

分区柔性互联城市电网的最大供电能力分析

肖峻¹, 蒋迅¹, 郭伟², 李蕴³, 黄仁乐³, 陈平³

(1. 天津大学 智能电网教育部重点实验室, 天津 300072; 2. 国网天津市电力公司, 天津 300000;
3. 国网北京市电力公司, 北京 100031)

摘要: 对比现有电网分区运行模式与新型柔性互联运行模式, 并阐述柔性直流分区互联装置的基本工作模式; 介绍分区互联装置的基本结构, 并研究装置在分区间有功支援与动态无功支撑过程中的工作原理; 考虑电网 $N-1$ 静态安全性与暂态电压稳定性, 提出分区柔性互联城市电网最大供电能力的定义与模型, 并给出一种简化的逼近求解算法。某电网示范工程实际算例验证了所提方法的正确性; 与传统分区运行相比, 柔性互联后最大供电能力得到提升。

关键词: 分区; 柔性互联; 城市电网; 最大供电能力; 分区互联装置

中图分类号: TM 761

文献标识码: A

DOI: 10.16081/j.issn.1006-6047.2017.08.009

0 引言

最大供电能力 TSC (Total power-Supply Capability) 是评估配电网安全与经济运行的重要指标, 常用来指导电网规划^[1-2]。配电网的 TSC 反映了在安全运行的条件下, 现状网架对未来负荷发展需求的满足程度。现有研究中以中压配电网为主, 考虑了 $N-1$ 后开关操作对负荷转带的作用。

TSC 的概念不仅适用于配电网, 也适用于 500 kV/220 kV 城市电网。典型大型城市电网分为多层结构, 包括 500 kV/220 kV 电网、110 kV (66 kV、35 kV) 高压配电网、10 kV (20 kV) 中压配电网、0.4 kV 低压配电网^[3]。500 kV/220 kV 电网的主要功能不是长距离输送, 而是将电能分配到城市的下级配电网, 因此在实际电网规划以及运行方式分析中已经计算其供电能力^[5]。

现有 220 kV 城市电网 TSC 的研究已涉及相关模型与求解方法^[4-7], 主要考虑 220 kV 层面的潮流方程约束、节点电压约束、元件热稳定约束以及发电机出力约束, 并忽略 $N-1$ 后下级电网开关操作。常用求解方法有容载比法^[4]、线性规划法^[5]与最优潮流法^[6-7]。但上述模型与方法中均未考虑故障暂态过程中的电压稳定问题。与 10 kV 中压配电网不同, 在计算 220 kV 城市电网的 TSC 时, 随着受端电网特征越来越明显, 需要更加全面地考察电网安全性。除了要考虑 $N-1$ 静态安全性, 还需校验故障暂态过程中的电压稳定性^[8], 以保证电网安全。

随着城市电网规模迅速扩大, 为了控制短路电

流水平, 大型城市电网通常在 500 kV 电网成环后被迫将 220 kV 电网解环, 形成分区分片运行^[9]。此时, 无法发挥分区间互供能力, 电厂被分割到独立分区, 单个分区的动态无功支撑更显不足, 电网的安全运行受到一定挑战, 供电能力有所降低。这是传统大型交流城市电网很难克服的一个问题。在城市电网 220 kV 分区间利用目前逐渐成熟的全控型电力电子技术进行柔性互联, 有可能在控制短路电流的前提下解决该问题, 提升电网的安全供电能力。

基于电压源换流器 VSC (Voltage Source Converter) 的柔性直流技术具有良好的可控性, 能独立调节有功和无功功率, 已在异步电网互联与电力交易、风电场并网、海上平台供电、城市电网供电等方面取得广泛应用^[10]。新型的模块化多电平电压源换流器 MMC (Modular Multilevel Converter) 采用了高度模块化的结构, 可避免全控型器件直接串联所带来的动态均压问题, 可靠性高、经济性好、便于工程实现、不平衡运行能力与故障穿越能力强, 尤其适用于高压大功率领域, 极大推动了柔性直流技术的发展^[11]。

基于柔性直流技术, 北京电网将在 2017 年建设国内外首个 220 kV 分区柔性互联示范工程。工程投运后 2 个 220 kV 分区间正常情况下可实现可控功率支援; 在电网需要时提供紧急动态无功支撑, 起到 STATCOM 的作用。现有的 220 kV 电网分区 TSC 计算方法只考虑了传统交流系统, 且并未计及暂态电压稳定问题, 迫切需要研究新的 TSC 模型及算法。为此, 本文提出了 220 kV 柔性互联城市电网的 TSC 模型与计算方法, 并应用到示范工程论证中。

1 城市电网运行模式分析

1.1 传统分区开环运行模式

近年来, 城市电网规模不断扩大, 为了防止 220 kV

收稿日期: 2017-02-19; 修回日期: 2017-06-12

基金项目: 国家高技术研究发展计划 (863 计划) 资助项目 (2015A-A050102); 国家自然科学基金资助项目 (51277129)

Project supported by the National High Technology Research and Development Program of China (863 Program) (2015AA050102) and the National Natural Science Foundation of China (51277129)

电网过于密集导致母线短路电流超标,以及 500kV 主通道断开导致 220kV 电网大规模功率转移,大型城市电网通常采取 220kV 电压等级分区运行模式。正常运行时,城市电网被划分成若干分区,各分区在 220kV 层面独立运行,分区间联络线断开。

然而,电网分区运行也带来一些安全隐患,表现在:相邻分区间无法进行功率支援,可能不满足 $N-1$ 静态安全性; $N-1$ 故障后暂态过程中,相邻分区间无法提供动态无功支撑,分区电压稳定性可能降低。

随着电网负荷的不断增长,分区运行模式的弊端可能更加凸显,电网供电能力受到限制,迫切需要一种新的运行模式以适应未来电网的发展需求。

1.2 分区柔性互联运行模式

在城市电网分区间的联络线处安装柔性直流分区互联装置可实现分区柔性互联。为了节约建设用,同时减少装置造价和运行损耗,装置采用背靠背半桥式 MMC 设计^①。

根据分区运行状态及其对装置的需求,装置主要工作于以下 3 种模式^[12]。

模式 1:负载均衡模式。

分区正常运行状态下,装置可根据 2 个分区的负荷水平,控制有功由轻载分区向重载分区流动,以均衡 2 个分区的负载率,并优化潮流分布。

模式 2:紧急有功支援模式。

由于电网故障或检修而导致某分区出现有功缺额时,装置控制从另一分区向该分区进行紧急有功支援,以解决出现的问题。

模式 3:动态无功支撑模式。

分区出现电压失稳风险时,装置紧急提供动态无功以支撑电压,避免电压失稳,提高暂态电压稳定性。

另外,在模式 1、模式 2 中,装置剩余容量还可以参与电压调整和无功优化^[13]。

2 分区互联装置基本工作原理

2.1 分区互联装置基本结构分析

分区互联装置的基本结构如图 1 所示^[13]。装置

与交流电网通过单联接变联接,图中装置 MMC₂ 端没有联接变。该接线方式占地面积较小,经济性好,具备直流故障隔离能力,无联接变侧电网发生不对称故障的时候,采取零序电流抑制控制可实现故障穿越^①。

分区互联装置由 2 个对称的 MMC 构成,以 MMC₁ 端参数为例进行说明。交流电网参数有: U_{s1} 为母线 1 的基频电压; P_{s1} 为母线 1 与装置有功功率交换值; Q_{s1} 为母线 1 与装置无功功率交换值; X_{l1} 为联接变的等效电抗。装置内部参数有: U_{c1} 为装置输出的基频电压; U_{dc} 为装置内部直流电压,通常保持恒定; I_{dc} 为装置内部直流电流; R_1 为 MMC₁ 损耗的等效电阻; X_{L1} 为 MMC₁ 阀电抗器等值电抗。

2.2 分区互联装置潮流控制原理

2.2.1 分区互联装置的控制方式选择

分区互联装置采用基于同步旋转坐标系下的直接电流控制策略实现有功、无功解耦控制^[14]。其中,任意 $i(i=1,2)$ 端的 MMC 可以选择以下 4 种控制方式^[13]:

- 定交流有功功率 P_{si} 、无功功率 Q_{si} 控制;
- 定交流有功功率 P_{si} 、母线电压 U_{si} 控制;
- 定直流电压 U_{dc} 、交流无功功率 Q_{si} 控制;
- 定直流电压 U_{dc} 、交流母线电压 U_{si} 控制。

为保持装置两端有功平衡,需选定一端 MMC 来控制直流电压,充当平衡站;另一端控制有功潮流。因此,装置两端可选择 a 与 c、a 与 d、b 与 c、b 与 d 4 种控制方式组合。

针对 1.2 节负载均衡模式与紧急有功支援模式,装置主要起调控分区间有功潮流的作用,并利用剩余容量提供无功补偿,优化电网潮流。为方便控制功率传输值,设置这 2 种运行模式下装置采取 a 与 c 的控制方式组合;针对 1.2 节动态无功支撑模式,为稳定节点电压,装置选取 b 与 d 的控制方式组合。上述控制方式由系统层面统一控制,可达到 ms 级控制^[15]。不同运行模式下的装置控制方式组合见表 1。

2.2.2 分区互联装置的功率传输方程

以装置的 MMC₁ 端为例,等效换相电抗为:

$$X_1 = X_{l1} + X_{L1} \quad (1)$$

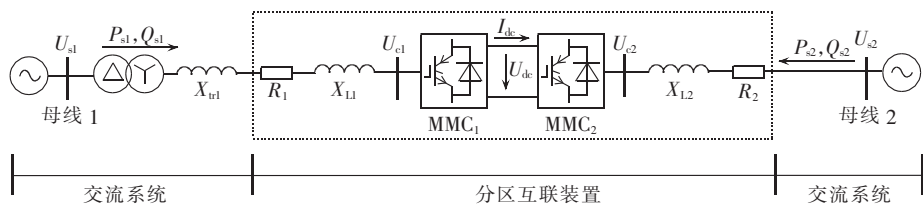


图 1 分区互联装置结构示意图

Fig.1 Structure of inter-partition connecting device

① 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. 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. 2016.

表 1 装置不同运行模式下控制方式组合

Table 1 Control mode combination for different operating modes of device

运行模式	控制方式组合
负载均衡	a+c
紧急有功支援	a+c
动态无功支撑	b+d

由于 R_1 较小,分析中通常忽略不计,则有:

$$P_{s1} = \frac{kU_{s1}U_{c1}\sin\delta_1}{X_1} \tag{2}$$

$$Q_{s1} = \frac{kU_{s1}(U_{c1}\cos\delta_1 - kU_{s1})}{X_1} \tag{3}$$

其中, k 为联接变变比; δ_1 为 U_{s1} 与 U_{c1} 的相角差。

U_{c1} 和直流电压 U_{dc} 之间存在如式(4)所示的关系^[13]。

$$U_{c1} = \frac{\sqrt{6}}{4}M_1U_{dc} \tag{4}$$

其中, M_1 为装置电压调制比。

2.2.3 分区互联装置的容量约束

实际运行中,装置传输的有功 P_{s1} 和无功 Q_{s1} 受装置容量 S_r 的限制:

$$P_{s1}^2 + Q_{s1}^2 \leq S_r^2 \tag{5}$$

2.3 分区互联装置的动态无功输出范围确定

由式(5)可知,装置传输的有功 P_{s1} 与提供的无功补偿 Q_{s1} 需要满足装置容量约束。但研究表明,装置提供的最大有功支援可达到装置容量,最大动态无功补偿值可能小于装置容量^[16],需要进一步分析确定。

由 2.2 节式(2)和式(3)可得:

$$P_{s1}^2 + \left[Q_{s1} + \frac{(kU_{s1})^2}{X_1} \right]^2 = \left(\frac{kU_{s1}U_{c1}}{X_1} \right)^2 \tag{6}$$

由式(4)可得, U_{c1} 与调制比 M_1 有关。设 $M_{\max}$ 与 $M_{\min}$ 分别为调制比最大值与最小值,则可对对应得出 U_{c1} 的最大值与最小值,分别设为 $U_{c\max}$ 与 $U_{c\min}$ 。将其代入式(6)可得装置在运行中存在如式(7)、(8)所示约束^[16]。

$$P_{s1}^2 + \left[Q_{s1} + \frac{(kU_{s1})^2}{X_1} \right]^2 \leq \left(\frac{kU_{s1}U_{c\max}}{X_1} \right)^2 \tag{7}$$

$$P_{s1}^2 + \left[Q_{s1} + \frac{(kU_{s1})^2}{X_1} \right]^2 \geq \left(\frac{kU_{s1}U_{c\min}}{X_1} \right)^2 \tag{8}$$

由式(5)、式(7)和式(8)可绘制装置 MMC₁ 侧的功率输出范围,如图 2 中实线所围成区域。图中横轴上方表示输出无功,下方表示吸收无功。

由图 2 可看出,由于调制比的范围限制,装置在某联接变变比 k 值下,可输出的最大无功(对应点 A)可能小于装置的容量(对应点 C)。通过调节 k 能够改变装置输出的无功范围,但在 $N-1$ 后的暂态过程中,变压器分接头无法迅速动作,因此,实际可输出的最大动态无功补偿为点 A 对应的无功值。

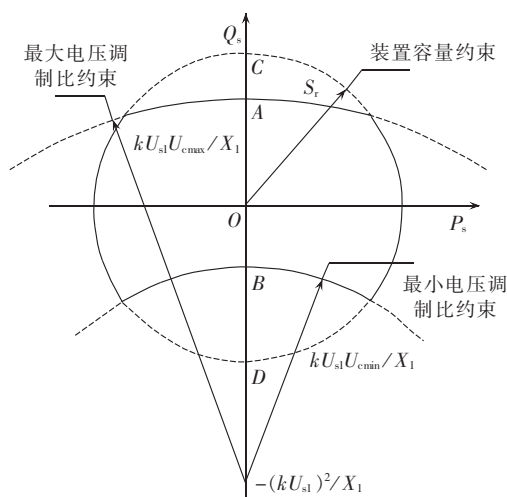


图 2 装置 MMC₁ 侧功率输出范围

Fig.2 MMC₁-side power output range of device

3 分区柔性互联城市电网的 TSC 模型

3.1 城市电网 TSC 的相关定义

3.1.1 分区开环运行电网的 TSC

目前,针对 220kV 城市电网的 TSC 研究主要考虑在发电机出力可调范围内,满足分区内各元件 $N-1$ 静态安全性约束下电网能够承载的最大负荷^[6-7]。然而,调度部门进行 $N-1$ 分析时认为, $N-1$ 之后所有线路均不过载才能满足安全性准则。若实际发生过载,则 $N-1$ 不通过,然后考虑采用调节发电机出力等手段来消除过载。因此,应针对发电机出力的某一运行状态对各元件进行逐个 $N-1$ 静态安全性校验。此外,对于受端电网,暂态电压稳定性也是不可忽略的因素。

因此,本文将分区运行电网的 TSC 定义为:针对分区内发电厂某出力状态,满足 $N-1$ 故障之后暂态电压稳定与静态安全性约束的电网能够承载的最大负荷。

3.1.2 分区柔性互联电网的 TSC

计算分区柔性互联城市电网的 TSC 需要考虑以下 2 点:首先,2 个分区柔性互联后成为一个整体,需要同时兼顾 2 个分区的安全性;其次,需考虑分区互联装置的有功支援与动态无功支撑作用,装置在正常时可均衡分区负载,故障后暂态过程中可稳定电网电压。

因此,本文将分区柔性互联电网 TSC 定义为:针对区域内发电厂某一出力状态,计及互联装置有功支援与动态无功支撑作用,满足电网整体 $N-1$ 静态安全性与暂态电压稳定性约束的电网最大可供负荷。

3.2 TSC 目标函数

假设 A 分区与 B 分区通过互联装置柔性互联,则两分区成为一个整体,电网 TSC 的目标函数为:

$$f_{\text{TSCA+B}} = \max_{i \in (A+B)} \sum P_{Li} \quad (9)$$

其中, $f_{\text{TSCA+B}}$ 表示 A 分区与 B 分区整体的 TSC; $i \in (A+B)$ 表示节点 i 为 A 分区与 B 分区的节点; P_{Li} 为节点 i 的有功负荷。

3.3 模型等式约束

3.3.1 交流电网等式约束

交流电网等式约束为潮流方程约束。当电网中节点不与装置相联时,潮流方程无需改变;当节点与装置相联时,需要计及电网与装置间传输功率。假设装置从交流电网吸收有功和无功,潮流方程修正为^[13]:

$$\begin{cases} P_i - U_i \sum_{j \in i} U_j (G_{ij}^s \cos \theta_{ij} + B_{ij}^s \sin \theta_{ij}) - P_{si} = 0 \\ Q_i - U_i \sum_{j \in i} U_j (G_{ij}^s \sin \theta_{ij} - B_{ij}^s \cos \theta_{ij}) - Q_{si} = 0 \end{cases} \quad s \in \Omega \quad (10)$$

其中, P_i 、 Q_i 分别为与装置相联节点 i 的有功、无功注入值; P_{si} 、 Q_{si} 分别为装置从节点 i 吸收的有功和无功值; $j \in i$ 表示节点 j 是与节点 i 相关联的节点; U_i 、 U_j 分别为节点 i 、 j 电压幅值; Ω 为电网 $N-1$ 故障集; G_{ij}^s 与 B_{ij}^s 分别为第 s 个故障情况下电网电导与电纳参数; θ_{ij} 为节点 i 、 j 电压的相角差。

其中 P_i 、 Q_i 如式(11)所示。

$$\begin{cases} P_i = P_{Gi} - P_{Li} \\ Q_i = Q_{Gi} - Q_{Li} \end{cases} \quad (11)$$

其中, P_{Gi} 、 Q_{Gi} 分别为节点 i 的发电机有功、无功注入; P_{Li} 、 Q_{Li} 分别为节点 i 的有功、无功负荷。

在实际电网中,某地区不同负荷点的负荷变化一般成一定比例^[21],即各节点负荷满足式(12)。

$$P_{Li} = P_{L0i} + \lambda b_{pi} \quad (12)$$

其中, P_{L0i} 为初始负荷; λ 为负荷增长参数; b_{pi} 为负荷增长方向。假设 Q_{Li} 按照恒功率因数随 P_{Li} 变化。

3.3.2 直流装置等式约束

直流装置应满足式(1)~(4)等式约束。另外,由于 MMC 的有功损耗 R 忽略不计,流入 MMC_i 的有功功率 P_{si} 应与直流功率平衡,表示为:

$$P_{si} = U_{dc} I_{dc} \quad (13)$$

3.4 模型不等式约束

3.4.1 $N-1$ 静态安全约束

电网需满足 $N-1$ 静态安全性要求,包括主变容量约束、线路容量约束与节点电压约束,表示为:

$$\begin{cases} T_i^s \leq T_i^{\max} \\ R_{Fij}^s \leq R_{Fij}^{\max} \\ U_i^{\min} \leq U_i^s \leq U_i^{\max} \end{cases} \quad s \in \Omega \quad (14)$$

其中, T_i^s 、 R_{Fij}^s 、 U_i^s 分别为第 s 个 $N-1$ 故障后主变负载、线路负载以及节点电压;变量上角标 min 与 max 分别表示变量的下限值与上限值。

直流装置不仅应满足容量约束式(5),还应满足装置电压调制比约束:

$$M_i^{\min} \leq M_i \leq M_i^{\max} \quad i = 1, 2 \quad (15)$$

3.4.2 暂态电压稳定约束

电网发生 $N-1$ 故障的暂态过程中,需校验电压稳定性,保证负荷增长后不会影响电网暂态电压安全。

电力系统暂态电压稳定按照文献[16]的标准:故障清除 10 s 后,负荷母线电压恢复到 0.8 p.u. 以上,即:

$$U_i^s(t_c + t_{lim}) \geq U_{lim} \quad s \in \Omega \quad (16)$$

其中, t_c 为故障清除时间; $t_{lim} = 10$ s; $U_{lim} = 0.8$ p.u.。

当系统恢复稳态后,各母线电压不能高于设定的稳态电压上限值,以防止系统母线过电压,可表示为:

$$U_i(t_c + t_d) \leq U_i^{\max} \quad (17)$$

其中, t_d 为故障清除后系统恢复稳态的时间。

另外,在故障暂态过程中,装置需满足式(5)、式(7)与式(8)所示约束,可提供的最大动态无功补偿值应小于实际运行中最大无功输出值。

4 模型求解方法

如 3 节所述,计算分区柔性互联城市电网的 TSC 需要进行大量 $N-1$ 仿真,不仅需要满足电网 $N-1$ 静态安全性要求,还需校验电网暂态电压稳定性。采用优化算法求解该问题时过程复杂,因此,本文采用一种逐步逼近的方法进行计算,实施步骤如下。

a. 设定各节点负荷 P_{Li} 的初值 P_{L0i} 、负荷增长初始步长 λ 、负荷增长方向 b_{pi} 、收敛精度 ε 。

b. 对电网进行 $N-1$ 静态安全性校验。其中分区互联装置在故障前的潮流控制参数需进行优化,以保证 $N-1$ 后 2 个分区均安全,详细过程见文献[13]。

c. 对电网进行暂态电压稳定校核。分区互联装置起到 2 个 STATCOM 的作用,两端提供的最大动态无功补偿值根据 2.3 节计算可得。对预设故障进行逐一仿真,观测电网是否满足暂态电压稳定要求。

d. 若满足步骤 **b**、**c** 校验,则令 $P_{Li} = P_{Li} + \lambda b_{pi}$,并按照恒功率因数更新电网无功负荷 Q_{Li} ,返回步骤 **b**;若不满足校验,则令 $P_{Li} = P_{Li} - \lambda b_{pi}$,并按照恒功率因数更新电网无功负荷 Q_{Li} ,然后判断 λ 是否大于 ε ,若是则令 $\lambda = \lambda / 2$,转步骤 **b**,若不是则输出电网负荷的最终结果与 TSC 值。

计算分区柔性互联电网 TSC 的步骤见图 3。

5 示范工程算例验证

5.1 示范工程概况

本文方法已应用到国内外首个 220 kV 城市电网分区柔性互联示范工程可研论证中。在示范工程预计投运的 2017 年度夏期间,北京 220 kV 电网将分为 8 个分区。昌城分区与城顺朝分区之间存在 220 kV

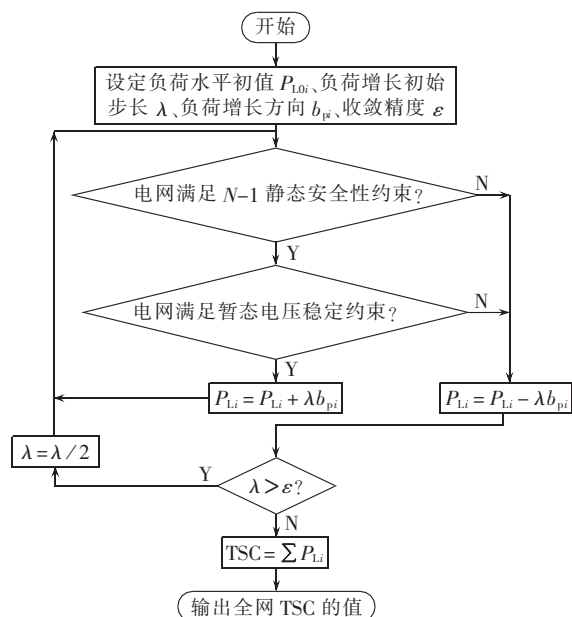


图 3 分区柔性互联电网 TSC 计算流程

Fig.3 Flowchart of TSC calculation for power grid with flexibly-interconnected partitions

双回备用联络线。示范工程实施前,2 个分区独立运行;示范工程实施后,2 个分区通过互联装置柔性互联。装置容量为 $600 \text{ MV} \cdot \text{A}$,城顺朝侧通过联接变与电网相联,昌城侧直接与电网相联^①。

5.2 原始数据与分析条件

计算采用的电网和负荷数据来自北京电网调度分析报告^①,仿真工具采用北京市电力公司使用的 PSD-BPA 软件。涉及的变电站和发电厂均用字母表示,电网结构见文献[13]的附录 F。

装置主要参数为:城顺朝侧最大动态无功补偿为 327 Mvar ,昌城侧最大动态无功补偿为 600 Mvar 。MMC 阀电抗器的等值电抗 $X_{L1}=X_{L2}=16 \Omega$,直流电压额定值 $U_{dc}=208 \text{ kV}$,电压调制比 $M_{\max}=0.95$, $M_{\min}=0.75$,装置容量 $S_r=600 \text{ MV} \cdot \text{A}$ 。联接变的等效电抗值为 $X_{tr}=2.93 \Omega$,正常工作状态下变比 $k=1$ 。

计算过程中,负荷初始增长步长 $\lambda=0.1$,收敛精度 $\varepsilon=0.001$ 。 $N-1$ 静态安全性分析中母线电压上、下限分别设为 1.05 p.u. 与 0.9 p.u. 。 $N-1$ 故障集选取如下:

- 分区 500 kV 站内某个主变因故障被切除;
- 分区 500 kV 双回线中单回因故障被切除;
- 分区 220 kV 双回线中单回因故障被切除。

由于北京电网的重要性,考虑了本地主力电厂停运的情况,选取以下 3 种初始状态进行分析。

状态 1:2 个分区所有电厂投运。

状态 2:昌城分区 JY 热电厂停运,城顺朝分区 JA 热电厂停运。

状态 3:昌城分区 JY 热电厂停运。

5.3 TSC 计算结果分析

篇幅所限,5.3 节仅给出状态 3 的详细结果;5.4

节给出 3 种初始状态的最终 TSC 结果。

5.3.1 开环运行下 TSC 结果

当电网分区开环运行时,应单独针对 2 个分区分别计算 TSC,式(9)目标函数中节点 i 只取某分区节点,并去掉 3.3 节与 3.4 节约束条件中相应装置部分。

a. 昌城分区 TSC 计算结果。

不考虑暂态电压稳定约束时的 TSC 为 2586 MW ,TSC 限制原因为 CP2 号变 $N-1$ 后 CP3 号变满载;考虑暂态电压稳定约束后 TSC 为 2542 MW ,TSC 的限制原因为 CB2 号变 $N-1$ 后电网暂态电压失稳。

分析可知,由于分区内 JY 热电厂停运导致动态无功储备不足,这时暂态电压稳定约束对 TSC 最终起到了限制作用。以 XZM 站 220 kV 母线为例,CB2 号变 $N-1$ 后电压(标么值)恢复情况如图 4 所示。

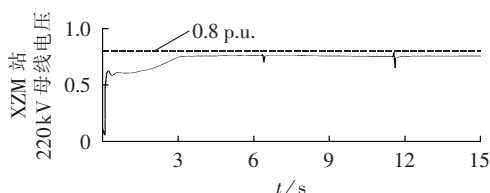
图 4 CB2 号变 $N-1$ 故障后 XZM 站母线电压Fig.4 Bus voltage of XZM station during $N-1$ fault of transformer CB2

图 4 显示,故障发生 10 s 后,XZM 站母线电压无法恢复到 0.8 p.u. 以上,暂态电压失稳。

b. 城顺朝分区 TSC 计算结果。

由于城顺朝分区电厂均正常投运,动态无功储备充足,是否计及暂态电压稳定约束对 TSC 结果无影响,该分区 TSC 均为 3466 MW 。TSC 的限制原因为 SY1 站 1 号变 $N-1$ 后 SY2 号变满载,受到静态安全性约束。以 SH 站 220 kV 母线为例,SY1 号变 $N-1$ 后电压(标么值)恢复情况如图 5 所示。

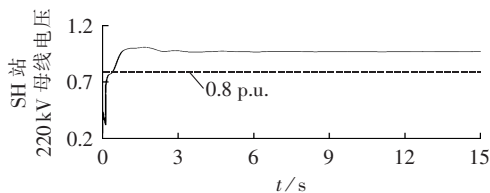
图 5 SY1 号变 $N-1$ 故障后 SH 站母线电压Fig.5 Bus voltage of SH station during $N-1$ fault of transformer SY1

图 5 显示,故障发生 10 s 后,SH 站母线电压可稳定在 0.8 p.u. 以上,暂态电压稳定。

由以上对比可知,暂态电压稳定约束对 TSC 结果是有一定影响的,后续计算和分析过程均对其进行考虑。

① 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. 2014.

5.3.2 柔性互联下 TSC 结果

采用分区互联装置将 2 个分区柔性互联后,2 个分区成为一个整体,需同时兼顾 2 个分区的安全性。经计算与仿真分析可得,分区柔性互联后,电网整体的 TSC 为 6254 MW。其中,昌城分区为 2564 MW,城顺朝分区为 3690 MW,装置控制昌城分区向城顺朝分区有功支援 108 MW。TSC 限制原因为 SYI 站 1 号变 N-1 后 SY2 号变满载,受到静态安全性限制。

在此负荷水平下,2 个分区 N-1 后电网暂态电压均稳定。仍以 CB2 号变 N-1 故障后 XZM 站 220 kV 母线电压恢复情况为例,电压(标么值)波形如图 6 所示。

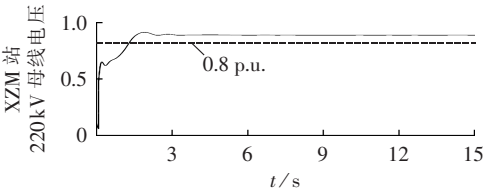


图 6 分区柔性互联时 CB2 号变 N-1 故障后 XZM 站母线电压

Fig.6 Bus voltage of XZM station during N-1 fault of transformer CB2 when partitions are flexibly interconnected

图 6 显示,故障发生 10 s 后,XZM 站母线电压可稳定在 0.8 p.u. 以上,电网电压稳定。

其中,装置昌城侧动态无功输出如图 7 所示。图 7 显示,故障后分区互联装置可迅速进行动态无功补偿,稳定电压。在 1.54 s 时,动态无功补偿即达到最大,为 566 Mvar,响应速度快。

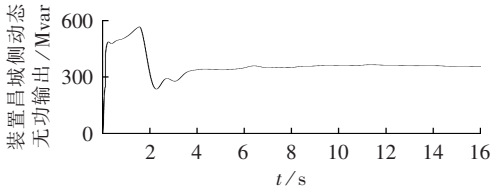


图 7 CB2 号变 N-1 故障后装置动态无功输出

Fig.7 Dynamic reactive-power output during N-1 fault of transformer CB2

5.3.3 TSC 计算小结

从上述 TSC 计算可看出,本文方法既考虑了 N-1 静态安全约束,又考虑了暂态电压稳定约束,符合大型受端电网对安全性的实际要求。分区柔性互联后,既考虑了互联装置有功支援作用,又考虑了装置动态无功对暂态电压稳定的支撑作用,所得结果合理。

5.4 柔性互联对 TSC 的作用分析

5.4.1 不同初始状态的 TSC 计算结果

为更全面地对比分析柔性互联对 TSC 的作用,本文计算了 3 种初始状态下所有分区运行与柔性互联后的 TSC 结果,并列达到 TSC 时受到的最强

约束,结果分别如表 2、表 3 所示。

表 2 3 种初始状态下电网 TSC 计算结果

Table 2 Calculated TSCs for three initial states

运行方式	参数	状态 1	状态 2	状态 3
分区运行	昌城 TSC/MW	3028	2542	2542
	城顺朝 TSC/MW	3467	2640	3466
	两分区 TSC 之和/MW	6495	5182	6008
柔性互联	昌城 TSC/MW	2719	2211	2564
	城顺朝 TSC/MW	3912	3180	3690
	两分区 TSC 之和/MW	6631	5391	6254
	整体 TSC 提升/MW	136	209	246
	整体 TSC 提升率/%	2.09	4.03	4.08

注:表中昌城分区为送端分区,城顺朝分区为受端分区。

表 3 电网达到 TSC 时受到的最强约束

Table 3 Main constraints when TSC of power grid is reached

运行方式	TSC 约束		
	状态 1	状态 2	状态 3
分区运行	昌城分区静态安全性	昌城分区暂态电压失稳	昌城分区暂态电压失稳
	城顺朝分区静态安全性	城顺朝分区静态安全性	城顺朝分区静态安全性
	静态安全性	静态安全性	静态安全性
柔性互联	城顺朝分区静态安全性	城顺朝分区静态安全性	城顺朝分区静态安全性
	静态安全性	静态安全性	静态安全性
装置作用	有功支援	有功支援	有功支援和动态无功支撑

对表 2 与表 3 分析可得如下结论。

a. 柔性互联后,整体 TSC 水平均得到提升。3 种初始状态下,分别提高 2.09%、4.03%、4.08%。

b. 当电厂偏少时,柔性互联对 TSC 提升作用更为明显。状态 1 电厂较多,提升率仅为 2.09%;状态 2 和 3 电厂较少,提升率均在 4% 以上。

c. 柔性互联后,送端分区 TSC 水平可能降低。在状态 1、2 中,昌城分区(送端分区)TSC 有所降低,原因为,互联后两分区成为一个整体,计算 TSC 时需考虑受端分区安全性,而受端分区安全性较低,限制了电网负荷可增长裕度,故送端分区 TSC 也受限,可能低于分区运行时的 TSC。

5.4.2 柔性互联后 TSC 提升原因总结

结合表 3 归纳 TSC 提升原因如下。

a. 分区互联装置提供的有功支援为受端分区提供了“虚拟电源”,减轻了受端分区负载压力,能够缓解分区运行时受端分区存在的静态安全约束瓶颈,增强电网整体 TSC 水平。

b. 分区柔性互联为 2 个分区分别提供了一个动态无功补偿点,有利于电网故障后电压恢复,增强电压稳定性,在某些电网结构中起到提升 TSC 的作用。如状态 3 中昌城分区 TSC 超越了开环运行时分区电压失稳的临界负荷水平,通过装置的动态无功补偿解决了暂态电压稳定问题,从而进一步提升 TSC。

6 结论

利用新型电力电子设备实现大型城市电网的分

区柔性互联,是未来城市电网发展的一个新思路。为此,本文提出了分区柔性互联城市电网 TSC 的概念与相关理论方法,主要工作如下:

a. 分析了分区柔性互联城市电网的典型运行模式与互联装置的工作原理;

b. 提出了分区柔性互联城市电网 TSC 的相关定义;

c. 提出了分区柔性互联城市电网 TSC 的数学模型,同时计及静态安全性与暂态电压稳定性;

d. 分析了柔性互联对 TSC 的提升原因,发现电厂较少时,提升作用更明显。

上述研究已用于国内外首个 220 kV 城市电网的分区柔性互联工程中。

参考文献:

- [1] 肖峻,张婷,张跃,等. 基于最大供电能力的配电网规划理念与方法[J]. 中国电机工程学报,2013,33(10):106-113.
XIAO Jun,ZHANG Ting,ZHANG Yue,et al. TSC-based planning idea and method for distribution networks[J]. Proceedings of the CSEE,2013,33(10):106-113.
- [2] XIAO Jun,LI Fangxing,GU Wenzhuo. Total Supply Capability (TSC) and associated indices for distribution planning definition, model, calculation and applications [J]. IET Generation, Transmission & Distribution, 2011, 5(8): 869-876.
- [3] 城市电力网规划设计导则: Q/GDW 156—2006 [S]. 北京: 中国电力出版社, 2006.
- [4] 孔波. 富阳电网的现状分析与规划研究[D]. 北京: 华北电力大学, 2012.
KONG Bo. Analysis of the current situation of fuyang power grid planning and research [D]. Beijing: North China Electric Power University, 2012.
- [5] 束洪春,胡泽江,刘宗兵. 城市电网最大供电能力在线评估方法及其应用[J]. 电网技术, 2008, 32(9): 46-50.
SHU Hongchun, HU Zejiang, LIU Zongbing. Online evaluation of utmost power supply ability of urban power system and its application [J]. Power System Technology, 2008, 32(9): 46-50.
- [6] 荆朝霞,江昌旭,王宏益. 考虑 $N-1$ 安全约束的 220 kV 片区电网最大供电能力计算[J]. 电力系统自动化, 2016, 40(19): 145-152.
JING Zhaoxia, JIANG Changxu, WANG Hongyi. Total supply capability calculation of 220 kV area power grid considering $N-1$ security constraint [J]. Automation of Electric Power Systems, 2016, 40(19): 145-152.
- [7] 孙思光,王克球,王宏益,等. 考虑 $N-1$ 静态安全约束的 220 kV 自愈式环网最大供电能力计算[J]. 南方电网技术, 2015, 9(7): 76-81.
SUN Siguang, WANG Keqiu, WANG Hongyi, et al. Total supply capability determination of 220 kV self-cure ring network considering $N-1$ static security constraint [J]. Southern Power System Technology, 2015, 9(7): 76-81.
- [8] 赵晋泉,居俐洁,罗卫华,等. 计及分区动态无功储备的无功电压控制模型与方法[J]. 电力自动化设备, 2015, 35(5): 100-105.
ZHAO Jinquan, JU Lijie, LUO Weihua, et al. Reactive voltage control model and method considering partitioned dynamic reactive power reserve [J]. Electric Power Automation Equipment, 2015, 35(5): 100-105.
- [9] 焦慧明,刘天琪,苏学能,等. 基于回溯思想改进 GN 算法的电磁环网自动分区方法[J]. 电力自动化设备, 2017, 37(5): 177-183.
JIAO Huiming, LIU Tianqi, SU Xueneng, et al. Automatic electromagnetic loop network partitioning based on backtracking-improved GN algorithm [J]. Electric Power Automation Equipment, 2017, 37(5): 177-183.
- [10] 汤广福,贺之渊,庞辉. 柔性直流输电工程技术研究、应用及发展[J]. 电力系统自动化, 2013, 37(15): 3-14.
TANG Guangfu, HE Zhiyuan, PANG Hui. Research, application and development of VSC-HVDC engineering technology [J]. Automation of Electric Power Systems, 2013, 37(15): 3-14.
- [11] 杨晓峰,林智钦,郑琼林,等. 模块组合多电平变换器的研究综述[J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(6): 21-27.
YANG Xiaofeng, LIN Zhiqin, ZHENG Trillion Q, et al. A review of modular multilevel converters [J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(6): 21-27.
- [12] 肖峻,伊丽达,郭伟,等. 城市电网分区柔性互联的概念与示范工程论证[J]. 供用电, 2016, 33(8): 2-6, 56.
XIAO Jun, YI Lida, GUO Wei, et al. The concept and demonstration project of flexible interconnection of urban power grid partition [J]. Distribution & Utilization, 2016, 33(8): 2-6, 56.
- [13] 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): 3140-3146.
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): 3140-3146.
- [14] 姚为正,邓祥纯,易映萍,等. 基于 $dq0$ 同步坐标的柔性直流输电控制策略及仿真研究[J]. 电力系统保护与控制, 2009, 37(22): 71-76.
YAO Weizheng, DENG Xiangchun, YI Yingping, et al. Research on modeling and simulation of VSC-HVDC based on $dq0$ synchronous coordinate [J]. Power System Protection and Control, 2009, 37(22): 71-76.
- [15] 刘嘉超,袁志昌,李岩,等. 柔性直流技术在负荷中心分网运行的应用[J]. 电网技术, 2016, 40(3): 683-688.
LIU Jiachao, YUAN Zhichang, LI Yan, et al. Application of VSC-HVDC technology in synchronous system segmentation of load center [J]. Power System Technology, 2016, 40(3): 683-688.
- [16] 侯建兰,刘育权,谢小荣,等. 一种量化评估暂态电压稳定性的指标与方法[J]. 电力自动化设备, 2015, 35(10): 151-156.
HOU Jianlan, LIU Yuquan, XIE Xiaorong, et al. Quantitative assessment index and method of transient voltage stability [J]. Electric Power Automation Equipment, 2015, 35(10): 151-156.

作者简介:



肖峻

肖峻(1971—),男,四川成都人,教授,博士,主要从事城市电网规划、评估与微网规划方面的研究和应用工作(E-mail: xiaojun@tju.edu.cn);

蒋迅(1993—),男,四川雅安人,硕士研究生,主要从事城市电网规划、评估方面的研究(E-mail: jiangxun0903@sina.com);

郭伟(1991—),男,山西晋中人,硕士研究生,主要从事城市电网规划、评估方面的研究(E-mail: guowei1991@tju.edu.cn)。

**Total power-supply capability of urban power grid
with flexibly-interconnected partitions**

XIAO Jun¹,JIANG Xun¹,GUO Wei²,LI Yun³,HUANG Renle³,CHEN Ping³

- (1. Key Laboratory of Smart Grid of Ministry of Education,Tianjin University,Tianjin 300072,China;
2. State Grid Tianjin Electric Power Company,Tianjin 300000,China;
3. State Grid Beijing Electric Power Company,Beijing 100031,China)

Abstract: The novel flexibly-interconnected operating modes of power grid is compared with the present partitioned operating mode and the basic working modes of flexible DC inter-partition connecting device are analyzed. The basic structure of inter-partition connecting device is introduced and its working principles during the active-power support and the dynamic reactive-power support among partitions are investigated. With the consideration of $N-1$ static security and transient voltage stability of power grid,the definition and model of total power-supply capability of urban power grid with flexibly-interconnected partitions are proposed and a simplified approximation method is given to solve it. Case study for a pilot project verifies the correctness of the proposed method. Compared with the traditional partitioned operation,the total power-supply capability of flexibly-interconnected partitions is enhanced.

Key words: partition; flexibly-interconnected; urban power network; total power-supply capability; inter-partition connecting device