

# 基于柔性直流输电的异步互联系统频率支援控制方法综述

朱良合<sup>1</sup>, 袁志昌<sup>2</sup>, 盛超<sup>1</sup>, 骆潘钊<sup>1</sup>, 杨汾艳<sup>1</sup>, 刘正富<sup>1</sup>, 郭敬梅<sup>1</sup>

(1. 广东电网有限责任公司电力科学研究院, 广东 广州 510075;

2. 清华大学 电机工程与应用电子技术系, 北京 100084)

**摘要:** 利用基于电压源换流器的柔性直流输电(VSC-HVDC)的快速功率控制能力实现异步互联的交流电网间的频率支援, 可以充分发挥全系统备用容量的调节能力, 提高互联系统的安全性和稳定性。综述了国内外该领域的研究现状, 详细介绍了基于通信的主从控制、利用电压传递频率波动的主从控制、附加频率调节的下垂控制以及基于虚拟同步机特性的控制等不同方法的基本原理。通过统一的仿真模型对比分析了各种方法的控制特点和性能, 从工程应用角度总结了这些方法的优缺点以及进一步研究的方向。

**关键词:** 柔性直流输电; 异步互联系统; 频率支援控制; 主从控制; 下垂控制; 虚拟同步机

**中图分类号:** TM 721.1

**文献标识码:** A

**DOI:** 10.16081/j.issn.1006-6047.2019.02.013

## 0 引言

直流异步互联的电网结构受到国内外越来越多的关注, 特别是经历“8·14”大停电事故之后, 美国的电网规划倡导拆分巨型同步网, 采用直流异步互联<sup>[1-3]</sup>。

与传统的基于电网换相换流器的高压直流输电LCC-HVDC(Line-Commutated Converter based HVDC)相比, 基于电压源换流器的柔性直流输电VSC-HVDC(Voltage Source Converter based High Voltage Direct Current)具有控制能力强、响应速度快、有功与无功解耦输出等优点, 并且不受交流电网短路容量的限制, 适合向无源系统送电, 并且具备组成直流电网的条件, 因此受到国内外的高度关注, 成为电气工程领域的研究热点<sup>[4-7]</sup>, 该技术在电网异步互联方面的应用也得到了广泛认可。

目前在国内外已有数十个柔性直流工程建成投运, 直流电压最高达到 $\pm 320$  kV, 单站传输容量达到1 200 MW·A。这些工程的主要应用场景包括<sup>[8-10]</sup>: 离岸或岸上风电并网(如德国北海风电工程、南汇工程、南澳工程、舟山工程等), 海岛供电(如挪威 Troll 工程), 远距离直流输电(如纳米比亚 Caprivi Link 工程), 负荷中心供电(如美国 Trans Bay Cable 工程、厦门工程等), 以及交流电网异步互联(如美国 Eagle Pas-Texas 背靠背工程、英国-爱尔兰联网工程、鲁西背靠背工程等)。

已有的用于交流电网异步互联的柔性直流工程通常侧重其异步隔离的功能, 按照预设的传输功率

值运行, 将交流电网的故障限制在自身区域内, 防止影响另一侧电网。然而, 当柔性直流输送功率相较于送受端交流电网的容量占有较大的比例时, 也应考虑其在交流电网之间发挥事故支援的能力, 因为柔性直流传输的有功、无功可以在数十毫秒内快速精确调整, 发挥这种受控的快速调节能力, 可提高整个互联系统的安全稳定性, 同时避免系统间的事后传递。

基于柔性直流输电的异步互联系统频率支援控制是实现上述目标的手段之一, 目前尚停留在理论研究阶段, 国内外学者从不同的角度对这一问题开展了大量的研究。本文首先对该领域的研究现状做了详细的梳理, 并通过 PSCAD 下的数字仿真比较分析了各种方法的应用特点和控制性能, 最后从工程应用的角度探讨了这些方法的适用性以及进一步的研究方向, 为国内外研究者和电力工作者提供参考。

## 1 基于柔性直流输电的异步互联系统结构

基于柔性直流输电的异步互联系统结构如图1所示。图1中,  $AC_1-AC_3$  为3个交流电网;  $G_1-G_3$  为3个交流电网的等值电源;  $L_1-L_3$  为3个交流电网的等值负荷;  $VSC_1-VSC_3$  为3个柔性直流换流站; DC 表示直流线路。系统根据互联的换流站端数可以分为两端和多端系统。基于电压源型换流器(VSC)的柔性直流换流站可以主动控制各端直流电压的大小, 从而控制直流电网的潮流流向, 这就为多端直流和直流电网的形成奠定了基础, 为交流电网提供了更为灵活的异步互联方式。

柔性直流换流站通常采用同步旋转坐标下的  $d$ 、 $q$  轴电流结构控制<sup>[11]</sup>, 其结构如图2所示。这一控制结构在变频调速、静止同步补偿器(STATCOM)、风电变流器等 VSC 中已获得广泛的应用, 是一种成熟的技术方案。图2中  $i_d$  和  $i_{dref}$  分别为  $d$  轴电流及其参考值;  $i_q$  和  $i_{qref}$  分别为  $q$  轴电流及其参考值;  $u_d$

收稿日期: 2017-09-11; 修回日期: 2018-07-04

基金项目: “广东电网柔性直流背靠背异步联网控制保护策略与系统特性研究”项目(GDKJQQ20152052)

Project supported by the Program of Study on Control and System Characteristics of Back-to-back VSC-HVDC Asynchronous Inter-connection in Guangdong Power Grid(GDKJQQ20152052)

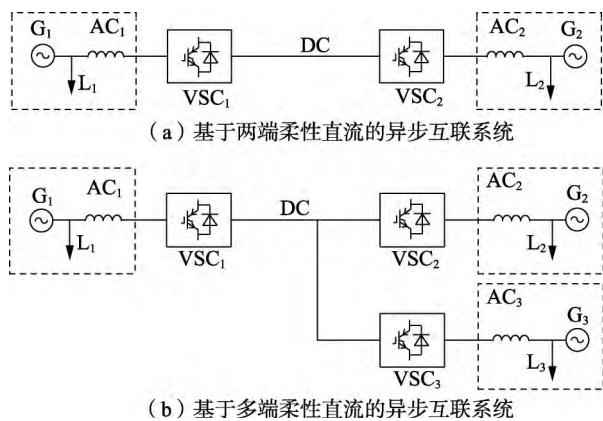


图1 基于柔性直流输电的异步互联系统结构示意图

Fig.1 Structure diagram of asynchronous interconnection system based on VSC-HVDC

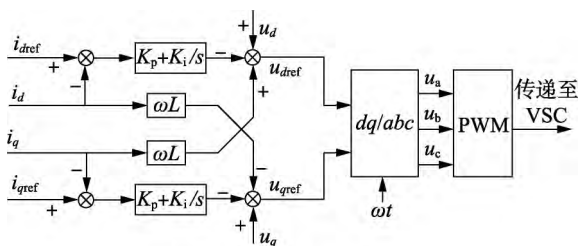


图2 柔性直流换流站内环电流解耦控制

Fig.2 Inner current decoupled control of VSC-HVDC station

和  $u_{dref}$  分别为  $d$  轴电压及其参考值;  $u_q$  和  $u_{qref}$  分别为  $q$  轴电压及其参考值;  $K_p$  和  $K_i$  分别为比例系数和积分系数;  $\omega$  为交流系统角频率;  $L$  为换流器连接电抗的电感。内环电流控制调整 VSC 输出电压的相位和幅值,其目标是无差地跟踪设定的  $d$  轴电流参考值  $i_{dref}$ 、 $q$  轴电流参考值  $i_{qref}$ 。而  $d$ 、 $q$  轴电流参考值由外环控制器计算得到,通常情况下  $d$  轴电流  $i_d$  根据换流站需输出的有功功率或直流电压值决定,而  $q$  轴电流  $i_q$  根据换流站需输出的无功功率或交流侧电压决定。本文统一选取从换流站交流侧流向直流侧的功率为有功功率的正方向。

## 2 频率支援控制方法

### 2.1 柔性直流参与频率控制的原理

通常情况下,柔性直流换流站以其传输的功率为直接控制目标,其控制特性不随交流电网的电压和频率波动而变化,从这个角度实现两侧交流系统的异步互联。当需要柔性直流参与交流系统频率控制时,其基本的原理是在有功功率控制器上增加一个附加控制<sup>[12-13]</sup>,如图3所示。图中  $f$  和  $f_{ref}$  分别为交流电网频率及其参考值;  $P$  和  $P_{ref}$  分别为有功功率及其参考值;  $K_f$  为频率调节比例系数。类似发电机组的调速系统<sup>[14]</sup>,柔性直流换流站的有功附加控制器检测交流电网的频率偏差,通过比例或比例积分控制计算得到附加功率增量,将该增量注入交流电

网实现对频率的调节。

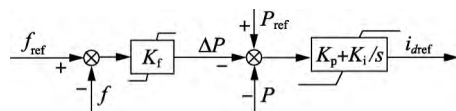


图3 柔性直流的附加频率外环控制

Fig.3 Additional outer frequency control of VSC-HVDC

在两端柔性直流输电系统中,通常采用主从控制,即一端定电压,另外一端定功率。在定功率站设置上述附加频率控制后,可有效地解决其并入电网的频率控制问题,例如当交流电网频率落后,换流站自动增加输出功率,实现对交流电网频率的支援,直流系统传输功率的变化自动传递到定电压站,定电压站从其并网系统吸收的功率增加,从而实现了异步互联电网之间的频率支援。然而,对于定电压站而言,由于其控制目标是保证直流电压额定,无法直接控制有功功率,因此附加频率控制不能在定电压站实现,造成定电压站无法对该侧交流系统的频率波动施加调节作用。

另一方面,对于采用主从控制的多端柔性直流输电系统而言,每个定功率端仅仅响应自身接入交流系统的频率波动,当仅有某个定功率端发生频率波动时,其余定功率端由于频率维持恒定,并不会改变传输功率,从而无法对发生频率波动的交流电网发挥频率支援的作用,导致不能充分发挥全系统备用容量的调频能力。

### 2.2 基于通信的频率支援控制

为了解决2.1节所述的问题,国内外学者提出了各种使异步互联的分区之间具备自动频率支援能力的方法。一种相对简单的方法是通过通信的方式将各个分区的频率信息传递到各个换流站,并在换流站的功率外环上叠加附加频率控制<sup>[15-18]</sup>,如图4所示。图中  $f_1$ — $f_3$  分别为3个交流电网的频率;  $K_{p1}$ — $K_{p3}$  为比例系数;  $P_2$  和  $P_{2ref}$  分别为区域2换流器功率及其参考值;  $i_{dref2}$  为区域2换流器的  $d$  轴电流参考值。与2.1节中的方法不同,该附加频率控制综合了所有互联区域的频率偏差信息,从而可以响应任意区域内的频率波动,实现全系统备用容量的充分利用。

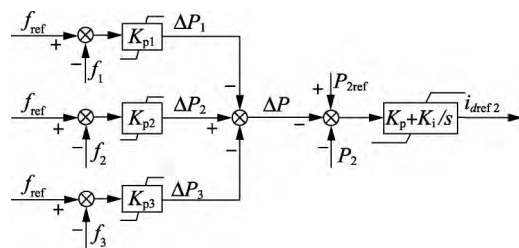


图4 基于站间通信的频率附加控制外环

Fig.4 Additional frequency control based on communication among VSC-HVDC stations

基于通信的方法原理清晰、结构简单、参数整定也比较容易<sup>[19]</sup>。然而其缺点在于对通信的依赖性高,当异步互联电网的规模较大时,或者柔性直流换流站间的地理距离较远时,通信的延时或中断都会对该方法的控制性能造成严重的影响。此外,远距离通信的投资成本也制约了该方法的实用性。

### 2.3 基于直流电压传递频率波动的主从控制

为了摆脱站间通信给频率支援控制带来的种种限制,相关学者提出了多种不同技术方案,尽管这些方法在实现形式和控制性能上有不同的特点,但其基本思路都是主动利用柔性直流输电系统的直流侧电压作为传递各个异步互联区域频率变化的媒介,本质上是用天然传输的强电信号替代了额外附加的通信弱电信号。根据实现形式的不同,这些方法可以分为基于直流电压传递频率波动的主从控制方法、基于下垂控制的频率控制方法、基于虚拟同步机 VSG (Virtual Synchronous Generator) 特性的频率控制方法。

文献[20]提出在汇集风电的 LCC-HVDC 系统中利用直流电压传递频率波动的主从控制方法,文献[21-24]研究了这种思路在 VSC-HVDC 系统中的应用方法。基于直流电压传递频率波动信号的主从控制结构如图 5 所示<sup>[21-24]</sup>。图中,  $U_{dc1}$  和  $U_{dcref}$  分别为换流站 1 的直流电压及其参考值;  $U_{dc2}$  为换流站 2 的直流电压;  $\alpha_1$ 、 $\alpha_2$  为频率-功率下垂斜率;  $\beta$  为直流电压-功率下垂斜率。以图 1(a) 所示的两端系统为例介绍其基本原理。假设接入交流系统 AC<sub>1</sub> 的换流站 VSC<sub>1</sub> 为从站,采用定功率控制; 接入交流系统 AC<sub>2</sub> 的换流站 VSC<sub>2</sub> 为主站,采用定直流电压控制。

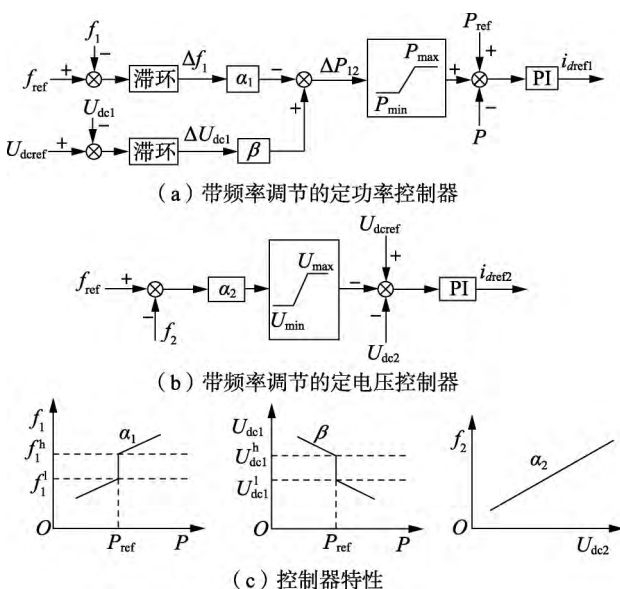


图 5 基于直流电压传递频率波动的主从控制

Fig.5 Master-slave control based on frequency fluctuation delivery by DC voltage

为了使 AC<sub>2</sub> 参与 AC<sub>1</sub> 的调频,需要在 VSC<sub>1</sub> 的外环电流增加一个随 AC<sub>1</sub> 的频率  $f_1$  变化的附加功率增量(见图 5(a)),其原理与图 3 相似。为了使 AC<sub>1</sub> 参与 AC<sub>2</sub> 的调频,则需要同时对 VSC<sub>1</sub> 和 VSC<sub>2</sub> 的外环电流控制器进行改造,首先在 VSC<sub>2</sub> 的定电压控制器中增加一个随 AC<sub>2</sub> 的频率  $f_2$  变化的直流电压附加量(见图 5(b)),当  $f_2$  跌落时,主动降低 VSC<sub>2</sub> 的直流电压参考值;然后,在 VSC<sub>1</sub> 的定功率控制器中增加一个随直流电压变化的附加功率增量(图 5(a)),当检测到直流电压跌落时,主动增加从 AC<sub>2</sub> 交流侧吸收的功率,这样就实现了 AC<sub>2</sub> 向 AC<sub>1</sub> 提供频率支援的功能。为了避免控制器的动态响应过于灵敏,通常在频率和电压的动作值设置一定的死区,控制器的斜率特性如图 5(c) 所示。

由图 5 可以看出,此类方法中主站和从站的控制器结构完全不同,当应用于多端柔性直流或直流电网时,随着电网发生故障或网络拓扑的变化,往往需要快速在不同换流站之间变换主站与从站的角色以维持电网的稳定运行,使得控制系统的复杂性剧增,这一特点限制了该方法的适应性,其灵活性不如下垂控制。

### 2.4 基于下垂控制的频率支援控制

由于下垂控制具有无需通信、控制结构简单、可扩展性好等优势,更适用于多端柔性直流系统<sup>[24]</sup>。传统的下垂控制如图 6 所示,内环电流控制的参考电流  $i_{dref}$  由直流电压和传输功率共同决定,如式(1)所示。

$$i_{dref} = (K_p + K_i/s) [(U_{dcref} - U_{dc}) + K_D(P_{ref} - P)] \quad (1)$$

其中  $K_D$  为电压-功率下垂斜率。

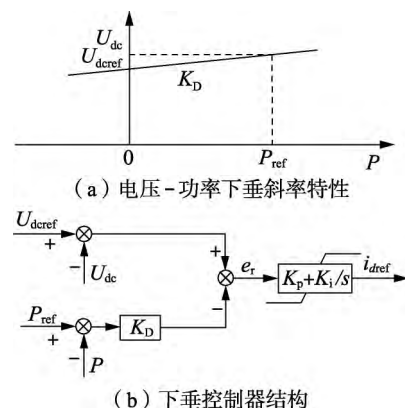


图 6 柔性直流换流站电压-功率下垂控制

Fig.6 Voltage-power droop control of VSC-HVDC station

在比例积分控制器的作用下,当系统达到稳态时,换流站的直流电压随输出功率变化的特性如图 6(a) 所示,额定运行点为  $(P_{ref}, U_{dcref})$ ; 当注入直流侧的功率增大或减小时,直流电压按照斜率为  $K_D$  的线性特性自动下垂。

单纯的电压-功率下垂控制并不能响应交流系

统的频率波动,为了解决这一问题,文献[25]提出在下垂控制的功率参考值中附加一个频率外环(见图 7(a)),为了防止微小的频率波动引起参考功率频繁变化,在频率-功率下垂特性中设置了死区<sup>[26]</sup>(见图 7(b)),仅当频率低于下限 $f_l$ 或超过上限 $f_h$ 时参考功率才会发生变化,变化斜率为 $K_f$ 。文献[27]提出的使功率随电压平方下垂的策略也可获得相似的控制效果。

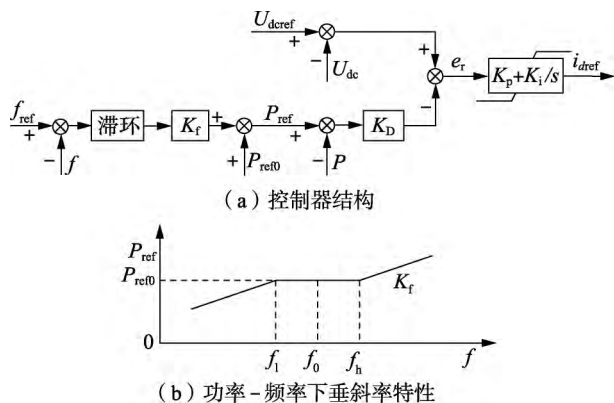


图 7 含附加频率控制的换流站下垂控制

Fig.7 Droop control of VSC-HVDC station with additional frequency control

互联的每个换流站都采用图 7 所示的下垂控制后,当任意一个交流区域的频率变化超过死区设定值时,都会引起换流站输出功率的变化,直接调节交流电网频率。同时,在电压-功率下垂特性的作用下,直流电压也会相应地进行上下调节,并传递到其他换流站。这些换流站根据直流电压的变动改变输出功率,从而在实现了各个交流系统互联的同时支援发生频率扰动的交流系统,从整体上降低功率缺额引起的频率偏差。从上述工作原理可见,下垂控制也是利用直流电压作为传递各个异步互联系统频率波动信息的媒介。

## 2.5 基于 VSG 特性的频率控制方法

VSC 的优点是输出的动态响应速度非常快,然而随着这一类设备越来越多地应用在电网中,其缺少惯量和阻尼的问题日益突出,尤其近年来受到广泛关注<sup>[28-30]</sup>。为了解决上述问题,学术界提出 VSG 的概念<sup>[28]</sup>,其基本结构如图 8(a)所示。图中 $\omega_0$ 为交流电网角频率的参考值; $\omega_{ref}$ 为换流站输出角频率; $s$ 为微分算子; $\theta_{ref}$ 为换流站输出电压的相角; $P_0$ 为设定的功率参考值; $Q$ 和 $Q_{ref}$ 分别为无功功率及其参考值; $U_0$ 为设定的电压参考值; $U_{ref}$ 为换流站输出电压参考值。基本原理是通过模拟同步发电机的本体模型、有功调频及无功调压等特性,使并网逆变器从运行机制和外特性上可与传统同步发电机相比拟。同步机模拟控制 SGEN (Synchronous Generator Emulation Control) 可以看作是 VSG 技术的另一种形

式<sup>[30]</sup>,其结构如图 8(b)所示。图中 $u_{dq}$ 和 $u_{dqref}$ 分别为交流侧 $dq$ 轴电压及其参考值; $i_{dq}$ 和 $i_{dqref}$ 分别为 $dq$ 轴电流及其参考值; $v_{dq}$ 为换流站 $dq$ 轴输出电压。两者的主要区别在于 VSG 直接控制 VSC 输出的电压幅值和频率(相位),而 SGEN 的内环电流控制与图 2 所示的内环电流解耦控制相似,只不过在计算三相参考电压时用到的电压相位角是通过一个模拟同步发电机转动惯量的计算得到,从而使 VSC 的输出特性具备一定的惯量。

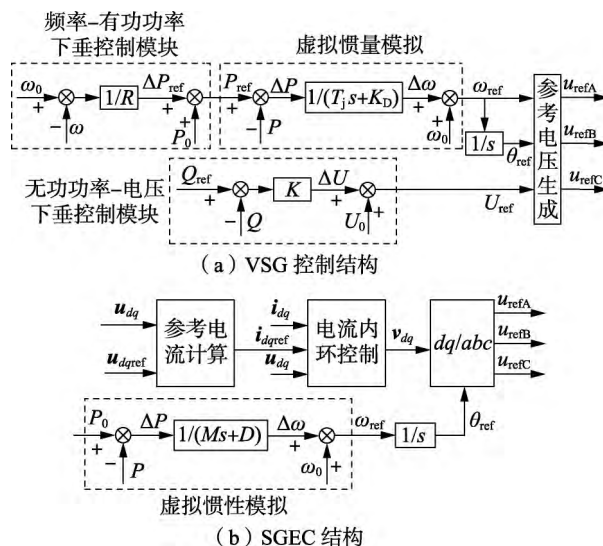


图 8 具有 VSG 特性的换流站控制器

Fig.8 Controller in converter station with characteristics of VSG

由于 VSG 技术的出发点是模拟同步发电机的运行特性,所以其天然具有参与交流电网频率控制的能力<sup>[31-36]</sup>。如图 8(a)所示,频率-有功功率下垂控制模块会自动响应交流电网的频率变化,修正换流器的有功功率参考值,通过增、减换流器功率实现调节电网频率。然而,图 8 所示的 VSG 类控制方法通常采用主从式控制,即需要一个主站(通常是与容量较大的电网相连的一端)将直流电压控制在设定值,为其他采用 VSG 类控制的从站提供运行基础。与传统主从控制方式相同,定直流电压的主站无法响应所连系统的频率波动,这是其不足之处。

为了解决这个问题,文献[36]提出一种基于电压平方-功率下垂的 VSG 控制方案,其结构如图 9 所示。在有功功率参考值上附加了一个与电压平方具有下垂特性的控制外环,这个外环的主要作用是将有功功率的升降转换为直流电压的变化,并通过直流线路将这种变化传递到互联的各个换流站端,触发全系统功率备用参加频率调节。互联的各换流站均采用图 9 所示的控制方法后,不再设定主站和从站,从而解决了上述主从控制方法的问题。

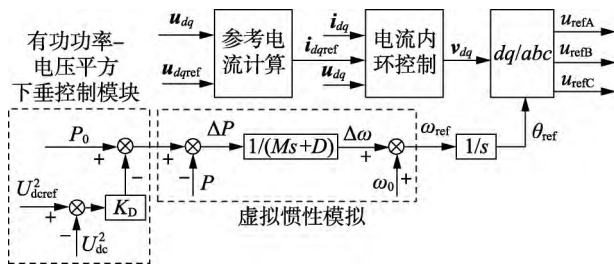


图 9 基于 VSG 特性的频率控制结构

Fig.9 Frequency control structure based on characteristics of VSG

### 3 各种方法的仿真比较

本文在 PSCAD/EMTDC 中建立了统一仿真平台,通过数字仿真比较各种频率支援控制方法的性能差异。为了兼顾两端系统和多端系统,选取图 1(b) 所示的三端系统建立仿真模型,其主要参数如表 1 所示。

表 1 仿真系统主要参数

Table 1 Main parameters of simulation system

参数	数值		
	AC <sub>1</sub>	AC <sub>2</sub>	AC <sub>3</sub>
发电容量/MW	2 400	1 800	800
负荷容量/MW	900	600	600
备用容量/MW	1 500	1 200	200
一次调频下垂系数/%	5	5	5
换流站容量/MW	2 000	1 000	1 000
交流电压/kV	500	500	500
直流电压/kV	700	700	700

#### 3.1 算例 1: 受端负荷投入

仿真的时序如下:当  $t$  在  $0 \sim 1$  s 之间时,系统启动,柔性直流换流站建立直流电压,传输设定的功率值,定义从交流系统流向直流电网的功率为正方向,3 个换流站的功率分别为  $P_1 = 500$  MW、 $P_2 = -400$  MW、 $P_3 = -100$  MW;在  $t = 2$  s 时刻,区域 3 有 300 MW 负荷投入运行,负荷曲线见图 10,由于该区域的备用容量较小,其频率跌落至约 49 Hz。需要说明的是,该仿真的主要目的是对比不同频率控制方法的特性,因此在调速系统中仅考虑了一次调频的有差调节特性。未施加频率支援控制的频率曲线如图 11 所示。从图 11 中可以看出,区域 1 和区域 2 的频率未发生变化,这 2 个区域均未参加对区域 3 的频率支援。

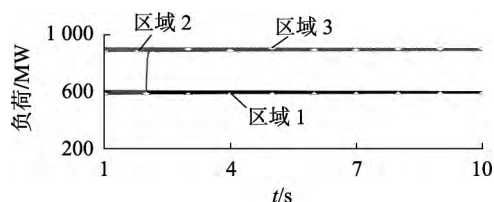


图 10 负荷曲线

Fig.10 Load curves

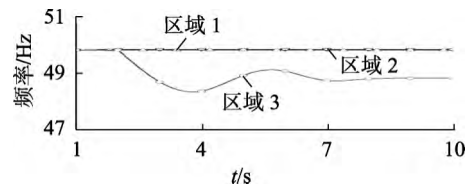
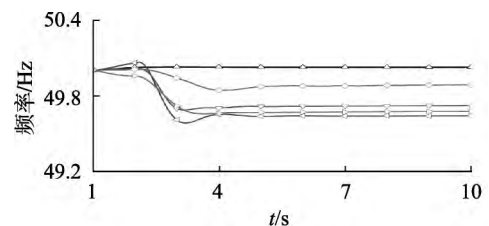


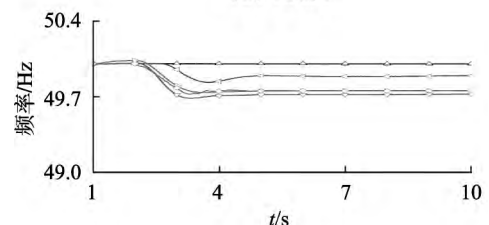
图 11 未施加频率支援控制的频率曲线

Fig.11 Frequency curves without frequency support control

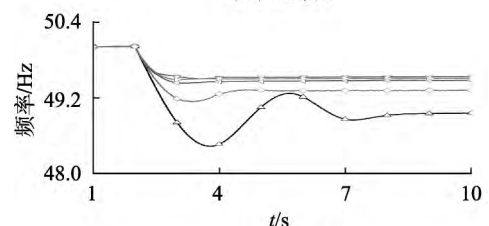
在该平台上仿真研究了各种频率支援控制方法的控制性能,图 12 给出了各个区域的频率曲线,可以看出,采用上述 4 类方法均可以实现异步互联区域的频率支援,发生扰动的区域 3 的频率从 49 Hz 显著提升,而未发生扰动的区域 1 和区域 2 的频率则有所下降,这体现了柔性直流从健全区域吸收功率,补偿扰动区域功率缺额的控制目标,实现了互联区域备用容量的共享,减小了异步互联区域的整体频率偏差。



(a) 区域 1



(b) 区域 2



(c) 区域 3

— 无控制, — 基于通信的频率支援控制  
— 基于直流电压传递频率波动的主从控制  
— 基于下垂控制的频率支援控制, — SEGC

图 12 受端投入负荷的频率曲线

Fig.12 Frequency curves when receiving end system increases load

图 13 给出了各种控制方法下的直流侧电压,可以看出,基于通信的控制方法仍然为主从式控制,直流电压由主站控制,因此其直流电压仍保持为额定状态。其余方法均需要通过直流电压的偏差来传递频率波动的信息,因此会出现不同程度的电压跌落。

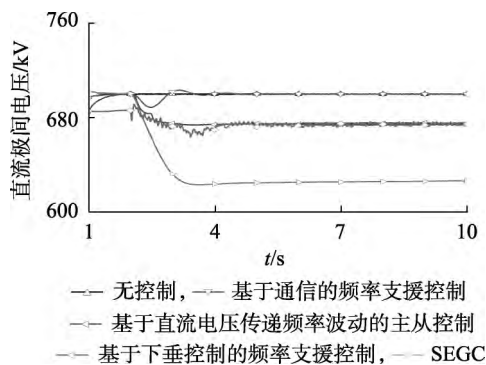


图 13 受端投入负荷的直流电压曲线

Fig.13 DC voltage curves when receiving end system increases load

## 3.2 算例 2: 送端负荷投入

$t=2\text{ s}$  时刻,在柔性直流送端的区域 1 有 300 MW 的负荷投入运行,该区域频率跌落至约 49 Hz。图 14 给出了各种控制方法下区域 1 的频率仿真曲线,相比于无控制的情形,各种频率支援控制均可以在不同程度上抑制区域 1 的频率跌落,将该区域的频率控制在 49.5 Hz 左右。不同控制方式下直流极间电压曲线如图 15 所示,除基于通信的频率控制方法外,其余频率支援控制方法下的直流电压都低于额定值。

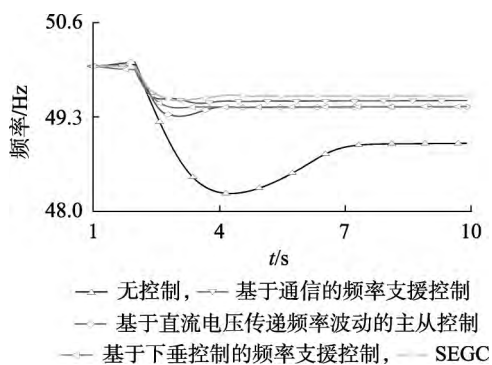


图 14 送端投入负荷的频率曲线

Fig.14 Frequency curves when sending end system increases load

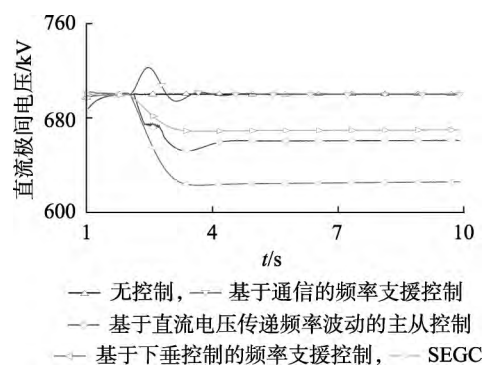


图 15 送端投入负荷的直流电压曲线

Fig.15 DC voltage curves when sending end system increases load

## 3.3 算例 3: 受端发生故障后失去负荷

$t=2\text{ s}$  时刻,柔性直流受端的区域 2 发生交流线路三相短路故障,0.1 ms 后线路跳开,切除故障,同时损失 200 MW 负荷。图 16 给出了各种控制方法下区域 2 的频率仿真曲线,图 17 为直流极间电压曲线。可以看出,当无频率控制时,区域 2 的频率上升,并出现振荡;施加频率支援控制后,频率上升的幅度降低,振荡衰减的速度也加快;除基于通信的控制方法外,其余频率支援控制方法下的直流电压都高于额定值。

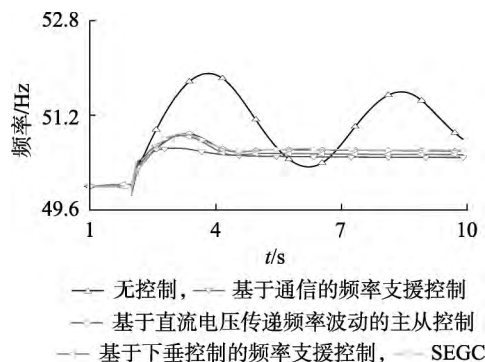


图 16 受端发生故障后失去负荷的频率曲线

Fig.16 Frequency curves when receiving end system occurs fault and loses load

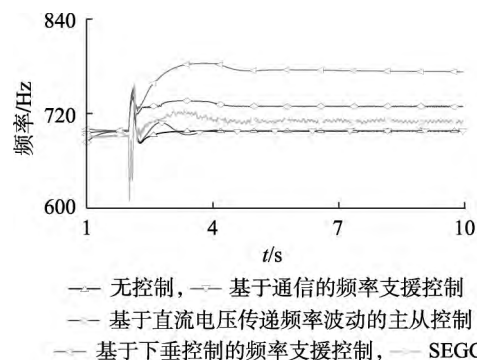


图 17 受端发生故障后失去负荷的直流电压曲线

Fig.17 DC voltage curves when receiving end system occurs fault and loses load

从上述仿真结果可看出,现有各种频率支援控制方法在频率调节能力方面具有不同程度的效果,各种方法的性能比较如表 2 所示,主要体现在以下 5 个方面。

表 2 各种方法的性能比较

Table 2 Performance comparison among different methods

方法	是否需要通信	直流电压	控制器结构	扩展性
基于通信的频率支援控制	是	额定值	简单	受限
基于直流电压传递频率波动的主从控制	否	变化	简单	受限
附加频率调节的下垂控制	否	变化	简单	灵活
基于 VSG 特性的频率控制方法	否	变化	复杂	灵活

a. 基于通信的频率支援控制方法在频率调节能力方面表现优异,并且直流电压可以维持在额定值,这是其最大的优点,而其他方法都需要由直流电压传递频率波动信号,直流电压通常会偏离额定值,这一特性不利于柔性直流系统的稳定运行,当直流电压偏离额定值较远时,有可能引起直流保护动作。

b. 从控制器结构来看,基于VSG特性的控制方法相对比较复杂,部分参数的选取与连接的电网特性有关,参数整定难度高;而其他方法的控制器结构均比较简单,控制器的参数也具有较高的鲁棒性。

c. 从可扩展性来看,附加频率调节的下垂控制和基于VSG特性的频率控制方法中各个换流器的控制策略是相同的,且没有主站和从站之分,因而可以方便地扩展换流器端数。而基于通信或基于直流电压传递频率波动的主从控制方法则需要区分主站和从站,此外基于通信的主从控制还需要随着互联端数的增减修改其频率附加控制的结构,这些特点限制了其扩展能力。

d. 基于通信的主从控制是唯一需要站间通信的方法,这将增加成本、降低可靠性,在长距离输电或多端直流场合,这一缺点显得尤为突出;另外3种方法均不依赖于通信,工程实用性更好。

e. 在直流背靠背场合,由于两侧的频率测量值可以方便的获取,因而适合采用基于通信的主从控制方法,发挥其频率调节效果好、直流电压无偏差的优点。在具有较长输电线路的两端柔性直流系统中,考虑通信成本和可靠性,不宜采用基于通信的主从控制,宜采用基于直流电压传递频率波动的主从控制或附加频率调节的下垂控制。在多端柔性直流系统中,考虑其拓扑变化的可能性,宜采用各端对等的下垂控制方法。在连接弱交流电网或含大量风电的场合,可采用基于VSG特性的频率控制方法,以提高柔性直流换流站的稳定性。

#### 4 结论和展望

利用柔性直流快速精确的功率控制能力实现异步互联交流系统间频率支援控制,是提高互联系统安全稳定一种有效途径。本文综述了国内外文献在利用柔性直流实现异步互联交流电网频率支援控制的研究现状,并通过一个三端系统仿真对比了各种控制方法的性能。理论分析和仿真结果表明,各种频率支援控制方法在频率调节能力方面具有不同程度的效果,其中基于通信的主从控制较适合在背靠背场合应用,基于VSG特性的控制方法适合在连接弱交流电网或风电场合应用,利用直流电压传递频率变化的主从控制可应用于两端远距离输电系统。相对而言,附加频率调节的下垂方案具有控制结构简单、可灵活扩展端数、不依赖通信的优点,具有较

高的工程实用性,在各种场合尤其是多端柔性直流或直流电网中具有优势。然而其直流电压通常不能维持额定值,在出现频率扰动时需要主动调节直流电压,这是该方法的不足之处。如何克服或减小该问题对柔性直流系统稳定运行的影响是下一步研究的方向。此外,在多端异步互联系统中,如何根据不同交流系统的备用容量和发电机特性,优化整定频率控制器的参数,获取最佳的频率调节效果,这也是有待进一步研究的问题。

#### 参考文献:

- [1] XU Z, HUANG H, TANG G, et al. Two new techniques to solve the problems with multi-infeed HVDC systems[C]//International Conference on Power System Technology. Chengdu, China: IEEE, 2014: 2075-2082.
- [2] CLARK H, EDRIS A, EL-GASSEIR M, et al. Softening the blow of disturbances[J]. IEEE Power and Energy Magazine, 2008, 1(6): 30-41.
- [3] CLARK H K, EL-GASSEIR M M, EPP H K, et al. The application of segmentation and grid shock absorber concept for reliable power grids[C]//International Middle-East Power System Conference. Aswan, Egypt: IEEE, 2008: 34-38.
- [4] OOI B T, WANG X. Boost type PWM HVDC transmission system[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 1991, 6(1): 1557-1563.
- [5] 汤广福. 基于电压源换流器的高压直流输电技术[M]. 北京: 中国电力出版社, 2009: 68-72.
- [6] 徐政. 柔性直流输电系统[M]. 北京: 机械工业出版社, 2013: 20-22.
- [7] 徐政, 陈海荣. 电压源换流器型直流输电技术综述[J]. 高电压技术, 2007, 33(1): 1-10.  
XU Zheng, CHEN Hairong. Review and applications of VSC HVDC[J]. High Voltage Engineering, 2007, 33(1): 1-10.
- [8] 李岩, 罗雨, 许树楷, 等. 柔性直流输电技术: 应用、进步与期望[J]. 南方电网技术, 2015, 9(1): 7-13.  
LI Yan, LUO Yu, XU Shukai, et al. VSC-HVDC transmission technology: application advancement and expectation[J]. Southern Power System Technology, 2015, 9(1): 7-13.
- [9] 乐波, 梅念, 刘思源, 等. 柔性直流输电技术综述[J]. 中国电机(技术版), 2014(5): 43-47.  
YUE Bo, MEI Nian, LIU Siyuan, et al. Outview of HVDC flexible[J]. China Electric Power( Technology Edition), 2014(5): 43-47.
- [10] 董云龙, 凌卫家, 田杰, 等. 舟山多端柔性直流输电控制保护系统[J]. 电力自动化设备, 2016, 36(7): 169-175.  
DONG Yunlong, LING Weijia, TIAN Jie, et al. Control & protection system for Zhoushan multi-terminal VSC-HVDC[J]. Electric Power Automation Equipment, 2016, 36(7): 169-175.
- [11] 赵成勇, 李金丰, 李广凯. 基于有功和无功独立调节的VSC-HVDC控制策略[J]. 电力系统自动化, 2005, 29(9): 20-24.  
ZHAO Chengyong, LI Jinfeng, LI Guangkai. VSC-HVDC control strategy based on respective adjustment of active and reactive power[J]. Automation of Electric Power Systems, 2005, 29(9): 20-24.
- [12] 张少康, 李兴源, 王渝红. HVDC附加控制策略对频率稳定性的影响研究[J]. 电力系统保护与控制, 2011, 39(19): 100-103.



- ZHANG Shaokang ,LI Xingyuan ,WANG Yuhong. Research on the effect of HVDC additional control strategy on frequency stability [J]. Power System Protection and Control ,2011 ,39 ( 19 ) : 100-103.
- [13] 周密,徐箭,孙元章. 多端柔性直流电网平抑风电波动的协调控制策略[J]. 电力自动化设备, 2016 ,36( 12 ) : 29-35.
- ZHOU Mi ,XU Jian ,SUN Yuanzhang. Coordinated control restraining wind power fluctuation of VSC-MTDC[J]. Electric Power Automation Equipment ,2016 ,36( 12 ) : 29-35.
- [14] KUNDUR P. 电力系统稳定与控制[M]. 北京: 中国电力出版社, 2001: 234-240.
- [15] STERPU S ,TUAN M N. Sharing frequency response between asynchronous electrical systems[C]//Power & Energy Society General Meeting. IEEE. Calgary ,AB ,Canada: IEEE ,2009: 1-6.
- [16] MIAO Z ,FAN L ,OSBORN D ,et al. Wind farms with HVDC delivery in inertial response and primary frequency control [J]. IEEE Transactions on Energy Conversion ,2010 ,25( 4 ) : 1171-1178.
- [17] DAI J ,PHULPIN Y ,SARLETTE A ,et al. Coordinated primary frequency control among non-synchronous systems connected by a multi-terminal high-voltage direct current grid [J]. IET Generation Transmission & Distribution ,2012 ,6( 2 ) : 99-108.
- [18] ANDREASSON M ,WIGET R ,DIMAROGONAS D V ,et al. Distributed frequency control through MTDC transmission systems [J]. Ifac Papersonline ,2015 ,48( 22 ) : 106-111.
- [19] HARARNEFORS L ,JOHANSSON N ,ZHANG L. Impact on interarea modes of fast HVDC primary frequency control [J]. IEEE Transactions on Power Systems ,2017 ,32( 2 ) : 1350-1358.
- [20] PHULPIN Y. Communication-free inertia and frequency control for wind generators connected by an HVDC-link [J]. IEEE Transactions on Power Systems ,2012 ,27( 2 ) : 1136-1137.
- [21] 朱瑞可,王渝红,李兴源,等. 用于 VSC-HVDC 互联系统的附加频率控制策略[J]. 电力系统自动化, 2014 ,38( 16 ) : 81-87.
- ZHU Ruike ,WANG Yuhong ,LI Xingyuan ,et al. An additional frequency control strategy for interconnected systems through VSC-HVDC [J]. Automation of Electric Power Systems ,2014 ,38( 16 ) : 81-87.
- [22] RAFFERTY J ,XU L ,WANG Y ,et al. Frequency support using multi-terminal HVDC systems based on DC voltage manipulation [J]. IET Renewable Power Generation ,2017 ,10( 9 ) : 1393-1401.
- [23] 鲍正杰,李生虎. 基于 VSC-HVDC 有功支援和自适应低频减载的区域电网频率控制[J]. 电力系统保护与控制, 2014 ,42( 20 ) : 32-37.
- BAO Zhengjie ,LI Shenghu. Frequency control for regional system based on active power support from VSC-HVDC and adaptive under-frequency load shedding [J]. Power System Protection and Control ,2014 ,42( 20 ) : 32-37.
- [24] CHAUDHURI N R ,CHAUDHURI B. Adaptive droop control for effective power sharing in Multi-Terminal DC ( MTDC ) grids [J]. IEEE Transactions on Power Systems ,2013 ,28( 1 ) : 21-29.
- [25] HAILESELASSIE T M ,UHLIN K. Primary frequency control of remote grids connected by multi-terminal HVDC [C]//IEEE Power and Energy Society General Meeting. Providence ,RI ,USA: IEEE , 2010: 1-6.
- [26] 朱瑞可,李兴源,应大力. VSC-MTDC 互联系统频率稳定控制策略[J]. 电网技术, 2014 ,38( 10 ) : 2729-2734.
- ZHU Ruike ,LI Xingyuan ,YING Dali. A frequency stability control strategy for interconnected VSC-MTDC transmission system [J]. Power System Technology ,2014 ,38( 10 ) : 2729-2734.
- [27] CHAUDHURI N R ,MAIUMDER R ,CHAUDHURI B. System frequency support through Multi-Terminal DC ( MTDC ) grids [J]. IEEE Transactions on Power Systems ,2013 ,28( 1 ) : 347-356.
- [28] 郑天文,陈来军,陈天一,等. 虚拟同步发电机技术及展望[J]. 电力系统自动化, 2015 ,39( 21 ) : 165-175.
- ZHENG Tianwen ,CHEN Laijun ,CHEN Tianyi ,et al. Review and prospect of virtual synchronous generator technologies [J]. Automation of Electric Power Systems ,2015 ,39( 21 ) : 165-175.
- [29] ZHANG L ,HARNEFORS L ,NEE H P. Interconnection of two very weak AC systems by VSC-HVDC links using power-synchronization control [J]. IEEE Transactions on Power Systems ,2011 ,26( 1 ) : 344-355.
- [30] GUAN M ,PAN W ,ZHANG J ,et al. Synchronous generator emulation control strategy for Voltage Source Converter ( VSC ) stations [J]. IEEE Transactions on Power Systems ,2015 ,30( 6 ) : 3093-3101.
- [31] ZHU J ,BOOTH C D ,ADAM G P ,et al. Inertia emulation control strategy for VSC-HVDC transmission systems [J]. IEEE Transactions on Power Systems ,2013 ,28( 2 ) : 1277-1287.
- [32] CHAUDHURI N R ,MAIUMDER R ,CHAUDHURI B. System frequency support through Multi-Terminal DC ( MTDC ) grids [J]. IEEE Transactions on Power Systems ,2013 ,28( 1 ) : 347-356.
- [33] 范心明,管霖,何健明. 多电平柔性直流输电定有功功率与频率辅助控制[J]. 电网技术, 2012 ,36( 9 ) : 182-186.
- FAN Xinming ,GUAN Lin ,HE Jianming. Constant active power and frequency auxiliary control for multilevel VSC-HVDC power transmission [J]. Power System Technology ,2012 ,36( 9 ) : 182-186.
- [34] JUNYENT-FERR A ,PIPELZADEH Y ,GREEN T C. Blending HVDC-link energy storage and offshore wind turbine inertia for fast frequency response [J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy , 2015 ,6( 3 ) : 1059-1066.
- [35] ADEUYI O D ,CHEAH-MANE M ,LIANG J ,et al. Frequency support from modular multilevel converter based multi-terminal HVDC schemes [C]//IEEE Power and Energy Society General Meeting. Denver ,CO ,USA: IEEE ,2015: 1-5.
- [36] GUAN M ,CHENG J ,WANG C ,et al. The frequency regulation scheme of interconnected grids with VSC-HVDC links [J]. IEEE Transactions on Power Systems ,2017 ,32( 2 ) : 864-872.

#### 作者简介:



朱良合

朱良合(1984—),男,湖北十堰人,工程师,硕士,主要研究方向为发电机励磁控制技术和柔性直流输电技术(E-mail: 394467920@qq.com);

袁志昌(1980—),男,江西吉安人,副研究员,博士,主要研究方向为电力系统分析、柔性交流输电系统、柔性直流输电系统(E-mail: yuancz@tsinghua.edu.cn);

盛超(1972—),男,安徽桐城人,高级工程师,硕士,主要研究方向为发电机励磁控制技术、柔性直流输电技术、电力电子在电力系统中的应用等(E-mail: 13602755152@139.com)。



## Review of frequency support control methods for asynchronous interconnection system based on VSC-HVDC

ZHU Lianghe<sup>1</sup>, YUAN Zhichang<sup>2</sup>, SHENG Chao<sup>1</sup>, LUO Pandian<sup>1</sup>, YANG Fenyan<sup>1</sup>, LIU Zhengfu<sup>1</sup>, GUO Jingmei<sup>1</sup>

(1. Electric Power Research Institute of Guangdong Power Grid Co., Ltd., Guangzhou 510075, China;

2. Department of Electrical Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

**Abstract:** The fast power control ability of VSC-HVDC (Voltage Source Converter based High Voltage Direct Current) can realize the frequency support among asynchronous AC systems, which makes full use of the regulation capacity of the whole system reserve capacity and improves the safety and stability of the interconnection system. The research status of this field at home and abroad is summarized. The basic principles of different methods, such as the master-slave control based on communication, the master-slave control based on frequency fluctuation delivery by voltage, the droop control with additional frequency regulation, the control based on the characteristics of virtual synchronous generator etc., are introduced in detail. The control features and performances of different methods are analyzed and compared by a unified simulation model, and their advantages, disadvantages and the further research directions are summarized from the engineering application point of view.

**Key words:** VSC-HVDC; asynchronous interconnection system; frequency support control; master-slave control; droop control; virtual synchronous generator

(上接第 83 页 continued from page 83)

## Multi-scenarios based operation mode and investment decision of source-storage-load system in business park

XUE Jinhua<sup>1,2</sup>, YE Jilei<sup>1,2,3</sup>, TAO Qiong<sup>1,2</sup>, WANG Deshun<sup>1,2</sup>

(1. China Electric Power Research Institute, Nanjing 210003, China; 2. Jiangsu Engineering Technology Research Center for Energy Storage Conversion and Application, China Electric Power Research Institute, Nanjing 210003, China;

3. State Key Laboratory of Operation and Control of Renewable Energy & Storage Systems, China Electric Power Research Institute, Beijing 100192, China)

**Abstract:** The development of intelligent business park containing source-storage-load system is one of the important directions for China's energy internet construction. So, the operation mode and investment decision of source-storage-load system in the business park are studied. The authority-responsibility relationships among different stakeholders are analyzed from two aspects of investment and operation, and the commercial operation mode of the source-storage-load system is proposed. Then, based on the life cycle theory of distributed energy, the revenue models of energy investors and park developers are established under three application scenarios of source-load, storage-load and source-energy-load respectively. Considering the electricity price policy of the business park, recommendations are put forward for distributed photovoltaic and energy storage investors to improve the return of investment based on the sensitivity analysis. Simulative results show that the distributed photovoltaic investors have a higher return on investment, while the realization of break-even of the energy storage investors depends on the cost reduction of energy storage, and the cost drop requirement is very strict in the source-energy-load application scenario.

**Key words:** multi-scenarios; source-storage-load system; business park; operation mode; investment decision; life cycle