计得太小,不仅无法抑制换流器输出电流谐波和限制暂态及故障电流,还可能造成装置内部环流过大^[18-19]。因此,不应过多减小桥臂电抗值。

3 分区互联装置的定容方法

分区互联装置的定容流程(流程图见附录 B)如下所示。

3.1 第 1 步:求解功率需求

1) 有功需求

分区发生超过其安全设计标准的严重故障(通常考虑 $N-x$ 故障),可能造成元件过载,此时有两种方法改善潮流:①通过装置本身的潮流调节作用,充分发挥分区间功率支援能力,增强电网安全性;②采用常规措施,开启有功缺额分区的备用电厂、采取开关操作转带负荷甚至甩负荷。

由于分区互联装置调节功率远比开启备用电厂等常规方法快速且更经济,电网发生 $N-x$ 故障后应该优先利用分区互联装置进行功率支援。若仍不通过 $N-x$ 校验,再考虑常规方法。

本文将电网故障下需要分区互联装置支援的有功功率定义为分区对装置的有功需求,采用文献[9]中基于灵敏度法的装置有功支援计算方法进行求解。

2) 无功需求

分区发生暂态故障出现电压失稳时,可采取动态无功支撑模式,向故障分区快速补偿动态无功功率以稳定电压,将需要的无功功率定义为分区对装置的无功需求,如附录 B 图 B1 所示,通过暂态仿真的方法得到。

3.2 第 2 步:求解装置容量

首先,依据式(15)求解两分区无功需求分别对应所需的换流站容量,并取有功需求和无功需求所需换流站容量中的最大值作为装置的初步定容结果,该容量正好能满足分区对装置的有功需求和无功需求;然后,依据 MMC 的模块化设计对定容结果进行规范处理:为方便构成零电平,MMC 每相的子模块数常取为偶数,因此 MMC 容量应是 6 个子模

块容量的整数倍;最后,对定容结果适当取整并留一定裕量。

3.3 第3步:容量校验

在装置容量确定以后,基于安全性的充分考虑,有必要对所得容量进行校验。校验分为以下4个方面。

1)有功需求校验

检验装置能够控制支援的有功功率是否满足互联两分区的有功需求。

2)动态无功需求校验

检验装置能够输出的动态无功功率是否满足互联两分区暂态电压稳定性对动态无功功率的需求。由于装置两端换流站的设计可能不一样,需分别计算两端的动态无功输出范围。

3)静态无功输出校验

计算装置在联接变压器挡位可调情况下的无功输出范围,以确定分区出现低电压节点时装置的静态无功可调范围,便于与电网已有无功补偿装置配合。

4)送端分区及联络线安全性校验

为了避免分区间的功率支援破坏送端分区安全性或导致联络线过载,需要控制装置输出,计算得到:①正常运行的有功支援范围;② $N-1$ 安全的有功支援范围。

4 示范工程算例验证

4.1 工程概况

本文方法已应用于国内外首个220 kV城市电网柔性互联示范工程论证中。示范工程的互联装置选址在北京电网的昌城—城顺朝分区间。

分析计算的电网和负荷数据来自调度分析报告^[20],计算工具采用北京市电力公司使用的PSD-BPA软件。示范工程装置安装在容量为478 MVA的单回联络线上,装置接入系统参数(对应图1)取值如下:阀侧额定电压 U_v 取200 kV;桥臂电感值为68 mH,桥臂额定电流为500 A;单台变压器的等效电抗值为9.33 Ω ,变比为1,变压器分接头设计在交流系统侧;MMC子模块的额定电压为1.6 kV,电压调制比最大值 M_{\max} 取0.95,最小值 M_{\min} 取0.7。

需要指出,示范工程因占地限制采用单联接变压器方案,即装置通过联接变压器与城顺朝分区相连,而与昌城分区间无联接变压器直接相连。相对双联接变压器方案,交流故障对装置的影响会发生较大变化,但经论证,装置可实现交流故障穿越^[13]。

4.2 功率需求

1)有功需求

首先通过软件仿真得到分区的过载故障集,故

障设置见附录C。然后对于每一个潮流过载故障,求解得到该故障下装置的有功支援需求如附录C表C1所示,结果表明,两分区的有功需求 P_d 为220 MW。

2)无功需求

分析暂态电压稳定性,暂态故障设置见附录C。可能发生的电压失稳故障以及故障分区所需动态无功补偿的仿真计算结果见附录C表C2。结果表明,昌城分区无功需求 Q_{d1} 为195 Mvar;城顺朝分区无功需求 Q_{d2} 为133 Mvar。

4.3 装置容量

首先,昌城分区侧无联接变压器,取 $k=1$, $X_{eq}=\omega L_0/2=10.68 \Omega$,根据式(15),满足昌城分区无功需求 Q_{d1} 所需的装置容量 $S_{Q_{d1}}$ 为543 MVA;城顺朝分区侧有联接变压器,取 $k=1$, $X_{eq}=\omega(L_0/2+L_r)=20.01 \Omega$,满足城顺朝分区无功需求 Q_{d2} 所需的装置容量 $S_{Q_{d2}}$ 为550 MVA,因此,装置容量 S_r 初步确定为550 MVA。

其次,对初步定容结果进行规范化处理。由MMC子模块的额定电压和额定电流得到子模块容量为0.8 MVA,装置容量应为4.8 MVA的整数倍。因此,装置容量可取为552 MVA。

最后,考虑北京电网的后续发展以及对安全性的高要求,装置容量确定为600 MVA,每个桥臂设计250个功率单元。

4.4 容量校验

对600 MVA装置容量进行校验,校验所得数据见附录D,其中,在计算吸收的无功功率时,各公式中电压调制比最大值 M_{\max} 替换为最小值 M_{\min} ,分析方法与输出无功功率类似,不再赘述。经过容量校验的过程,得到如下校验结果。

首先,装置的有功支援范围是0~600 MW,能够满足两分区220 MW的有功需求;将计算数据代入式(13)可得到,昌城分区侧动态无功输出范围是-534~600 Mvar,城顺朝分区侧动态无功输出范围是-285~327 Mvar,能够满足两分区动态无功需求且有较大裕度,故有功需求校验和动态无功需求校验通过。

其次,城顺朝分区侧换流站可通过调节变压器挡位(分接头-5~+5挡)来调节静态无功范围,不同挡位下无功输出计算结果详见附录E。可以看出,随等效变比的减小,无功输出能力将增大,且在该侧联接变压器挡位可调范围内,静态无功范围扩大为-600~488 Mvar。昌城侧换流站无联接变压器,其感性无功输出能力更大,且静态无功与动态无功输出范围相同。

最后,通过送端分区安全性及联络线校验可知:

①附录 C 设置故障下两分区间的紧急有功支援(最大为 220 MW)都不会导致送端分区或联络线过载;
②考虑 $N-1$ 下,向昌城分区的有功支援可能超出 $N-1$ 安全范围(0~51 MW)。例如发生附录 C 表 C1 所示安全性问题 1 时,装置向昌城分区支援 220 MW 有功功率会导致城顺朝分区 $N-1$ 不安全,但可在装置紧急支援 220 MW 有功功率后,开启昌城分区十三陵两台发电机,随后便可将装置有功功率降低至城顺朝分区 $N-1$ 安全的范围。

综上所述,600 MVA 的容量设计满足校验。分析动态无功输出范围还发现,装置一侧取消联接变压器后,装置该侧与交流系统间的等效电抗由 20.01 Ω 大幅减小为 10.68 Ω ,容量和最大无功输出 $Q_{\max}-S_r$ 曲线斜率增加(见附录 F 图 F1),转折容量由 695 MVA 减小为 598 MVA,装置该侧最大无功输出由 327 Mvar 增加到了容量上限 600 Mvar。这进一步验证了本文 $Q_{\max}-S_r$ 曲线的正确性。

5 结语

随着可再生能源的大力发展,区外可再生能源发电输入城市电网的比例日益增加,电能供应的不稳定将给城市电网带来新的安全稳定问题,通过电力电子技术实现大型城市电网分区柔性互联是一个有益的尝试。科学合理地确定分区互联装置容量是一个关键问题。本文首次研究了分区柔性互联装置的定容方法,并在国内外首个 220 kV 城市电网分区柔性互联示范工程论证中应用,主要成果如下。

1)推导得到了柔性直流分区互联装置的容量和最大无功输出的 $Q_{\max}-S_r$ 曲线;揭示了 $Q_{\max}-S_r$ 的分段线性关系,发现装置的最大无功输出一般会小于容量;定义了无功输出的起步容量和转折容量;提出了调节变比和减小装置与交流系统间等效电抗的提高无功输出能力的方法。

2)提出了一套较完整的分区互联装置的定容方法,该方法主要依据分区间有功支援需求与计及暂态电压稳定的动态无功需求来确定装置容量需求,并考虑了电力电子器件模块化设计、送端分区及联络线的安全性等诸多因素。

电力电子技术在城市电网应用具有广阔前景,本文在城市电网柔性互联上进行了理论探索和工程实践。后续还将进一步研究整个电网多个分区柔性互联的统一选址定容问题。

附录见本刊网络版(<http://www.aeps-info.com/aeps/ch/index.aspx>)。

参考文献

[1] 王成山,武震,李鹏.分布式电能存储技术的应用前景与挑战[J].

电力系统自动化,2014,38(16):1-8. DOI:10.7500/AEPS20140108002.

WANG Chengshan, WU Zhen, LI Peng. Prospects and challenges of distributed electricity storage technology [J]. Automation of Electric Power Systems, 2014, 38(16):1-8. DOI:10.7500/AEPS20140108002.

[2] 裴玮,邓卫,沈子奇,等.可再生能源与热电联供混合微网能量协调优化[J].电力系统自动化,2014,38(16):9-15. DOI:10.7500/AEPS20130903010.

PEI Wei, DENG Wei, SHEN Ziqi, et al. Energy coordination optimization of hybrid microgrid based on renewable energy and CHP supply[J]. Automation of Electric Power Systems, 2014, 38(16):9-15. DOI:10.7500/AEPS20130903010.

[3] XIANG Yue, LIU Junyong, YANG Wei, et al. Active energy management strategies for active distribution system[J]. Journal of Modern Power Systems and Clean Energy, 2015, 3(4):533-543.

[4] LIU Junyong, GAO Hongjun, MA Zhao, et al. Review and prospect of active distribution system planning[J]. Journal of Modern Power Systems and Clean Energy, 2015, 3(4):457-467.

[5] 周皓,童朝南,刘宝其,等.电网不平衡条件下的光伏并网发电控制策略[J].电力系统自动化,2015,39(12):27-32. DOI:10.7500/AEPS20141009006.

ZHOU Hao, TONG Chaonan, LIU Baoqi, et al. A control strategy for grid-connected photovoltaic system under unbalanced voltages[J]. Automation of Electric Power Systems, 2015, 39(12):27-32. DOI:10.7500/AEPS20141009006.

[6] 鲁宗相,李海波,乔颖.含高比例可再生能源电力系统灵活性规划及挑战[J].电力系统自动化,2016,40(13):147-158. DOI:10.7500/AEPS20151215008.

LU Zongxiang, LI Haibo, QIAO Ying. Power system flexibility planning and challenges considering high proportion of renewable energy[J]. Automation of Electric Power Systems, 2016, 40(13):147-158. DOI:10.7500/AEPS20151215008.

[7] 李晶生.天津电网“十一五”规划综述[J].电网技术,2006,20(30):1-5.

LI Jingsheng. A survey on planning of Tianjin power network during the 11th Five-Year plan[J]. Power System Technology, 2006, 20(30):1-5.

[8] 高凯,阳岳希,张艳军,等.适用于城市电网的柔性环网控制器拓扑方案研究[J].电网技术,2016,40(1):78-85.

GAO Kai, YANG Yuexi, ZHANG Yanjun, et al. A topology research of flexible looped network controller suitable to urban power grid[J]. Power System Technology, 2016, 40(1):78-85.

[9] 肖峻,郭伟,李蕴,等.分区柔性互联城市电网的静态安全性分析[J].电网技术,2016,40(10):3140-3148.

XIAO Jun, GUO Wei, LI Yun, et al. Security Assessment on Urban Power Network with Partition Flexible Interconnected [J]. Power System Technology, 2016, 40(10):3140-3148.

[10] 孙国萌,韩蓓,李国杰.基于概率方法的全寿命周期交流直流混合配电网经济性评估[J].电力建设,2016,37(5):21-27.

SUN Guomeng, HAN Bei, LI Guojie. Economic evaluation of AC/DC hybrid distribution network based on probabilistic life cycle cost method [J]. Electric Power Construction, 2016, 37(5):21-27.

[11] 肖峻,李思岑,黄仁乐,等.城市电网分区柔性互联选址方法及

- 示范应用[J].电力建设,2016,37(5):10-20.
- XIAO Jun, LI Sicen, HUANG Renle, et al. Siting method and demonstration application of flexible interconnection in urban power grid partition[J]. Electric Power Construction, 2016, 37(5): 10-20.
- [12] 甄宏宁,梁志瑞,王莹,等.南京西环网装设 UPFC 装置的主设备容量优化选择[J].江苏电机工程,2015,34(6):18-22.
- ZHEN Hongning, LIANG Zhirui, WANG Ying, et al. The optimal capacity selection of UPFC installed in Nanjing 220 kV western power grid[J]. Jiangsu Electrical Engineering, 2015, 34(6): 18-22.
- [13] 交直流混合配电网关键技术任务 4:分区互联装置和柔性环网控制装置研制技术报告[R].北京:全球能源互联网研究院,南京南瑞继保电气有限公司,中国科学院电工所,国网北京市电力公司,2016.
- [14] MARQUARDT R, LESNICAR A. New concept for high voltage-modular multilevel converter[C]// Power Electronics Specialists Conference, June 20-25, 2004, Aachen, Germany: 1-5.
- [15] 屠卿瑞,陈志光,曾耿晖,等.模块化多电平换流器稳态功率运行范围的确定方法[J].电力系统自动化,2015,39(10):131-137.DOI:10.7500/AEPS20140325018.
- TU Qingrui, CHEN Zhiguang, ZENG Genghui, et al. A method of determining steady-state power operation range for modular multilevel converter[J]. Automation of Electric Power Systems, 2015, 39(10): 131-137. DOI: 10.7500/AEPS20140325018.
- [16] ADAM G P, ANAYA-LARA O, BURT G. Steady-state and transient performance of DC transmission systems based on HVDC technology[C]// 9th IET International Conference on AC and DC Power Transmission, October 19-21, 2010, London, UK: 5p.
- [17] 王姗姗,周孝信,汤广福,等.交流电网强度对模块化多电平换流器 HVDC 运行特性的影响[J].电网技术,2011,35(2):17-24.
- WANG Shanshan, ZHOU Xiaoxin, TANG Guangfu, et al. Influence of AC system strength on operating characteristics of MMC-HVDC System[J]. Power System Technology, 2011, 35(2): 17-24.
- [18] 武健,刘瑜超,徐修林,等.基于双坐标系复合控制的模块化多电平换流器环流抑制方法[J].电力系统自动化,2015,39(11):166-172.DOI:10.7500/AEPS20140314005.
- WU Jian, LIU Yuchao, XU Xiulin, et al. A circulation current suppression method based on double coordinate compound control for modular multilevel converter[J]. Automation of Electric Power Systems, 2015, 39(11): 166-172. DOI: 10.7500/AEPS20140314005.
- [19] 徐政,肖晔庆,张哲任.模块化多电平换流器主回路参数设计[J].高电压技术,2015,41(8):2514-2527.
- XU Zheng, XIAO Huangqing, ZHANG Zheren. Design of main circuit parameters of modular multilevel converters[J]. High Voltage Engineering, 2015, 41(8): 2514-2527.
- [20] 北京电力调度控制中心.北京电网 2~3 年安全滚动校核分析报告[R].北京:国网北京市电力公司,2014.

肖峻(1971—),男,通信作者,博士,教授,主要研究方向:城市电网规划、评估与微网规划。E-mail: xiaojun@tju.edu.cn

蒋迅(1993—),男,硕士研究生,主要研究方向:城市电网规划、评估。E-mail: jiangxun0903@sina.com

黄仁乐(1963—),男,教授级高级工程师,主要研究方向:电力系统自动化、智能电网关键技术、主动配电网。E-mail: h979@sohu.com

(编辑 孔丽蓓)

Capacity Dimensioning Method of Partitioned Flexible Interconnection Device in Urban Power Network

XIAO Jun¹, JIANG Xun¹, HUANG Renle², ZHANG Kai³, SHU Bin³, GUO Wei⁴

(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;

3. Beijing Electric Power and Economic Research Institute, Beijing 100055, China;

4. State Grid Tianjin Electric Power Company, Tianjin 300000, China)

Abstract: Flexible interconnection between partitions is a new way to solve the development problems of large urban AC power grid, and the capacity of the interconnection device is the key factor for its cost. The capacity dimensioning method of partitioned flexible interconnection device is presented. Firstly, the basic concept of the device between two partitions of the urban power grid is described. Secondly, through an analysis on power operation range of the device based on the modular multi-level converter (MMC), the piecewise linear relation between the capacity and the maximum output of reactive power is established, and the methods of improving the output of reactive power are obtained. Thirdly, the capacity dimensioning method of the device is put forward according to the active power demand and the reactive power demand. The active power demand is for solving the overload problems after faults, while the reactive power demand is to solve dynamic voltage instability problems when the transient faults occur. The capacity dimensioning method also considers whether the power support will destroy the security of the sending-end partition or lead to overload of the link lines. Finally, the capacity dimensioning method is applied to the world's first 220 kV partitioned flexible interconnection demonstration project.

This work is supported by National High Technology Research and Development Program of China (863 Program) (No. 2015AA050102).

Key words: urban power grid; partition; interconnection device; reactive power output; overload; voltage instability