

# 柔性直流变压器有载分接开关控制策略

张 勇<sup>1</sup>, 季兰兰<sup>2</sup>, 袁艺嘉<sup>2</sup>, 王民警<sup>1</sup>, 黄 玮<sup>1</sup>

(1. 深圳中广核工程设计有限公司, 广东 深圳 518100 2. 国网智能电网研究院有限公司先进输电技术全国重点实验室, 北京 102200)

**摘 要:** 目前, 针对柔性直流输电系统在交流电网电压波动时的稳定运行问题, 一般采用通过调节有载分接开关保证变压器阀侧空载电压的恒定, 但这种方法没有充分发挥有载分接开关的作用, 导致正常运行时换流器损耗偏高。为此, 提出一种有效降低换流器损耗的新型有载分接开关调节策略。首先, 考虑柔性直流输电系统的运行特性, 分析所提有载分接开关调节策略的原理, 即以最大调制比限制和阀侧最高持续运行电压限制两方面综合确定变压器阀侧空载电压的上限值, 再根据网侧电压的实际情况计算分接开关档位。其次, 针对具体算例, 分析不同交流电压下系统无功功率的要求, 根据所提策略计算得到各种实际工况的分接开关档位需求, 并且计算对比新型调节策略与传统策略在多种系统传输功率下的换流器损耗, 数据显示新型调节策略可有效降低换流器损耗。最后, 搭建典型海上风电柔性直流输电系统的 PSCAD 仿真模型, 针对交流电压波动和变压器运行台数变化 2 种关键工况验证所提新型分接开关调节策略的稳定性和有效性。

**关 键 词:** 分接开关; 调节策略; 空载电压; 损耗

DOI: 10.19781/j.issn.1673-9140.2023.04.004 中图分类号: TM723 文章编号: 1673-9140(2023)04-0035-11

## On-load tap changer control strategy for VSC-HVDC transformer

ZHANG Yong<sup>1</sup>, JI Lanlan<sup>2</sup>, YUAN Yijia<sup>2</sup>, WANG Minjing<sup>1</sup>, HUANG Wei<sup>1</sup>

(1. China Nuclear Power Engineering Corporation, Shenzhen 518100, China; 2. State Key Laboratory of Advanced Power Transmission Technology, State Grid Smart Grid Research Institute Co., Ltd., Beijing 102200, China)

**Abstract:** At present, in view of the stable operation of the VSC-HVDC transmission system under grid voltage fluctuation, the on-load tap-changer(OLTP) is generally adjusted to ensure the constant no-load voltage on the valve side of the transformer. But the method does not take full use of the OLTP, leading to a relatively higher converter loss during normal operation. In this paper, a novel OLTP regulation strategy to effectively reduce converter losses is proposed. Firstly, the principle of the proposed OLTP regulation strategy is analyzed based on the operation characteristics of the VSC-HVDC system. The maximum modulation ratio limit and the maximum continuous operating voltage limit of transformer valve side are used to comprehensively determine the upper limit of no-load transformer valve side voltage, and then the OLTP position is calculated according to the actual grid side voltage. Secondly, for a specific example, the reactive power requirements under different AC voltages are analyzed, and then the OLTP requirements under different working conditions are calculated according to the proposed strategy. The converter losses of the novel regulation strategy and the traditional strategy under various transmission powers are calculated and compared, and the losses data show that novel regulation strategy could effectively reduce converter losses. Finally, a PSCAD simulation model of a typical offshore

收稿日期: 2022-06-24; 修回日期: 2022-08-29

基金项目: 深圳中广核工程设计有限公司科技项目(K-A2021.001)

通信作者: 季兰兰(1984—), 女, 硕士, 高级工程师, 主要从事柔性直流输电技术拓扑和主参数设计研究; E-mail: 867806287@qq.com

wind power VSC-HVDC transmission system is established, and the stability and effectiveness of the proposed novel OLTP regulation strategy are verified under two key conditions of AC voltage fluctuation and change in the number of operating transformers.

**Key words:** on-load tap changer; adjustment strategy; no-load voltage; losses

近年来,柔性直流输电技术以其潮流控制灵活、不易发生换相失败以及谐波少等优势,已广泛应用于新能源并网、孤岛供电以及交流电网互联等场景<sup>[1-4]</sup>。欧洲已有多个海上风电柔性直流工程投入运行,以德国为例,在风电场较为集中的德国北海区域,已投运柔直工程9个,在建工程4个,共计13个<sup>[5-6]</sup>。中国第1个海上风电柔性直流送出工程即东海上风电柔性直流输电示范项目已于2021年年底竣工<sup>[7]</sup>。随着越来越多海上风电柔性直流输电工程的落地,针对该场景的系统研究也具有显著的实际应用价值<sup>[8-10]</sup>。

柔性直流输电换流站中一般会在变压器的网侧安装有载分接开关,当交流电网电压波动时,通过调节分接开关来补偿网侧电压波动对变压器阀侧空载电压的影响,即调节原则为保持变压器阀侧空载电压恒定<sup>[11]</sup>。现有文献中关于柔性直流有载分接开关动作策略的分析几乎没有,只有较少文献针对常规直流换流变压器有载分接开关的策略和控制进行过分析和介绍。常规直流的分接开关调节方法有2种:①与现有柔性直流变压器的调节原则相同,即保持变压器阀侧空载电压恒定;②保持触发角或关断角在指定的范围内以提高换流器的运行功率因数<sup>[12-14]</sup>。文献[15-18]针对常规直流工程出现的分接开关动作频繁的问题进行了原理分析并提出了解决措施;文献[19]针对常规直流背靠背情况下逆变侧变压器分接开关提出了一种新的控制方式;文献[20-21]从换流变压器有载分接开关利用率、换流器损耗以及无功功率消耗等方面对比了常规直流的这2种控制模式。

柔性直流与常规直流的运行原理不同,不存在提高运行功率因数的问题,因此,常规直流的第2种调节方法不适用于柔性直流。但是柔性直流输电系统在运行中,交直流电压波动和无功功率要求的不同均会对变压器阀侧空载电压的上限值产生影响,特别是对于海上风电送出工程,在变压器阀侧

空载电压额定值选取时,以最严苛的工况即1台变压器运行来计算,而正常运行时大部分时间是2台投入运行。为了保证在任何工况下,柔性直流系统均能满足有功和无功功率的要求,需要将变压器阀侧空载额定电压确定为所有工况下的最小值,也就是说各种运行条件都是最严苛的,是一个极端工况。这种做法的缺点是在其他非极端工况时,变压器的阀侧空载电压偏低,桥臂电流比实际需求更大,从而换流站具有更大的损耗。

针对上述问题,本文提出一种能降低换流器损耗的有载分接开关优化调节策略。首先分析所提新型策略降低换流器损耗的原理;然后针对具体算例进行传统和新型策略分接开关的档位计算,并对直流系统传输功率以10%步长从0~100%变化时2种策略的损耗数据进行对比验证,数据显示新型策略可有效降低换流器损耗;最后建立海上风电柔性直流送出的PSCAD模型,验证新型策略,根据不同的运行工况设置有载分接开关的档位,可最大化提高阀侧空载电压,从而尽量减小换流器电流进而减小损耗。

## 1 原理分析

### 1.1 换流器最大调制比限制

如图1所示,假设换流器向交流系统输入的有功和无功功率分别为 $P$ 和 $Q$ ,换流器交流侧电压为 $\dot{U}_c$ ,等值交流系统电压为 $\dot{U}_s$ ,变压器阀侧电压为 $\dot{U}_v$ , $\dot{U}_s$ 和 $\dot{U}_c$ 的相角差为 $\delta$ ,变压器和桥臂电抗器的总等效换流电抗为 $X=X_T+X_L$ ,其中 $X_T$ 为变压器漏抗, $X_L$ 为等效桥臂电抗。换流器向交流系统传输的功率<sup>[22]</sup>为

$$\begin{cases} P = \frac{U_v U_c}{X} \sin \delta \\ Q = \frac{U_v (U_c \cos \delta - U_v)}{X} \end{cases} \quad (1)$$

根据式(1)得到:

$$P^2 + \left( Q + \frac{U_v^2}{X} \right)^2 = \left( \frac{U_v U_c}{X} \right)^2 \quad (2)$$

换流器交流输出电压为

$$U_c = M \cdot U_{cmax} = M \cdot \frac{\sqrt{3} U_{dc}}{2\sqrt{2}} \quad (3)$$

式中,  $M$  为调制比, 不采用三次谐波调制时其最大值为1, 反之其最大值为1.154<sup>[23]</sup>;  $U_{dc}$  为直流电压。

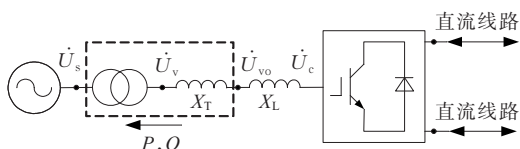


图1 柔性直流输电系统

Figure 1 Diagram of VSC-HVDC transmission system

对于一个已经完成主参数设计的柔性直流输电系统, 当需要满足有功功率要求  $P_i$  和无功功率要求  $Q_i$  时, 可以根据式(2)计算出一个变压器阀侧空载电压  $U_v$  的上限值  $U_{vmaxi}$ ,  $i=1, 2, \dots, n$ , 表示功率运行区间上的某个运行点,  $n$  为运行区间上所有运行点的数量。在柔性直流变压器有载分接开关传统调节策略中, 计算所有  $P_i$  和  $Q_i$  以及交直流电压等条件对应的阀侧空载电压上限值, 并取所有上限值中的最小值  $U_{vmax}$  作为变压器阀侧额定空载电压, 保证换流器能够在运行区间上所有的功率点运行。有载开关的作用在于补偿交流电网本身的电压波动所引起的阀侧电压变化, 保证交流电压在一定范围内波动时, 变压器阀侧空载电压始终小于  $U_{vmax}$ 。一般交流电网电压变化较小, 所要求的分接头范围也较小。这种调节方式的分接开关动作不太频繁, 有利于延长有载分接开关的使用寿命。

新型调节策略保持调制比最大化运行, 交流电网电压变化对应不同功率要求引起的等效换流电抗电压差变化均由分接头调节补偿。根据式(2)计算得出某个功率运行点 ( $P_i, Q_i$ ) 对应的变压器阀侧空载电压上限值  $U_{vmaxi}$  后, 以变压器阀侧电压尽量接近但不超过  $U_{vmaxi}$  为调节目标, 结合电网电压实时值  $U_s$  求解变压器有载分接开关的档位。这种方式使得换流器运行在相对较高的阀侧电压下, 运行经济、换流阀的电流应力较小以及直流系统的运行性能较好。这种调节方式的分接头动作较频繁, 同时

要求的分接头调节范围较大。

对于柔性直流输电工程, 虽然可以采用传统策略进行分接开关控制, 用增大调制比运行范围的方法去适应负荷的变化, 但是当负荷水平较低或者无功要求较小时, 换流器运行在较低的交流电压下, 换流器损耗较大。

## 1.2 变压器阀侧设备最高持续运行电压限制

柔性直流输电工程中所选用的交流设备除变压器和电抗器会根据具体工程的容量和电压进行定制外, 其他设备如开关、GIS及电压电流互感器等均根据工程需求选取成熟的标准参数的产品。特别是海上风电工程中变压器阀侧的GIS设备, 因为内部集成设备数量多, 选用不同电压等级在成本上会相差较大。以  $\pm 320$  kV 对称单极柔直工程为例, 变压器阀侧设备选取 400 kV 还是 500 kV 对设备成本是有一定影响的。这就对变压器有载分接开关的调节提出了限制, 要求变压器阀侧空载电压在小于上限值  $U_{vmaxi}$  的同时保证变压器的阀侧运行电压不超过阀侧设备的最高持续运行电压。

根据图1, 换流器传输功率与变压器阀侧空载电压、阀侧运行电压的关系为

$$\begin{cases} P = \frac{U_v U_{vo}}{X_T} \sin \delta_T \\ Q = \frac{U_v (U_{vo} \cos \delta_T - U_v)}{X_T} \end{cases} \quad (4)$$

由式(4)得到:

$$P^2 + \left( Q + \frac{U_v^2}{X_T} \right)^2 = \left( \frac{U_v U_{vo}}{X_T} \right)^2 \quad (5)$$

式(4)、(5)中,  $U_{vo}$  为变压器阀侧运行电压, 即上文所述受变压器阀侧设备最高持续运行电压限制的值;  $\delta_T$  为变压器阀侧空载电压与阀侧运行电压的相角差。由式(4)可求解出变压器阀侧空载电压  $U_v$  的最大值  $U_{vmaxi2}$ 。

## 1.3 有载分接分接开关档位计算

由文1.1、1.2中得出2个变压器阀侧空载电压最大值  $U_{vmaxi1}$ 、 $U_{vmaxi2}$  后, 取两者的较小值得到变压器阀侧空载电压的调目标值:

$$U_{vmaxi} = \min(U_{vmaxi1}, U_{vmaxi2}) \quad (6)$$

然后结合电网电压实时值  $U_s$  的情况, 确定当前有载分接开关的位置进行实时调节。假设当前变压器

网侧电压为  $U_s$ , 则分接开关的位置  $T_{cpi}$  可根据下式计算<sup>[24]</sup>:

$$\frac{U_s}{U_{vmaxi}} = N \cdot (1 + \eta \cdot T_{cpi}) \quad (7)$$

式中,  $N$  为变压器额定变比;  $\eta$  为有载分接开关档位级差;  $T_{cpi}$  为有载分接开关在  $(P_i, Q_i)$  运行状态下的档位。

### 1.4 有载分接分接开关动作策略流程

按照上述分析, 新型调节策略变压器有载分接开关的动作流程如图2所示。若变压器有载分接开关工作正常, 按照上文所述新型调节策略进行分接开关位置计算和调节。若分接开关故障, 则分为2种情况: ①若分接开关可以手动调节, 则手动将分接开关调节到0档位置, 保证运行区间上所有功率运行点都能满足; ②若分接开关无法手动调节, 则系统的运行功率受限, 系统提供无功功率的能力由分接开关当前档位和最大调制比决定。

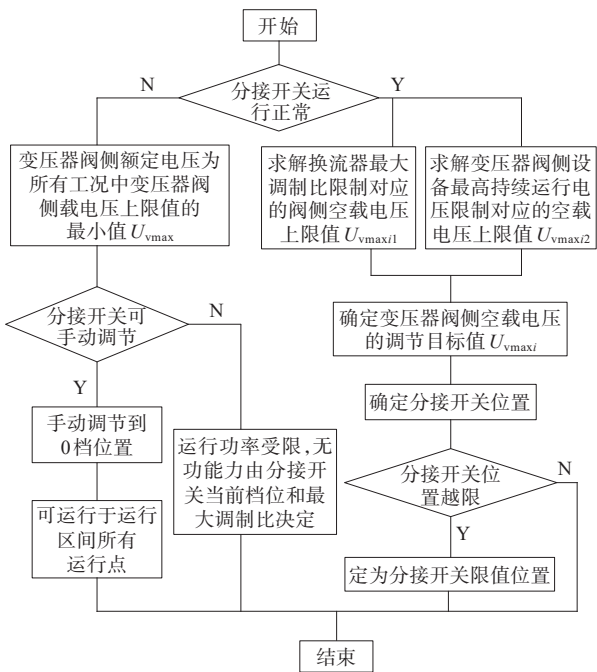


图2 有载分接开关动作策略流程

Figure 2 Flowchart of OLTP action strategy

## 2 计算模型及假设

### 2.1 主要参数

以某±320 kV/1 000 MW 海上风电送出工程

为例进行计算, 系统一次主要设备参数如表1所示。需要注意的是, 本文所选取的系统参数仅辅助用于岸上换流站变压器有载分接开关的调节策略分析, 相关结论也同样适用于额定直流电压如±400 kV、±525 kV 等对称单极和对称双极柔性直流输电并网工程。

表1 系统一次主要设备参数

Table 1 Main parameters of primary devices of the system

换流站	系统参数			
	额定容量/(MW/MV·A)		直流电压运行范围/kV	
海上	1 000/1 032		±310~±330	
陆上	987/1 045		±310~±330	
换流站	联结变压器(三相变压器)			
	额定电压/(kV/kV)	额定容量/(MV·A)	过负荷能力/(MV·A)	漏抗/p.u.
海上	230/360	700×2	—	0.16
陆上	500/345	700×2	1 045	0.16
换流站	换流阀			桥臂电抗/mH
	子模块额定电压/kV	子模块电容/μF	子模块数量	
海上	2.4	8 500	288×6	50
陆上	2.4	8 500	288×6	50

### 2.2 无功功率要求

因一般海上风电柔直送出工程只在岸上换流站变压器安装有载分接开关, 故本文只针对岸上换流站变压器有载分接开关的调节进行分析。典型的岸上换流站无功功率要求  $U-Q$  关系如图3所示。由于交流系统电压越高, 对换流器的无功支撑能力要求越低, 因此, 当交流电压  $U_4 \sim U_5$  在 1.05~1.10 p.u. 变化时, 容性无功功率要求是线性降低的; 同理, 交流系统电压越低, 对换流器感性无功支撑能力要求越低, 因此, 交流电压  $U_2 \sim U_3$  在 0.875~0.950 p.u. 变化时, 感性无功要求线性降低<sup>[25]</sup>。

根据图3的无功功率要求, 设计岸上换流站在不同变压器组合状态下的运行区间( $P-Q$ 关系图), 海上站双台变压器运行时岸上站的2种变压器组合方式对应的运行区间如图4所示。当海上变压器单台运行时, 岸上换流站的运行区间与图4中0~646 MW 的部分相同, 因此不再单独讨论分析。

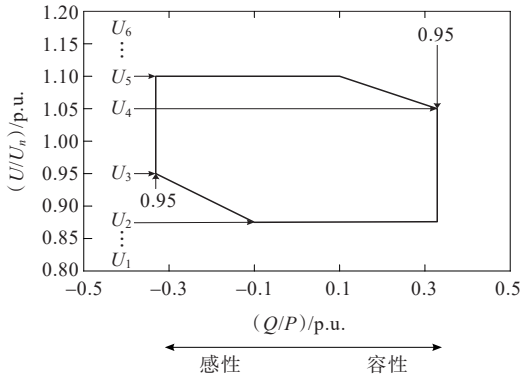
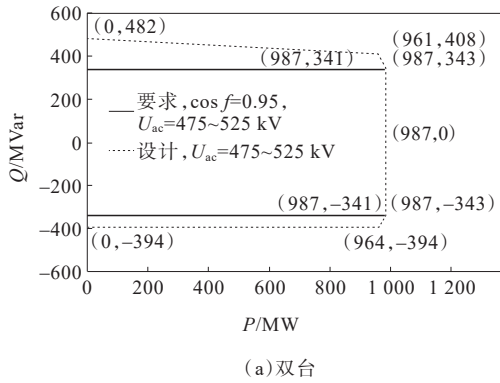
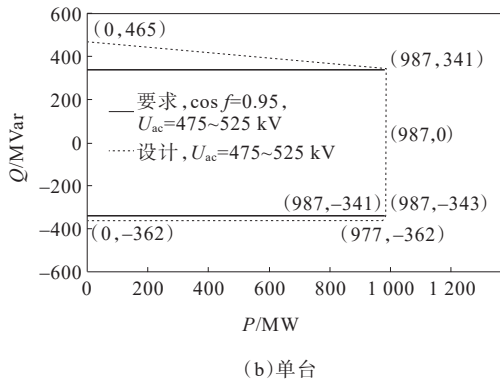


图 3 典型无功功率要求随交流电网电压变化

Figure 3 Typical reactive power requirements changed vary with AC grid voltage



(a) 双台



(b) 单台

图 4 岸上换流站不同变压器组合时的运行区间

Figure 4 The operation range of different transformer combinations in onshore station

由于调节变压器分接开关档位速度缓慢,变压器有载开关调节策略的设计只需满足图 5 中最大容性无功即可,边界线内的其他无功功率要求点可以通过调制比的调节实现。结合图 3 的无功功率要求和图 4、5 的运行能力设计结果,绘制不同传输有功功率和不同交流电压下的容性无功能力  $PQ-U$  关系,如图 6 所示,其中最上面的折线为交流电压  $U_2 \sim U_4$  (0.875~1.05 p.u.) 对应的容性无功能力,容

性无功能力随着交流电压的升高线性下降,直到  $U_5$  交流电压对应的最下面的折线。

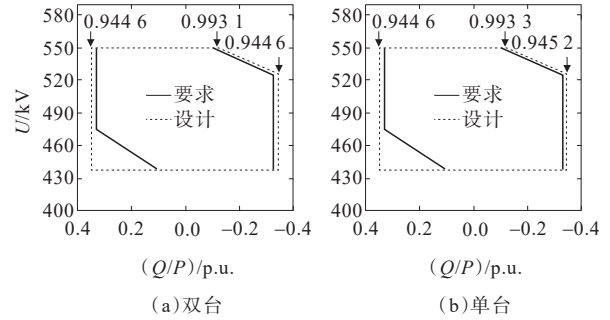


图 5 岸上换流站运行能力

Figure 5 Operation capacity of onshore station

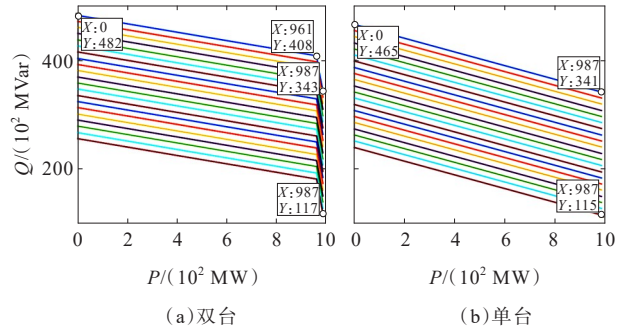


图 6 不同交流电压下最大容性无功功率能力

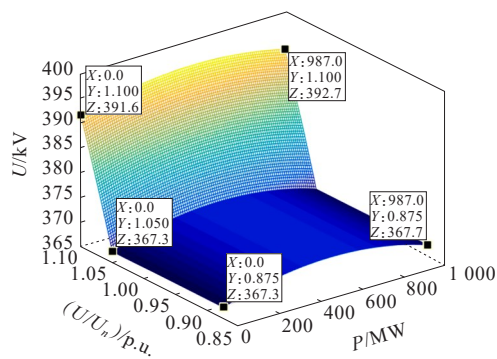
Figure 6 Maximum capacitive reactive power capability at different AC voltages

### 3 分接开关档位计算

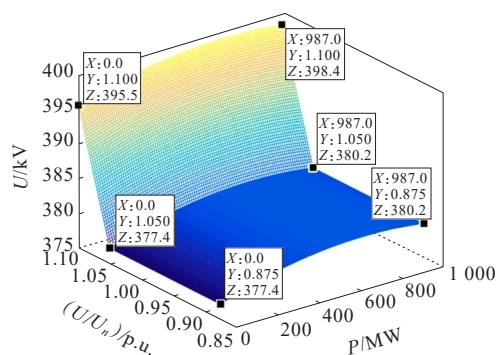
根据文 2 中所述计算模型和计算方法,对岸上换流站不同运行条件下的变压器有载分接开关档位需求进行计算分析。

#### 3.1 岸上 1 台变压器运行

岸上只有 1 台变压器运行时等效换流电抗较大,换流器设计的无功能力相对较小,由变压器阀侧设备最大运行电压、直流运行电压确定的变压器阀侧空载电压上限和分接开关范围如图 7、8 所示。由于直流线路全线电压范围为  $\pm 310 \sim \pm 330$  kV,当直流系统运行于低电压时,岸上站直流端口电压固定为  $\pm 310$  kV,海上站直流端口电压随着传输功率的升高而升高,略高于  $\pm 310$  kV。随着传输有功功率的提高,无功功率要求线性下降(图 4),因此,所需的换流器阀侧空载电压略有提高。



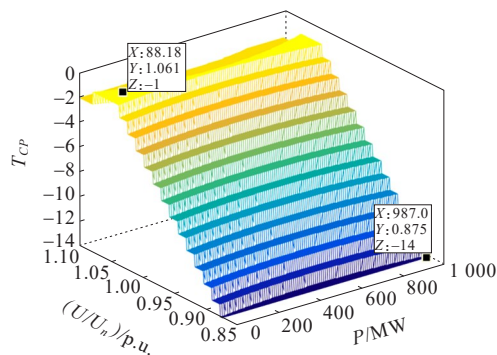
(a) 逆变侧直流电压 310 kV



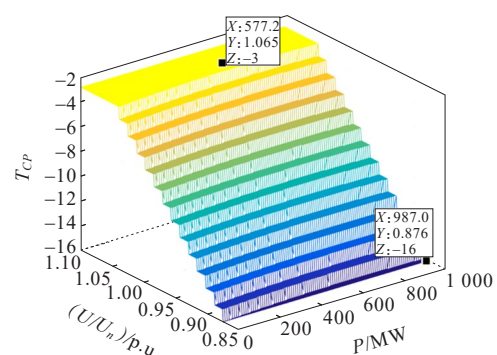
(b) 整流侧直流电压 330 kV

图7 岸上1台变压器运行的变压器阀侧空载电压上限

Figure 7 Upper limit of transformer valve side no-load voltage under 1 onshore transformer operation



(a) 逆变侧直流电压 310 kV



(b) 整流侧直流电压 330 kV

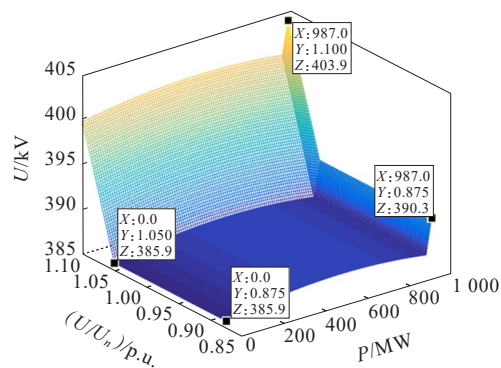
图8 岸上1台变压器运行时分接开关档位需求

Figure 8 OLTP 1 requirements under 1 onshore transformer operation

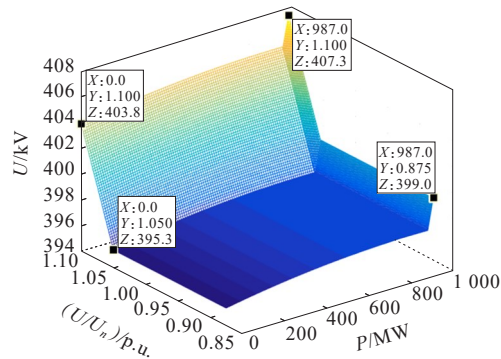
当直流系统运行于高电压时,海上站直流端口电压固定为 $\pm 330$  kV,岸上站直流端口电压随着传输功率的提高略有降低,但是由于此时直流电压较高,阀侧空载电压上限值是由阀侧设备持续运行电压 $U_{vo}$ 限制的,随着要求无功功率的降低,所需的变压器阀侧电压上限值变大。比较2种直流电压情况,低直流电压时阀侧空载电压随有功功率的变化弧度更大,这是因为此时阀侧空载电压上限值由式(2)确定,而式(2)中的等效电抗为 $X=X_T+X_L$ ,对应的功率圆半径 $U_v U_c/X$ 小于高直流电压时式(5)中的 $U_v U_{vo}/X_T$ 。

### 3.2 岸上2台变压器运行

岸上2台变压器运行时等效换流电抗较单台运行更小,其他条件相同时变压器阀侧空载电压上限值更大。由变压器阀侧设备最大运行电压、直流运行电压确定的变压器阀侧空载电压上限和分接开关范围如图9、10所示。



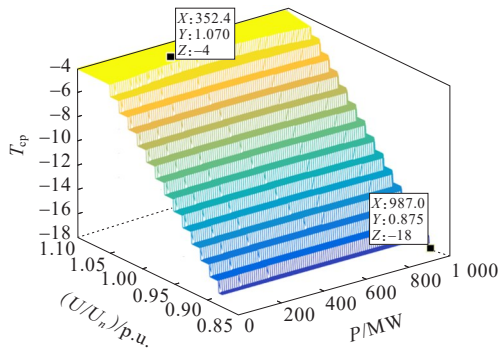
(a) 逆变侧直流电压 310 kV



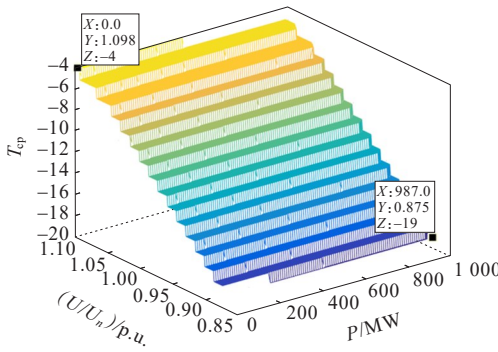
(b) 整流侧直流电压 330 kV

图9 岸上2台变压器运行的变压器阀侧空载电压上限

Figure 9 Upper limit of transformer valve side no-load voltage under 2 onshore transformers operation



(a) 逆变侧直流电压 310 kV



(b) 整流侧直流电压 330 kV

图 10 岸上 2 台变压器运行时分接开关档位需求  
Figure 10 OLTP 1 requirements under 2 onshore transformers operation

图 9、10 的特性与图 7、8 类似,但是,由于双台变压器运行时等效换流电抗更低,因此阀侧空载电压随有功变化的弧度更加平缓。

### 3.3 分接开关调节需求

综合文 3.1、3.2,有载分接开关的调节范围要求如表 2 所示。

表 2 有载分接开关调节范围  
Table 2 Adjustment range of OLTP

变压器台数	有载分接开关调节范围	
	逆变 310 kV	整流 330 kV
1	-1~-14	-3~-16
2	-4~-18	-4~-19
需求汇总	-1~-19	

由表 2 可见,变压器的有载分接开关偏负分接,分析原因,变压器的阀侧额定空载电压 345 kV 的计算条件是最严重的工况,在其他工况下,所需要的变压器阀侧空载电压上限值均比 345 kV 更高,因此需要的分接开关位置均在负分接。若为了将变压器分

接开关的调节范围设计为正、负分接对称,需要提高变压器阀侧额定空载电压设计值,但是此种设计的缺点在于当分接开关因故障无法运行时,不能保证换流器在任何工况下都满足运行区间所有功率点的运行要求。为了保证在分接开关故障退出运行时,换流器能运行到运行区间的所有功率要求点,分接开关正常运行时不仅满足所有功率点运行要求而且可以提高换流器运行性能、降低系统损耗,需求的变压器有载分接开关范围必然是全部偏向负分接的。

## 4 性能验证

### 4.1 传统策略与新型策略对比

#### 4.1.1 调节特性对比

针对上述计算模型和所提出的分接开关新型调节策略,在电磁暂态仿真软件 PSCAD/EMTDC 中搭建包含新型调节策略的海上风电柔性直流仿真模型。

根据文 3 分析,交流系统电压和变压器台数对分接开关档位变化影响较大,因此,设置 4 种运行状态对分接开关传统和新型策略的特性差异进行对比,如表 3 所示。

表 3 2 种策略分接开关位置和阀侧空载电压对比

Table 3 Comparison of OLTP position and valve side no-load voltage between two strategies

运行状态	变压器台数	电网电压/kV	无功功率/MVar	分接头位置		变压器阀侧电压/kV	
				传统策略	新型策略	传统策略	新型策略
①	2	500	343	0	-10	345.00	394.28
②	1	500	341	0	-7	345.00	378.08
③	2	550	117	+4	-5	361.42	404.80
④	1	550	115	+4	-3	361.42	394.28

由表 3 可知,在同样运行条件下(变压器台数、交流电网电压等),新型策略变压器阀侧空载电压更高,从而换流器电流更小。分析原因,分接开关传统调节策略仅在电网电压波动时调节分接头位置,当电网电压波动超过±5%额定电压时,调节分接开关使得阀侧空载电压恢复到±5%额定电压以内,保证变压器阀侧电压稳定。而本文提出的分接

开关新型调节策略可在不同系统运行点下适应性地调节变压器分接头位置,综合了无功要求、电网电压等因素,保证了阀侧空载电压的最大化运行,优化了换流器的运行性能。

#### 4.1.2 换流器损耗对比

评估柔性直流输电系统的损耗,一般设定系统运行在正常稳定工况下。基于MMC的柔性直流输电系统,由于交流电压和电流中的谐波含量通常很小,谐波对功率损耗的影响通常可以忽略不计,因此,在损耗计算中不考虑谐波的影响。由于变压器、电抗器等设备损耗与一次设备厂家的设计相关,此处不予分析,只对比2种分接开关调

节策略在不同功率传输水平下的换流器损耗参考值,如表4所示,表中数据为2台变压器运行的情况,且仅计算了换流阀的水冷散热损耗,没有计入阀厅内的空调散热损耗。由表4可见,由于双台变压器运行时等效换流阻抗比单台运行时更小,同样传输功率下需要的阀侧空载电压更高,通过采用新型有载分接开关调节策略使换流器运行于更高的电压,降低了换流器电流,从而有效减小了换流器的水冷散热损耗。中国海上风电工程设计寿命为25 a,发电量一般按照3 000 h/a左右计算,电价按照0.45元/(kW·h)计算,1 000 MW工程可节约运行投资约2 700万元。

表4 2种分接开关调节策略损耗对比

Table 4 Comparison of losses between two OLTP regulation strategies

功率水平/ MW	变压器网侧 电压/kV	传统策略			新型策略			损耗差值/ MW
		分接头 位置	变压器阀侧 电压/kV	损耗/ MW	分接头 位置	变压器阀侧 电压/kV	损耗/ MW	
100	500	0	345	1.35	-10	394.28	1.24	0.11
200	500	0	345	1.59	-10	394.28	1.44	0.15
300	500	0	345	1.87	-10	394.28	1.63	0.24
400	500	0	345	2.28	-10	394.28	2.01	0.27
500	500	0	345	2.68	-10	394.28	2.34	0.34
600	500	0	345	3.13	-10	394.28	2.69	0.44
700	500	0	345	3.73	-10	394.28	3.24	0.49
800	500	0	345	4.3	-10	394.28	3.74	0.56
900	500	0	345	4.87	-10	394.28	4.23	0.64
1 000	500	0	345	5.58	-10	394.28	4.77	0.81

## 4.2 新型策略动态响应特性仿真验证

为了验证分接开关新型调节策略的动态响应特性,设置2种典型工况进行仿真验证,即工况1:表3的运行状态③变化到运行状态①;工况2:表3的运行状态②切换到运行状态①。

### 4.2.1 工况1仿真验证

工况1对应的变压器有载分接开关计算值如表5所示,仿真记录了变压器阀侧电压有效值和瞬时值、变压器阀侧电流和桥臂电流变化情况。工况1对应的仿真波形如图11所示(三相变化规律一致)。由表5中计算结果可知,当交流系统电压从550 kV变化到500 kV时,由于无功功率增加,需求的变压

器阀侧空载电压上限值降低,但仍然高于分接开关传统调节策略计算出的值,变压器分接头位置由-5档调节到-10档。同时,如图11(a)、(b)所示,随着分接头的调整,变压器阀侧电压有所降低,变压器阀侧电流(图11(c))将增加,换流器桥臂电流(图11(d))增加约6%,与前文分析一致。

表5 仿真验证工况1

Table 5 Simulation verification scenario 1

变压器 台数	变压器网侧 电压/kV	无功功率/ MVar	分接头 位置	变压器阀侧 电压/kV
2	550	117	-5	404.80
2	500	343	-10	394.28



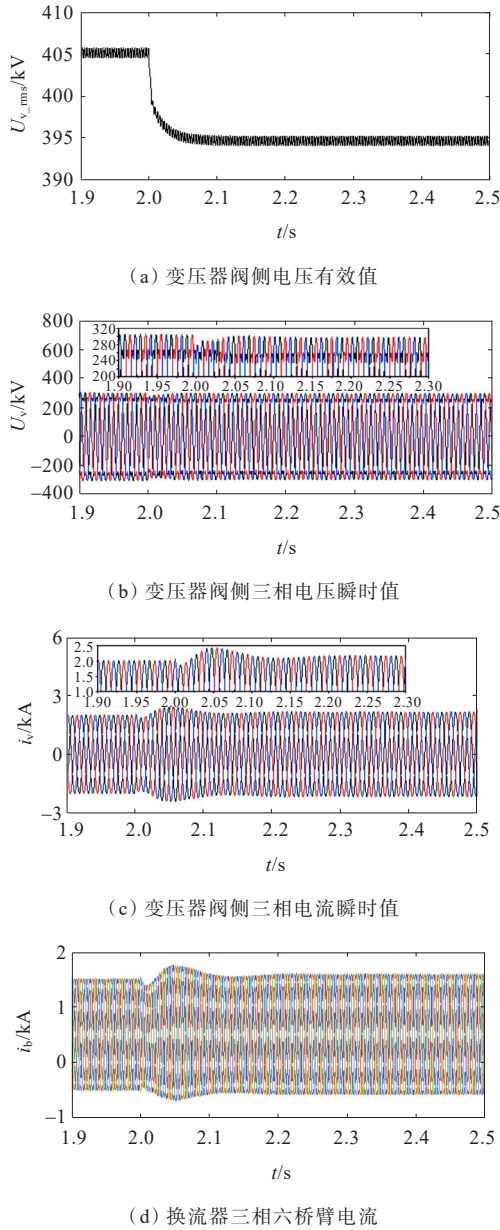


图 11 工况 1 仿真波形

Figure 11 Simulation waveform of scenario 1

4.2.2 工况 2 仿真验证

工况 2 对应的变压器有载分接开关计算值如表 6 所示,仿真记录了变压器阀侧电压有效值和瞬时值、变压器阀侧电流和桥臂电流的变化情况。由表 6 中计算结果可知,当岸上投入的变压器从 1 台运行切换到 2 台运行时,由于系统阻抗的减小,变压器阀侧空载电压的上限值提高,变压器分接头位置由 -7 调整为 -10。工况 2 对应的仿真波形如图 12 所示(三相变化规律一致),当系统运行状态发生变化,分接头能实现自动调整,此时变压器阀侧电压提高(图 12(a)、(b)),阀侧电流(图 12(c))将降低,

桥臂电流(图 12(d))降低约 3%,随之的换流器损耗会相应降低。

表 6 仿真验证工况 2

Table 6 Simulation verification scenario 2

变压器台数	变压器网侧电压/kV	无功功率/MVar	分接头位置	变压器阀侧电压/kV
1	500	341	-7	378.08
2	500	343	-10	394.28

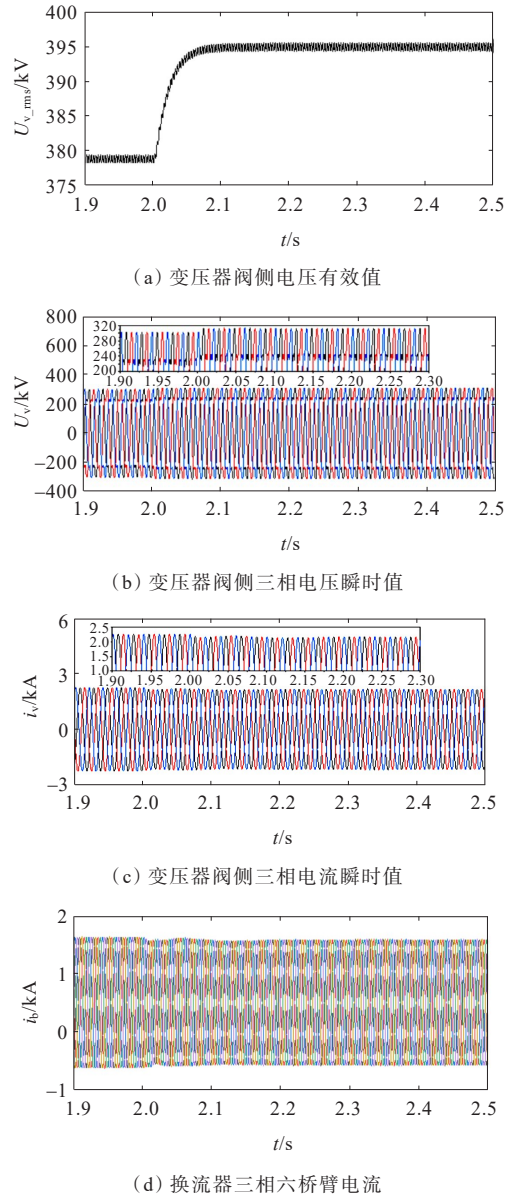


图 12 工况 2 仿真波形

Figure 12 Simulation waveform of scenario 2

5 结语

本文基于海上风电柔性直流并网系统,研究了

计及系统运行状态的变压器有载分接开关调节策略,有望推广应用于相关柔性直流输电工程。

1) 分析了交流系统电压、直流电压、最大调制比以及变压器阀侧最高持续运行电压等因素对变压器阀侧空载电压的影响,提出了有载分接开关新型调节策略;

2) 新型调节策略在保证系统良好运行特性的同时,可有效降低换流器损耗;按照工程运行 25 a 计算,可节约运行投资约 2 700 万元;

3) 基于电磁暂态仿真模型,通过典型工况研究了所提出的分接开关新型调节策略和传统策略的调节特性差异和新型策略的动态响应特性,验证了所提策略的正确性和有效性。

#### 参考文献:

- [1] 辛保安,郭铭群,王绍武,等.适应大规模新能源友好送出的直流输电技术与工程实践[J].电力系统自动化,2021,45(22):1-8.  
XIN Baoan, GUO Mingqun, WANG Shaowu, et al. Friendly HVDC transmission technologies for large-scale renewable energy and their engineering practice[J]. Automation of Electric Power Systems, 2021, 45(22): 1-8.
- [2] 杨万开,王兴国,王书扬.渝鄂柔性直流输电接入电网高频谐振与抑制分析[J].发电技术,2022,43(3):492-500.  
YANG Wankai, WANG Xingguo, WANG Shuyang. Analysis of high frequency resonance and suppression in Yu to E VSC-HVDC project connected to power grid[J]. Power Generation Technology, 2022, 43(3): 492-500.
- [3] 荣飞,毛灿,周保荣,等.基于改进TOPSIS方法的柔性直流输电系统电压等级优选[J].高压电器,2021,57(5):21-28.  
RONG Fei, MAO Can, ZHOU Baorong, et al. Voltage level optimization of flexible HVDC system based on improved TOPSIS method[J]. High Voltage Apparatus, 2021, 57(5): 21-28.
- [4] 张烜一,江修波,郑文迪,等.基于电阻耗能支路的MMC-HVDC线路故障清除与重启恢复策略[J].电力科学与技术学报,2021,36(6):67-76.  
ZHANG Xuanyi, JIANG Xiubo, ZHENG Wendi, et al. MMC-HVDC line fault clearing and restart recovery strategy based on the resistance energy-consuming branch [J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2021, 36(6): 67-76.
- [5] HOU P, ZHU J S, MA K C, et al. A review of offshore wind farm layout optimization and electrical system design methods [J]. Journal of Modern Power Systems and Clean Energy, 2019, 7(5): 975-986.
- [6] 杨光亚.欧洲海上风电工程实践回顾及未来技术展望[J].电力系统自动化,2021,45(21):23-32.  
YANG Guangya. Review on engineering practices and future technology prospects of European offshore wind power[J]. Automation of Electric Power Systems, 2021, 45(21): 23-32.
- [7] 刘卫东,李奇南,王轩,等.大规模海上风电柔性直流输电技术应用现状和展望[J].中国电力,2020,53(7):55-71.  
LIU Weidong, LI Qinan, WANG Xuan, et al. Application and prospect of VSC-HVDC based large-scale offshore wind power technology[J]. Electric Power, 2020, 53(7): 55-71.
- [8] 李钢,田杰,王仙荣,等.远海风电送出技术应用现状及发展趋势[J].供用电,2022,39(11):2-10.  
LI Gang, TIAN Jie, WANG Xianrong, et al. Application status and development trend of offshore wind power transmission technology[J]. Distribution & Utilization, 2022, 39(11): 2-10.
- [9] 郑小革,王春风,王境彪,等.含直驱风电场的交直流混合系统非强阻尼低频振荡特性分析[J].电力科学与技术学报,2020,35(3):148-154.  
ZHENG Xiaoge, WANG Chunfeng, WANG Jingbiao, et al. Analysis of the weak or negative damp lower-frequency oscillation characteristics in AC/DC system integrated by PSMG-based wind farms[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2020, 35(3): 148-154.
- [10] 高小童,秦志龙,高新宇.含海上风电—光伏—储能的多能源发输电系统可靠性评估[J].发电技术,2022,43(4):626-635.  
GAO Xiaotong, QIN Zhilong, GAO Xinyu. Reliability evaluation of multi-energy generation and transmission system with offshore wind power-photovoltaic-energy storage[J]. Power Generation Technology, 2022, 43(4): 626-635.
- [11] 徐政,屠卿瑞,管敏渊,等.柔性直流输电系统[M].北京:机械工业出版社,2016:67-68.  
XU Zheng, TU Qingrui, GUAN Minyuan, et al. VSC-HVDC transmission system[M]. Beijing: China Machine Press, 2016: 67-68.
- [12] 赵晚君.高压直流输电工程技术[M].北京:中国电力出版社,2004:109.

- ZHAO Wanjun. HVDC transmission engineering technology[M]. Beijing: Chian Electric Power Press, 2004:109.
- [13] 汪洋,李书勇,宋述波,等.真空有载分接开关在云广特高压直流的应用[J].高电压技术,2010,36(1):285-289.  
WANG Yang, LI Shuyong, SONG Shubo, et al. Application of vacuum on-load tap-changer to Yun-Guang UHVDC project[J]. High Voltage Engineering, 2010, 36(1):285-289.
- [14] 宁晗,方苇,付玉婷,等.HVDC换流变压器分接头控制系统建模与仿真[J].内蒙古电力技术,2019,37(3):42-46.  
NING Han, FANG Wei, FU Yuting, et al. Modeling and simulation for converter transformer tap control system of HVDC[J]. Inner Mongolia Electric Power, 2019, 37(3):42-46.
- [15] 朱韬析,欧开健.高压直流线路电压异常波动对分接开关控制的影响[J].电力系统保护与控制,2009,37(22):152-155+159.  
ZHU Taoxi, OU Kaijian. Influence of the abnormal DC voltage fluctuation on transformer tap changer control[J]. Power System Protection and Control, 2009, 37(22):152-155+159.
- [16] 盛建兰,高子杰,刘超,等.改善换流变分接头频繁动作的控制措施研究[J].浙江电力,2020,39(9):14-19.  
SHENG Jianlan, GAO Zijie, LIU Chao, et al. Research on a control measure for frequent adjustment of converter transformer tap[J]. Zhejiang Electric Power, 2020, 39(9):14-19.
- [17] 索之闻,李晖,蒋维勇,等.考虑离散调压设备动作频次的高压直流输电系统控制优化[J].电力系统自动化,2020,44(3):211-219.  
SUO Zhiwen, LI Hui, JIANG Weiyong, et al. Control optimization of HVDC system considering action frequency of discrete voltage regulation equipment[J]. Automation of Electric Power Systems, 2020, 44(3):211-219.
- [18] 周晓风,付艳,崔晨,等.提高分接开关可靠性的直流输电控制策略优化[J].电气技术,2020,21(9):54-58+65.  
ZHOU Xiaofeng, FU Yan, CUI Chen, et al. The optimization of high voltage direct current control strategy to improve on-load tap changer reliability[J]. Electrical Engineering, 2020, 21(9):54-58+65.
- [19] 王明新,冯虎.一种背靠背直流输电系统换流变压器分接开关控制[J].电力系统自动化,2010,34(6):61-64+78.  
WANG Mingxin, GUO Hu. A new tap changer control method for inverter transformer of back-to-back DC transmission system[J]. Automation of Electric Power Systems, 2010, 34(6):61-64+78.
- [20] 李毅.贵广 I 回直流输电系统两种分接开关控制模式比较[J].南方电网技术,2012,6(6):31-33.  
LI Yi. In comparison of the two control modes for tap switch in Guizhou-Guangdong line I HVDC system[J]. Southern Power System Technology, 2012, 6(6):31-33.
- [21] ZHAO Z Y, WANG B. Influence of transformer tap-changer control mode upon HVDC valve power loss[C]// IEEE PES General Meeting | Conference & Exposition, National Harbor, MD, USA, 2014.
- [22] 王姗姗.模块化多电平 VSC-HVDC 系统主电路参数选择的理论和方法[D].北京:中国电力科学研究院,2011.  
WANG Shanshan. The research on the theory and method of main circuit parameter selection in modular multilevel converter based VSC-HVDC system[D]. Beijing: China Electric Power Research Institute, 2011.
- [23] 王庆,丁久东,刘海彬,等.MMC型柔性直流输电系统三次谐波注入调制策略的可行性[J].电力系统自动化,2018,42(17):104-110.  
WANG Qing, DING Jiudong, LIU Haibin, et al. Feasibility of third harmonic injection modulation strategy for MMC-HVDC transmission system[J]. Automation of Electric Power Systems, 2018, 42(17):104-110.
- [24] 郭贤珊,李凤祁,阮思焯,等.高压直流换流变压器有载分接开关控制优化[J].电力建设,2021,42(2):9-19.  
GUO Xianshan, LI Fengqi, RUAN Siye, et al. Optimization on control strategy of tap changer in HVDC converter transformer[J]. Electric Power Construction, 2021, 42(2):9-19.
- [25] 陈珩,陈怡,万秋兰,等.电力系统稳态分析[M].北京:中国电力出版社,1995:92-103.  
CHEN Heng, CHEN Yi, WAN Qiulan, et al. Steady state analysis of power system[M]. Beijing: China Electric Power Press, 1995:92-103.