

大功率柔性互联设备的有功互济协调控制方法*

王洪达^{1,2}, 杨曼³, 周煜韬¹, 曹常青¹, 李霞林², 李志旺², 郭力²

(1. 海军勤务学院 供应管理系, 天津 300450; 2. 天津大学 智能电网教育部重点实验室, 天津 300072;
3. 海军勤务学院 海防工程系, 天津 300450)

摘要:针对以常规母联开关互联的交流电网线路变压器容量无法合理利用的问题,提出了依靠由背靠背电压源变流器组成的新型大功率柔性互联装置实现两侧交流电网有功功率互济的协调控制方法。介绍了新型柔性互联装置的拓扑结构与基本的控制原理,为实现两侧线路变压器容量合理的目标制定了一种生成有功功率参考的方法,并基于PSCAD/EMTDC搭建了一套仿真算例,对新型柔性互联装置的基本控制与所提出的有功互济的协调控制方法进行了验证。仿真结果表明,在柔性互联装置采用所提方法时能够实现两侧交流线路的有功功率互济,解决了线路变压器容量无法合理分配的问题。

关键词:交流电网;柔性互联装置;有功互济;协调控制方法;容量分配

中图分类号:TM74 文献标志码:A 开放科学(资源服务)标识码(OSID):

文章编号:1001-2486(2023)02-037-08



听语音
与作者互动
聊科研

Coordinated control method of active power cooperation for high power flexible interconnected equipment

WANG Hongda^{1,2}, YANG Man³, ZHOU Yutao¹, CAO Changqing¹, LI Xialin², LI Zhiwang², GUO Li²

(1. Department of Supply Management, Naval Logistics Academy, Tianjin 300450, China;
2. Key Laboratory of Smart Grid Ministry of Education, Tianjin University, Tianjin 300072, China;
3. Department of Coast Defense Engineering, Naval Logistics Academy, Tianjin 300450, China)

Abstract: In order to solve the problem that the capacity of line transformer in AC power network interconnected by conventional bus switch can not be utilized reasonably, a coordinated control strategy for active power of AC power grid on both sides was proposed, which relies on a new type of high-power flexible interconnection equipment composed of back-to-back voltage source converter. The topological structure and basic control principle of the flexible interconnection equipment were introduced, and a method of generating active power reference was developed to realize the reasonable capacity of the transformers on both sides of the line. Moreover, a simulation example was built based on PSCAD/EMTDC to verify the basic control of the flexible interconnection equipment and the proposed coordinated control method of active power cooperation. Simulation results show that when the flexible interconnection equipment adopts the proposed method, the cooperation of active power of AC lines on both sides can be realized, and the problem that the capacity of line transformer can not be allocated reasonably is solved.

Keywords: AC power grid; flexible interconnection device; active power cooperation; coordinated control method; capacity allocation

随着城市配电网电力需求日益增长,供电的可靠性、安全性与经济性均受到了一定的挑战。在一些异源或多线路并联的系统中,负荷的分配不合理可能会造成单个电源或线路在重载条件下运行^[1]。因此,配电网必须通过良好规划、运行优化或技术设备升级、维护,以消除过载问题、降低电力损耗和改善电压质量等,电力电子设备的出现成为解决此类问题的一大关键^[2]。

在配电网优化运行中,智能软开关技术(soft

normally open point, SNOP)作为大功率柔性互联装置的一种,由于其良好的可控性,在负荷转供、改善电压质量及运行优化等方面得到了较为广泛的应用^[3-5]。文献[6]针对柔性互联配电网内的SNOP进行了多种运行模式的控制方法设计,在不同运行模式下分析了功率传输平衡的关系和切换逻辑,依靠SNOP的有功传输实现了馈线的负荷均衡;文献[7]利用SNOP使交流配电网为直流配电网提供惯量支撑,改善了直流电网的运行特

* 收稿日期:2021-04-25

基金项目:天津市自然科学基金资助项目(20JCQNJC00350)

作者简介:王洪达(1987—),男,河北沧州人,讲师,博士,E-mail:wanghongda000@126.com;

杨曼(通信作者),女,河北承德人,助教,硕士,E-mail:18795851002@163.com

性;文献[8]探讨了 SNOP 在供电恢复能力上的功能,对比了智能软开关与原始机械开关在供电恢复上的表现,表明了智能软开关在恢复程度、对电网电压和潮流的调节能力等方面的优越性;文献[9]从经济性角度出发,依靠改进的遗传算法对基于 SNOP 交直流主动配电网进行优化,以降低线路损耗,改善电压越限。在多端交流电网互联时,文献[10]利用柔性多状态开关,提出了一种计及关键节点负荷状态的负荷在线转供策略,协调了多条馈线间的功率以及故障区域的紧急转供;文献[11]在短时间尺度上通过引入电压波动迟滞控制实现对 SNOP 输出参考值的动态调整,改善了电压质量,提高了分布式电源的消纳能力。以上文献在理论上多方面探讨了 SNOP 在配电系统诸多领域的作用与价值,文献[12]则阐述了位于北京市延庆区八达岭经济开发区的国内首个多端柔性闭环中压配电网示范工程,介绍了装置的潮流控制策略与三种运行模式,这对后续实际工程的开展具有重要的借鉴意义。

从现有的研究与技术中可以看出,智能软开关技术对于配电网的运行改善有着十分重要的作用,对于此类电力电子设备,在未来的电力领域也会逐渐朝着更加先进、更加智能的方向发展。

本文的研究对象是双端线路的交流配电网。双端线路的交流配电网在常规母线开关的控制下两侧线路的功率流动是不可控的,解决该问题的思路则是通过电压源换流器(voltage source converter, VSC)替换常规开关,依靠双 VSC 并联的新型柔性互联设备实现对双端线路的柔性互联,进而对功率流动实现控制。在目前针对大功率柔性互联装置的控制方法中,在输电层面采用了诸如 PQ 控制^[13]、下垂控制^[14]、恒定直流电压控制^[15]、交流频率和电压控制^[16]等一系列的控制方法,若将以上这些方法应用在本文的研究对象中则仅能依靠本地信息来解决本地的功率问题,无法兼顾另外一侧线路的功率过载等极端情况。考虑到在两侧线路中存在功率表等测量仪器,如果能将一端的功率信号传输到 VSC 的定功率控制端,结合两侧变压器的容量比例改变互联装置的有功功率大小,便能实现两侧线路功率的协调控制。为此本文针对此柔性互联设备提出了一种两侧线路有功互济的协调控制策略,解决了单端线路变压器可能过载的问题,进而实现有功功率的合理分配。

1 系统结构与主要问题

在一些集装箱港口区域,供电一般从市电经

过 110 kV/10(35)kV 变压器接入,配电系统通常采用 10 kV 或 35 kV 中压配电网,然后通过该配电网给港口多个码头供电,接入码头变电房。通常一个码头为保证供电的可靠性,一般会通过两路变压器接入,形成两个独立的 400 V 交流母线。常规下两路交流母线通过母联开关 Switch 连接,如图 1 所示。

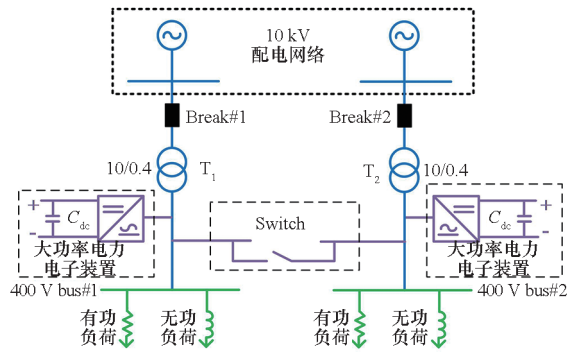


图 1 两路交流母线通过母联开关 Switch 连接示意图

Fig. 1 Diagram of the connection of two AC bus through the bus Switch

在图 1 所示的系统中,正常运行情况下,Switch 常开,不并联运行,只有当某路变压器或其上级供电系统出现故障(如 T_1 支路故障时),可以通过断开断路器 Break#1 隔离该支路故障,并快速闭合母联开关 Switch,实现负荷的转供。此外,为提高 400 V 交流母线处电压电能质量,可能会配置无功功率补偿装置,例如简单、便宜的装置如电容补偿或者控制能力更强、造价较贵的大功率电力电子装置的静止同步补偿装置(static synchronous compensator, STATCOM)。

然而,上述系统也存在一些亟待解决的问题:①正常运行时,母联开关 Switch 为常开。对于码头供电来说,实际为两路独立的供电回路。当某路的负荷容量接近变压器容量甚至超过该路变压器容量时,在考虑安全裕量的情况下,此时的供电系统是无法为靠岸船只提供全功率电力供应的,但从总的供电能力来讲,两路变压器的容量是足够的。因此,在现有供电结构和运行方式下,变压器容量无法得到合理利用是目前码头供电面临的最重要问题之一。②两路所安装的大功率电力电子装置造价高、相互独立,无法解决两个线路变压器容量不合理利用的问题。

为解决以上问题,可采用的方案便是采用新型大功率 AC-DC-AC 背靠背柔性互联电力电子装置对两 400 V 交流母线实施柔性互联,以取代图 1 中两套独立的交流大功率稳压装置,如

图 2 所示。

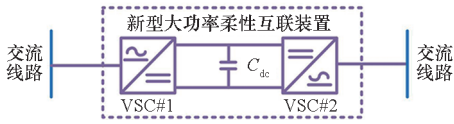


图 2 新型大功率柔性互联装置示意图

Fig. 2 Diagram of novel high-power flexible interconnection device

图 2 所示的新型柔性互联装置相比图 1 中独立的大功率电力电子装置的优势如下所示。

1) 图 2 中的新型大功率柔性互联装置在硬件装备层面仅做了简单改造,即将独立的两套 DC-AC 变流器的直流侧并联,成本几乎没有任何增加,还可以减小一半的直流母线电容量,能更进一步减小体积。此外,从电力电子装备可靠性层面,直流母线电容是比较容易出故障的元件之一,因此,直流母线电容量的减小也能进一步提高电力电子装备的可靠性。

2) 在同样具备可控无功补偿功能的同时,能实现两侧线路的有功功率互济,并通过相应的控制解

决两侧线路变压器容量无法合理利用的问题。

本文利用新型的大功率柔性互联设备,制定了应对两侧线路有功功率互济协调的控制策略,致力于解决线路变压器容量无法合理利用的问题。

2 新型大功率柔性互联设备及协调控制策略

2.1 新型柔性互联设备与交流电网拓扑结构

新型大功率柔性设备及交流线路的详细拓扑结构如图 3 所示。新型柔性互联装置由两个三相 VSC 组成。其中, T_1 、 T_2 为两侧变压器, v_{ai} 、 v_{bi} 与 v_{ci} ($i=1,2$) 为三相变流器入口与入口的相电压, i_{ai} 、 i_{bi} 与 i_{ci} 为三相变流器入口与入口的相电流, u_{dc} 为直流侧的电压, i_{dc1} 与 i_{dc2} 分别为流入直流侧与流出直流侧的电流, i_c 为流入直流电容的电流, L_{f1} 与 L_{f2} 为换流器桥臂上的滤波电感, R_1 与 R_2 为线路上等效的电阻值, E_{VSC} 为 VSC 出口的电压。柔性互联装置入口与出口均为交流母线用以接入有功、无功负荷等。

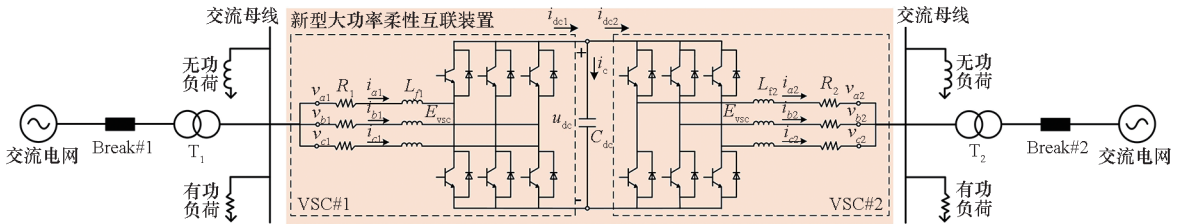


图 3 新型大功率柔性互联装置及交流电网拓扑结构

Fig. 3 Topology of the novel high-power flexible interconnection device and AC power network

2.2 新型大功率柔性互联设备的控制

2.2.1 控制系统基本坐标系

为简化控制,一般将图 3 所示系统的交流量均转化为 dq 坐标系下的直流量。其基本的坐标系如图 4 所示, abc 为三相静止坐标系, $\alpha\beta$ 为两相静止坐标系, dq 为两相旋转坐标系, E_{ac} 为与电网耦合点的电压(图 3 中 v_{ai} 、 v_{bi} 与 v_{ci} 处), I 为 VSC

与电网的电流矢量; θ_{pll} 为锁相角度, δ 为 E_{ac} 与 I 的夹角。

基于恒幅值变换及图 4 所示的坐标,三相电压与电流换算至 dq 坐标系的表达式为^[17]:

$$\begin{cases} \begin{pmatrix} x_\alpha \\ x_\beta \end{pmatrix} = 2/3 \begin{pmatrix} 1 & -1/2 & -1/2 \\ 0 & \sqrt{3}/2 & -\sqrt{3}/2 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x_a \\ x_b \\ x_c \end{pmatrix} \\ \begin{pmatrix} x_d \\ x_q \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos\theta_{pll} & \sin\theta_{pll} \\ \sin\theta_{pll} & -\cos\theta_{pll} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x_\alpha \\ x_\beta \end{pmatrix} \\ \begin{pmatrix} x_a \\ x_b \\ x_c \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos\theta_{pll} & \sin\theta_{pll} \\ \cos(\theta_{pll} - 120^\circ) & \sin(\theta_{pll} - 120^\circ) \\ \cos(\theta_{pll} + 120^\circ) & \sin(\theta_{pll} + 120^\circ) \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x_d \\ x_q \end{pmatrix} \end{cases} \quad (1)$$

式中, x 表示电气量,下标 a 、 b 、 c 、 d 、 q 、 α 、 β 为该电气量在相应坐标系下的分量。基于图 4 所示的坐标系,可得到 VSC 在 dq 下有功与无功的表达式为:

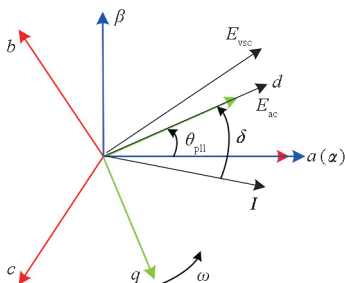


图 4 控制系统中的坐标系

Fig. 4 Coordinate system in control system

$$\begin{cases} P_{vsc,i} = 1.5(v_{di}i_{di} + v_{qi}i_{qi}) \\ Q_{vsc,i} = 1.5(v_{di}i_{qi} - v_{qi}i_{di}) \end{cases} \quad (2)$$

式中, $P_{vsc,i}$ 与 $Q_{vsc,i}$ 为 VSC 换流器的有功与无功功率, v_{di} 、 v_{qi} 分别为三相电压在 dq 坐标系下的电压分量, i_{di} 、 i_{qi} 分别为三相电流在 dq 坐标系下的电流分量。

2.2.2 锁相环的基本原理

锁相角度通过锁相环获得, 锁相环的控制如图 5 所示。图 5 中, k_{pp} 与 k_{ip} 为锁相环比例积分 (proportional-integral, PI) 控制的比例系数与积分系数, ω_B 、 ω_s 与 $\omega_{pll,pu}$ 分别为基准角速度、电网角速度与锁相频率标么值, T_f 为滤波系数。

图 5 所示的锁相环通过与 dq 变换形成闭环控制, 从而为 dq 变换提供锁相角度实现解耦, 再对 VSC 进行基本的控制。

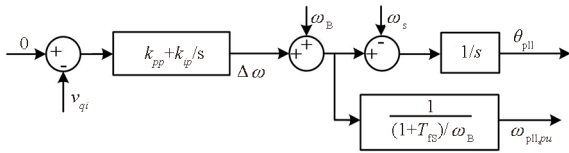


图 5 锁相环控制框图

Fig. 5 Control block diagram of phase-locked loop

2.3 新型柔性互联设备基本控制策略

对于图 3 所示的柔性互联设备而言, 必须有一端 VSC 控制直流侧电压的稳定, 另一端再进行定功率控制, 本文采用的控制配合为一端进行直流电压 - 无功控制 ($U_{dc} - Q$) 控制, 一端进行定有功 - 定无功 (constant active-constant reactive power, PQ) 控制, 即 VSC 定直流电压与定无功功率控制。

本文以 VSC#1 为直流电压的控制端, 定直流电压与定无功的控制策略如图 6 所示。

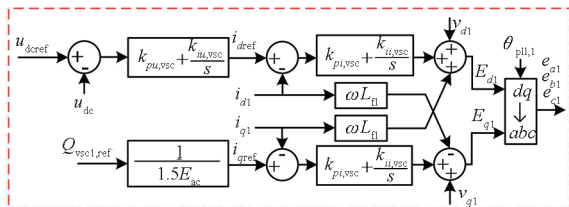


图 6 VSC#1 的控制策略框图

Fig. 6 Control strategy block diagram of VSC#1

图 6 中, u_{dcref} 为直流电压参考值, $k_{pu,vsc}$ 与 $k_{iu,vsc}$ 为电压环 PI 控制比例系数与积分系数, $k_{pi,vsc}$ 与 $k_{ii,vsc}$ 分别为电流环 PI 控制的比例系数与积分系数, $Q_{vsc1,ref}$ 为 VSC#1 的无功功率参考值。

d 轴参考电流 i_{dref} 通过对直流电压的 PI 控制获得。对于 q 轴电流参考而言, 在图 4 的坐标下,

q 轴电压分量为 0, d 轴电压分量为 E_{ac} , 所以可以在已知 $Q_{vsc1,ref}$ 情况下由式 (2) 十分简便的获得 i_{qref} , 而 $Q_{vsc1,ref}$ 可根据系统需要, 通过上层通信等方法进行调整, 从而调节交流电网内的无功功率来实现对电压的优化。

在实现直流电压的控制后, VSC#2 则可在 PQ 控制下进行有功无功的吸收与输出, 但常规的 PQ 控制难以解决两侧线路变压器容量分配不合理的问题, 所以本文提出了一种新的协调控制策略, 通过柔性互联装置来实现两侧交流线路的有功互济与合理分配。

2.4 有功互济协调控制策略

由于 VSC#2 为定有功与无功功率端, 可以实现期望的有功功率输送, 本文通过对 VSC#2 进行控制改进, 从而实现线路变压器容量的合理分配。

当变压器 T_1 的额定容量为 S_{T1} 、变压器 T_2 的额定容量为 S_{T2} 时, 为最大化利用两侧变压器的容量, 减少备用, 本文考虑按变压器容量比对系统内的有功负荷进行分配, 无功就地补偿。如果两个变压器容量比为 $S_{T1} : S_{T2} = m : n$, 有功潮流的示意图如图 7 所示。

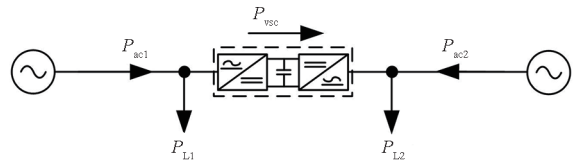


图 7 有功潮流示意图

Fig. 7 Schematic diagram of active power flow

本文期望实现的目标如下:

$$\begin{cases} P_{ac1} = \frac{m}{m+n}(P_{L1} + P_{L2}) \\ P_{ac2} = \frac{n}{m+n}(P_{L1} + P_{L2}) \end{cases} \quad (3)$$

根据功率平衡关系及图 7 所示的功率流向, 有以下关系:

$$\begin{cases} P_{ac1} + P_{ac2} = P_{L1} + P_{L2} \\ P_{vsc} = P_{ac1} - P_{L1} \\ P_{L2} = P_{vsc} + P_{ac2} \end{cases} \quad (4)$$

结合式 (3) 与式 (4), 可推导得到 P_{vsc} 应该传输的有功功率大小为:

$$P_{vsc} = \frac{mP_{L2} - nP_{L1}}{m+n} \quad (5)$$

利用式 (5) 调整 VSC#2 的有功功率输出大小, 从而解决两侧交流线路的有功功率互济, 实现线路变压器容量的合理利用, VSC#2 的控制策略如图 8 所示。

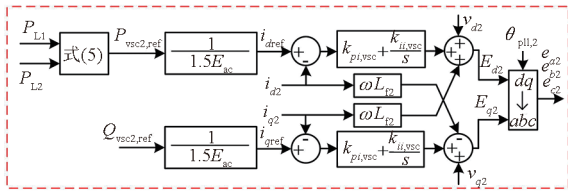


图8 VSC#2 控制策略框图

Fig.8 Control strategy block diagram of VSC#2

3 仿真验证

本节采用图3所示的交流电网与新型大功率柔性互联装置,在PSCAD/EMTDC中搭建详细的电路和控制系统仿真模型,交流电网内的有功与无功负荷通过工作在PQ控制下的变流器进行模拟,对本文所提出的功率协调控制策略进行了验证,仿真步长为 $1\ \mu\text{s}$,变流器的开关频率和控制周期分别为 $10\ \text{kHz}$ 和 $100\ \mu\text{s}$ 。系统详细硬件与控制参数如表1所示。

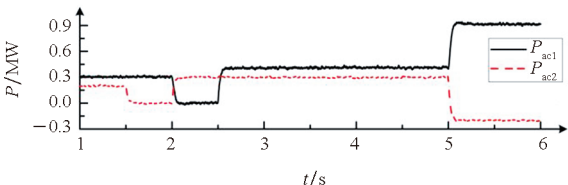
表1 系统电路与控制参数

Tab.1 System circuit and control parameters

| 单元 | 参数 | 数值 |
|------|------------------------------------|-------------|
| 交流电网 | 额定电压 | 10 kV |
| | 额定频率 | 50 Hz |
| | 变压器变比 | 10 kV/400 V |
| | 额定容量 | 1 MV · A |
| | 滤波电感 | 0.04 mH |
| VSC | 电压环PI参数($k_{pi,vsc}/k_{iu,vsc}$) | 10/100 |
| | 电流环PI参数($k_{pi,i}/k_{ii,vsc}$) | 5/500 |
| | 锁相环PI参数(k_{pp}/k_{ip}) | 10/100 |
| 直流侧 | 额定直流电压 | 750 V |
| | 直流电容(C_{dc}) | 0.5 mF |

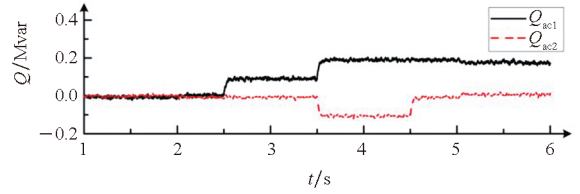
3.1 工况1:常规互联运行

该工况中 T_1 与 T_2 变压器的额定容量均为 $1\ \text{MV} \cdot \text{A}$,VSC#2 PQ控制的有功参考为定值,仿真结果如图9所示。



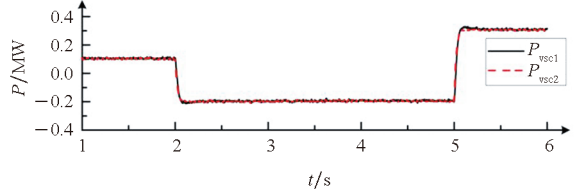
(a) 交流电网的有功功率

(a) Active power of AC grid



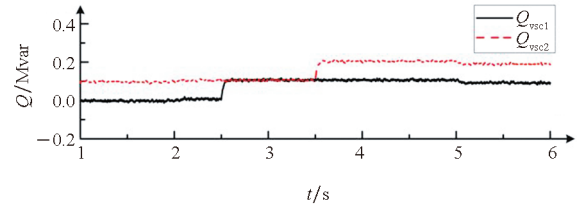
(b) 交流电网的无功功率

(b) Reactive power of AC grid



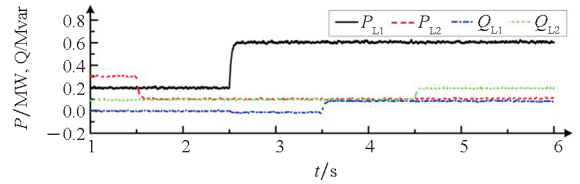
(c) 新型柔性互联装置的有功功率

(c) Active power of the new type of flexible interconnection device



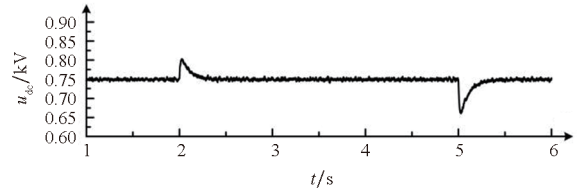
(d) 新型柔性互联装置的无功功率

(d) Reactive power of the new type of flexible interconnection device



(e) 交流电网中的有功与无功负荷功率

(e) Active and reactive load power in AC power grid



(f) 直流电容电压

(f) DC capacitor voltage

图9 工况1的仿真结果

Fig.9 Simulation results of case 1

系统正常启动后,在 $t < 1.5\ \text{s}$ 时,VSC#1侧有功负荷与无功负荷分别为 $0.2\ \text{MW}$ 与 0 ,VSC#2侧有功与无功功率分别为 $0.3\ \text{MW}$ 与 $0.1\ \text{Mvar}$;VSC#1的无功功率参考为 0 ,VSC#2的有功与无功参考分别为 $0.3\ \text{MW}$ 与 $0.1\ \text{Mvar}$ 。

$t = 1.5\ \text{s}$ 时,VSC#2侧有功负荷减少至

0.1 MW, 此时该侧交流电网的有功 P_{ac2} 降为 0;

$t = 2$ s 时, VSC#2 的有功参考由 0.1 MW 变为 -0.2 MW (即向 VSC#1 侧进行有功输送), 直流电容电压受到扰动后又回至恒定点, VSC#1 向本地交流电网侧输送 0.2 MW 的有功, P_{ac1} 降至 0, P_{ac2} 增加至 0.3 MW;

$t = 2.5$ s 时, VSC#1 无功参考变为 0.1 Mvar, 本地侧有功负载 P_{L1} 变为 0.6 MW, 交流电网有功与无功功率进行响应分别增加至 0.4 MW 与 0.1 Mvar;

$t = 3.5$ s 时, VSC #2 的无功参考变为 0.2 Mvar, VSC #1 侧的无功负荷 Q_{L1} 变为 0.1 Mvar, 稳态后, Q_{ac1} 变为 0.2 Mvar, Q_{ac2} 变为 -0.1 Mvar;

$t = 4.5$ s 时, VSC#2 侧的无功负荷 Q_{L2} 变为 0.2 Mvar, Q_{ac2} 变为 0;

$t = 5$ s 时, VSC#2 的有功功率参考变为 0.3 MW, 交流电网有功功率 P_{ac1} 与 P_{ac2} 稳定后分别为 0.9 MW 与 -0.2 MW, 直流电容电压也在跌落恢复稳定值。

3.2 工况 2: 有功互济协调控制方法验证 ($S_{T_1} : S_{T_2} = 1 : 1$)

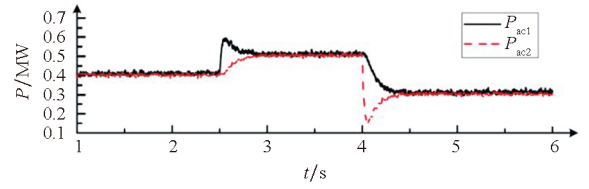
该工况中 T_1 与 T_2 变压器的额定容量均为 $1 \text{ MV} \cdot \text{A}$, 即 $1 : 1$, 此工况中 VSC#2 采用图 8 所示的有功互济协调控制策略, 仿真结果如图 10 所示。

$t < 2.5$ s 时, VSC#1 侧的有功与无功负荷功率分别为 0.3 MW 与 0, VSC#2 侧有功负荷与无功负荷功率分别为 0.5 MW 与 0.1 Mvar, 此时柔性互联装置传输的有功大小为 P_{vsc} 为 0.1 MW, 无功功率为 Q_{vsc1} 为 0, Q_{vsc2} 为 0.1 Mvar, 两侧交流电网功率分别为 $P_{ac1} = P_{ac2} = 0.4 \text{ MW}$, $Q_{ac1} = Q_{ac2} = 0$;

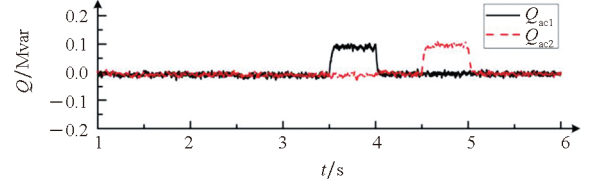
$t = 2.5$ s 时, VSC#1 侧有功负荷由 0.3 MW 增加到 0.5 MW, 可以看出, 此时柔性互联装置的有功功率降至 0, 两侧交流电网的功率均增加至 0.5 MW, 直流电容电压在扰动后也恢复至 0.75 kV;

$t = 3.5$ s 时, VSC #1 侧的无功负荷变为 0.1 Mvar, VSC#1 的无功参考暂时无动作, 相应 Q_{ac1} 增加至 0.1 Mvar;

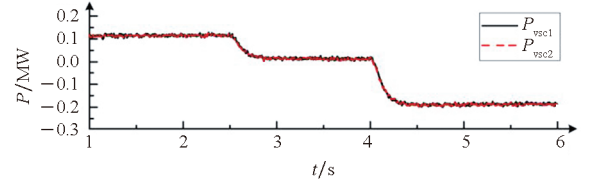
$t = 4$ s 时, VSC#2 侧有功负荷降至 0.1 MW, VSC#1 的无功功率参考变为 -0.1 Mvar, 稳态后 P_{ac1} 与 P_{ac2} 均降至 0.3 MW, Q_{ac1} 变为 0, 柔性互联装置的功率变为 -0.2 MW, 直流电容电压扰动后恢复 0.75 kV;



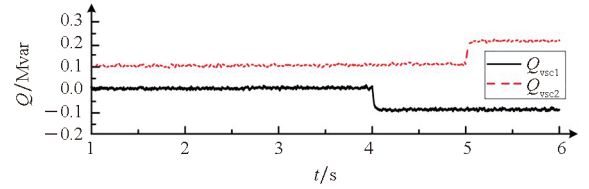
(a) 交流电网的有功功率
(a) Active power of AC grid



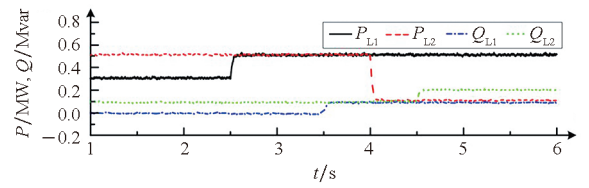
(b) 交流电网的无功功率
(b) Reactive power of AC grid



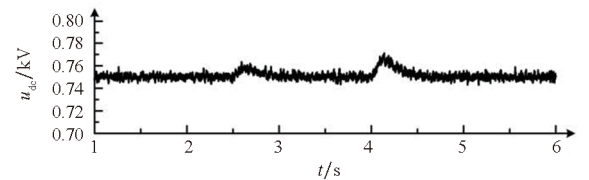
(c) 新型柔性互联装置的有功功率
(c) Active power of the new type of flexible interconnection device



(d) 新型柔性互联装置的无功功率
(d) Reactive power of the new type of flexible interconnection device



(e) 交流电网中的有功与无功负荷功率
(e) Active and Reactive Load Power in AC Power Grid



(f) 直流电容电压
(f) DC capacitor voltage

图 10 工况 2 仿真结果

Fig. 10 Simulation results of case 2

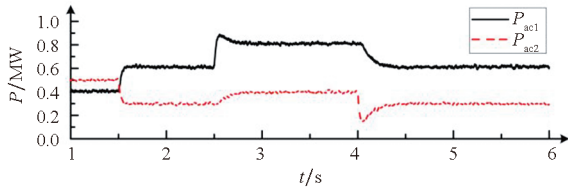
$t = 4.5$ s 时, VSC#2 侧的无功负荷增加至 0.2 Mvar, 相应 Q_{ac2} 增加至 0.1 Mvar;

$t = 5$ s 时, VSC#2 的无功功率参考变为 0.2 Mvar, 交流电网无功功率 Q_{ac2} 变为 0。

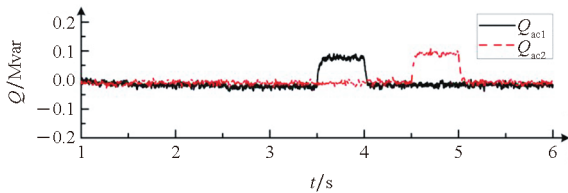
从仿真结果可以看出, 柔性互联装置两侧的有功功率稳态后一直保持相同的数值, 达到了期望的控制目标, 实现了两侧有功功率的协调控制, 验证了本文所提有功互济协调控制方法的有效性。

3.3 有功互济协调控制方法验证 ($S_{T_1} : S_{T_2} = 2 : 1$)

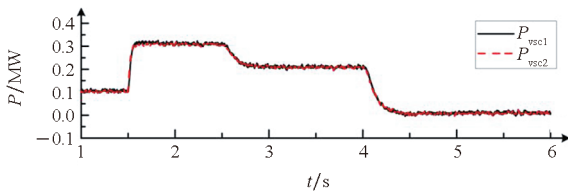
该工况中 T_1 变压器额定容量为 $2 \text{ MV} \cdot \text{A}$, T_2 变压器的额定容量为 $1 \text{ MV} \cdot \text{A}$, 即 $2 : 1$, 此工况中 VSC#2 在 $t = 1.5$ s 前采用常规 PQ 控制, $t = 1.5$ s 后启动图 8 所示的有功互济协调控制策略, 仿真结果如图 11 所示。



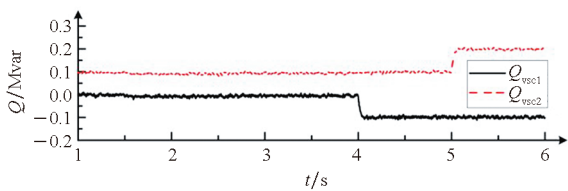
(a) 交流电网的有功功率
(a) Active power of AC grid



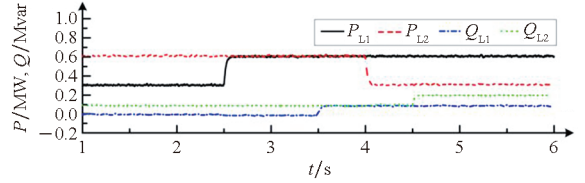
(b) 交流电网的无功功率
(b) Reactive power of AC grid



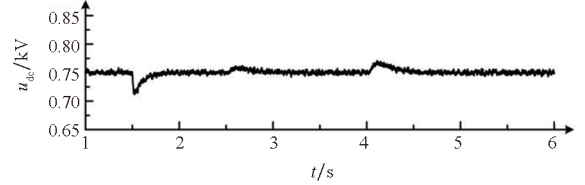
(c) 新型柔性互联装置的有功功率
(c) Active power of the new type of flexible interconnection device



(d) 新型柔性互联装置的无功功率
(d) Reactive power of the new type of flexible interconnection device



(e) 交流电网中的有功与无功负荷功率
(e) Active and reactive load power in AC power grid



(f) 直流电容电压
(f) DC capacitor voltage

图 11 工况 3 仿真结果

Fig. 11 Simulation results of case 3

$t < 1.5$ s 时, VSC#1 侧的有功与无功负荷功率分别为 0.3 MW 与 0, VSC#2 侧有功负荷与无功负荷功率分别为 0.6 MW 与 0.1 Mvar, 此时柔性互联装置传输的有功大小为 P_{vsc} 为 0.1 MW, 无功功率为 Q_{vsc1} 为 0, Q_{vsc2} 为 0.1 Mvar, 两侧交流电网功率分别为 $P_{ac1} = 0.4$ MW, $P_{ac2} = 0.5$ MW, $Q_{ac1} = Q_{ac2} = 0$;

$t = 1.5$ s 时, 启动图 8 所示的有功互济协调控制方法, 此时柔性互联装置的功率输出变为 0.3 MW, 两侧交流电网功率变为 $P_{ac1} = 0.6$ MW, $P_{ac2} = 0.3$ MW, 满足 $2 : 1$ 的分配关系, 直流电容电压在扰动后也恢复至 0.75 kV;

$t = 2.5$ s 时, VSC#1 侧有功负荷由 0.3 MW 增加到 0.6 MW, 此时柔性互联装置的有功功率降至 0.2 MW, 两侧交流电网的有功功率分别变为 $P_{ac1} = 0.8$ MW, $P_{ac2} = 0.4$ MW, 此时能够达到期望的目标;

$t = 3.5$ s 时, VSC#1 侧的无功负荷变为 0.1 Mvar, VSC#1 的无功参考暂时无动作, 相应 Q_{ac1} 增加至 0.1 Mvar;

$t = 4$ s 时, VSC#1 的无功功率参考变为 -0.1 Mvar, VSC#2 侧的有功负荷变为 0.3 MW, 柔性互联装置的有功功率变为 0, 此时两侧交流电网功率又变为 $P_{ac1} = 0.6$ MW, $P_{ac2} = 0.3$ MW, 仍满足所期望的功率分配关系, Q_{ac1} 变为 0;

$t = 4.5$ s 时, VSC#2 侧的无功负荷增加至 0.2 Mvar, 相应 Q_{ac2} 增加至 0.1 Mvar;

$t = 5$ s 时, VSC#2 的无功功率参考变为 0.2 Mvar, 交流电网无功功率 Q_{ac2} 变为 0。

从仿真结果可以看出, 在变压器容量比例发生变化后, 柔性互联装置依然能够按照期望的功率进行传输, 解决了两侧变压器容量无法合理利

用的问题,实现了有功的协调控制,进一步验证了本文所提有功互济的协调控制方法的有效性。

4 结论

本文介绍了双 VSC 背靠背形式的新型大功率柔性互联装置,该装置在双交流线路的结构中,能够代替常规的母联开关,通过高度可控的特性实现两侧交流线路的柔性互联;同时本文还提出了一种有功互济的协调控制方法,用以解决两侧线路中的变压器容量无法合理利用的问题,通过 PSCAD/EMTDC 中搭建的仿真算例与仿真结果,可以看出:

- 1) 新型大功率柔性互联设备能够通过灵活的控制实现两侧线路的有功传输;
- 2) 通过对无功功率参考的调整可以利用柔性互联装置快速实现无功的补偿或吸收;
- 3) 在不同的变压器容量下,本文所提出的有功互济方法均能够使柔性互联装置传输期望的有功功率,解决了变压器容量无法合理分配的问题,实现了两侧线路间的有功协调控制。

相信在未来的发展中,新型大功率柔性装置能够在多种场合更好地发挥作用,满足用户的多样化需求,增加电网的智能化程度,提高电力系统的可靠性与安全性。

参考文献 (References)

- [1] KE Y L, CHEN C S, KANG M S, et al. Power distribution system switching operation scheduling for load balancing by using colored Petri nets [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2004, 19(1): 629-635.
- [2] MAJUMDER R. Aspect of voltage stability and reactive power support in active distribution [J]. IET Generation, Transmission & Distribution, 2014, 8(3): 442-450.
- [3] 徐腾, 袁旭峰, 班国邦, 等. 基于 SNOP 的不停电转供技术研究[J]. 现代电子技术, 2020, 43(23): 112-115.
XU T, YUAN X F, BAN G B, et al. Research on uninterruptible power transfer technology based on SNOP[J]. Modern Electronics Technique, 2020, 43(23): 112-115. (in Chinese)
- [4] 于金龙, 赵墨林, 王渊. 基于 PSCAD 的智能软开关仿真分析[J]. 内蒙古电力技术, 2020, 38(2): 29-33, 37.
YU J L, ZHAO M L, WANG Y. Simulation analysis of SNOP based on PSCAD[J]. Inner Mongolia Electric Power, 2020, 38(2): 29-33, 37. (in Chinese)
- [5] 袁志昌, 魏应冬, 刘文华, 等. 柔性互联交流配电网的换流器并离网统一控制策略[J]. 电力自动化设备, 2020, 40(2): 1-7, 304.
YUAN Z C, WEI Y D, LIU W H, et al. Connecting and islanding universal control strategy for VSC of AC distribution grids [J]. Electric Power Automation Equipment, 2020, 40(2): 1-7, 304. (in Chinese)
- [6] 段青, 沙广林, 盛万兴, 等. 配电网柔性互联系统多模式运行及其调控策略[J]. 电力自动化设备, 2020, 40(11): 9-24.
DUAN Q, SHA G L, SHENG W X, et al. Multi-mode operation and its control strategy of flexible interconnected system for distribution network[J]. Electric Power Automation Equipment, 2020, 40(11): 9-24. (in Chinese)
- [7] 窦晓波, 皇甫霄文, 全相军, 等. 交直流配电网柔性多状

态开关电压自适应控制策略[J]. 电力系统自动化, 2021, 45(8): 68-76.

- DOU X B, HUANGFU X W, QUAN X J, et al. Adaptive voltage control strategy for soft normally open point in AC/DC distribution network [J]. Automation of Electric Power Systems, 2021, 45(8): 68-76. (in Chinese)
- [8] 张利军, 孙轶恺, 茅逸斐, 等. 基于智能软开关的配电网供电恢复联合优化策略[J]. 水电能源科学, 2019, 37(11): 180-184.
ZHANG L J, SUN Y K, MAO Y F, et al. Joint optimization strategy for power restoration of distribution network based on soft open point [J]. Water Resources and Power, 2019, 37(11): 180-184. (in Chinese)
 - [9] 孟明, 魏怡, 朱国林, 等. 基于智能软开关的交直流主动配电网优化控制策略研究[J]. 现代电力, 2019, 36(2): 1-7.
MENG M, WEI Y, ZHU G L, et al. Research on optimal control strategy of AC/DC active distribution networks based on soft open point [J]. Modern Electric Power, 2019, 36(2): 1-7. (in Chinese)
 - [10] 祝旭煊, 童宁, 林湘宁, 等. 基于柔性多状态开关的主动配电网负荷在线紧急转供策略[J]. 电力系统自动化, 2019, 43(24): 87-95.
ZHU X H, TONG N, LIN X N, et al. Flexible multi-state switch based online emergency load transferring strategy for active distribution network[J]. Automation of Electric Power Systems, 2019, 43(24): 87-95. (in Chinese)
 - [11] 晏阳, 廖清芬, 胡静竹, 等. 基于 SNOP 的主动配电网多时间尺度优化策略[J]. 电力建设, 2016, 37(2): 125-131.
YAN Y, LIAO Q F, HU J Z, et al. Multi-time scale optimization strategy of active distribution network based on SNOP[J]. Electric Power Construction, 2016, 37(2): 125-131. (in Chinese)
 - [12] 尹昌新, 朱洁, 蒋迅, 等. 多端柔性闭环中压配电网示范工程[J]. 电力系统及其自动化学报, 2019, 31(2): 66-73.
YIN C X, ZHU J, JIANG X, et al. Demonstration Project of multi-terminal flexible closed-loop medium-voltage distribution network[J]. Proceedings of the CSU-EPSA, 2019, 31(2): 66-73. (in Chinese)
 - [13] 徐玉琴, 方楠. 基于稳压控制的独立光储微电网控制策略研究及仿真分析[J]. 电力系统保护与控制, 2020, 48(21): 67-74.
XU Y Q, FANG N. Control strategy research and simulation analysis of an independent optical storage microgrid based on voltage stabilizing control [J]. Power System Protection and Control, 2020, 48(21): 67-74. (in Chinese)
 - [14] 司鑫尧, 赵竞涵, 于森, 等. 一种适用于多电压等级直流配电网的分散式双向电压支撑控制方法[J]. 电力自动化设备, 2021, 41(5): 114-120.
SI X Y, ZHAO J H, YU M, et al. Decentralized bidirectional voltage support control method available for multi-voltage level DC distribution network [J]. Electric Power Automation Equipment, 2021, 41(5): 114-120. (in Chinese)
 - [15] LI X L, LI Z W, GUO L, et al. Enhanced dynamic stability control for low-inertia hybrid AC/DC microgrid with distributed energy storage systems [J]. IEEE Access, 2019, 7: 91234-91242.
 - [16] 荣梦飞, 吴红斌, 吴通华, 等. 提高直驱风电经柔直并网系统稳定性的改进 V/F 控制策略[J]. 电网技术, 2021, 45(5): 1698-1706.
RONG M F, WU H B, WU T H, et al. Improved V/F control strategy for enhancing stability of direct-drive wind power with VSC-HVDC system [J]. Power System Technology, 2021, 45(5): 1698-1706. (in Chinese)
 - [17] 李霞林. 交直流混合微电网稳定运行控制[D]. 天津: 天津大学, 2014: 21-22.
LI X L. Stable operation and control of a hybrid AC/DC microgrid[D]. Tianjin: Tianjin University, 2014: 21-22. (in Chinese)