



(12) 发明专利

(10) 授权公告号 CN 117955148 B

(45) 授权公告日 2024.05.28

(21) 申请号 202410350099.1

CN 108418238 A, 2018.08.17

(22) 申请日 2024.03.26

CN 108493977 A, 2018.09.04

(65) 同一申请的已公布的文献号

CN 108711877 A, 2018.10.26

申请公布号 CN 117955148 A

CN 110460086 A, 2019.11.15

(43) 申请公布日 2024.04.30

CN 113067356 A, 2021.07.02

(73) 专利权人 浙江大学

CN 113162105 A, 2021.07.23

地址 310058 浙江省杭州市西湖区余杭塘路866号

CN 114142511 A, 2022.03.04

CN 114156931 A, 2022.03.08

CN 115224716 A, 2022.10.21

CN 116565931 A, 2023.08.08

(72) 发明人 周永智 郑凌枫 辛焕海 韦巍

US 2017331390 A1, 2017.11.16

(74) 专利代理机构 杭州求是专利事务有限公司

WO 2023087946 A1, 2023.05.25

司 33200

专利代理师 邱启旺

谢爵昊.HVDC控制系统动态性能影响因素分析与换相失败抑制策略研究.中国优秀硕士学位论文全文数据库(工程科技II辑).2022,(第2022年第01期期),C042-1720. (续)

审查员 杨海龙

(51) Int. Cl.

H02J 3/36 (2006.01)

H02J 3/16 (2006.01)

H02J 3/48 (2006.01)

H02J 3/50 (2006.01)

H02H 7/26 (2006.01)

(56) 对比文件

CN 101202445 A, 2008.06.18

权利要求书2页 说明书8页 附图5页

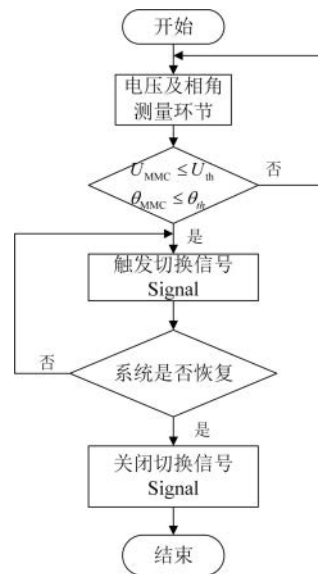
(54) 发明名称

一种混合多馈入直流输电系统换相失败故障协同恢复方法

(57) 摘要

本发明公开了一种混合多馈入直流输电系统换相失败故障协同恢复方法,本发明通过对混合多馈入直流输电系统及控制模型进行分析设计推得可基于在站内直接测量参数计算的柔性直流输电系统的临界电压及临界相角,进而可利用所得到的临界电压和临界相角进行换相失败故障判别,在信号触发下切换至定直流电压控制,实现混合多馈入直流输电系统换相失败故障协同恢复。本发明的混合多馈入直流输电系统换相失败故障协同恢复方法,能够在直流输电系统场站间无通信的条件下,实现对换相失败的协同恢复控制。

CN 117955148 B



[接上页]

**(56) 对比文件**

Wentao Sun;Quanquan Wang;Rui Gu;  
Chenyi Zheng;Yurong Wang.Coordinated  
Control Method of Multi-infeed DC System  
for Commutation Failure Prevention. 2021  
IEEE Sustainable Power and Energy  
Conference (iSPEC).2022,page 3224-3229.

Fang Zhou;Li Chenghao;Zhang Weichen;

Yao Wei;Rao Yufei;Cui Wei.An Improved  
Control Strategy Study for “Strong HVDC  
and Weak AC” Receiving-end Grid under  
Continuous Commutation Failure. 2020  
IEEE/IAS Industrial and Commercial Power  
System Asia (I&CPS Asia).2020,page 581-  
586.

1. 一种混合多馈入直流输电系统换相失败故障协同恢复方法,其特征在于,所述混合多馈入直流输电系统至少包括高压直流输电系统和柔性直流输电系统,其中,高压直流输电系统和柔性直流输电系统共同馈入同一个受端交流电网,柔性直流输电系统采用功率外环和电流内环的双环控制模式,在功率外环控制中设有一控制开关,控制开关根据切换信号切换控制方式,控制开关的切换信号触发时为定电压控制方式,否则为定无功功率控制方式;所述方法具体为:

实时获取高压直流输电系统受端的电压、相角、功率参数以及柔性直流输电系统逆变侧电压及相角参数测量值,并计算柔性直流输电系统的临界电压和临界相角;

将柔性直流输电系统逆变侧电压及相角参数测量值与柔性直流输电系统的临界电压和临界相角进行比较,当同时满足测量值低于临界电压和临界相角的标准时,说明高压直流输电系统存在换相失败故障,触发切换信号,控制开关切换柔性直流输电系统功率外环控制方式为定电压控制方式,利用柔性直流输电的无功输出能力协同恢复高压直流输电系统换相失败故障;其中,所述柔性直流输电系统的临界电压是在高压直流输电系统存在换相失败故障下,基于高压直流输电系统输出的功率和电压关系计算获得的;所述柔性直流输电系统的临界相角是在高压直流输电系统存在换相失败故障下,基于混合多馈入直流输电系统向受端交流电网注入的功率与相角关系计算获得的。

2. 根据权利要求1所述的方法,其特征在于,所述柔性直流输电系统的临界电压的计算公式如下:

$$\begin{cases} P_{LCC} = \frac{U_{lim} U_{th}}{Z_c} \sin(\theta_{LCC} - \theta_{MMC}) \\ Q_{LCC} = \frac{U_{lim}^2}{Z_c} - \frac{U_{lim} U_{th}}{Z_c} \cos(\theta_{LCC} - \theta_{MMC}) \end{cases};$$

$$U_{lim} = U - U_{\Delta};$$

$$U_{\Delta} = 1 - \frac{X_{pu}}{X_{pu} + \cos \gamma_{min} - \cos \gamma_{ref}};$$

式中, $P_{LCC}$ 和 $Q_{LCC}$ 为高压直流输电系统输出的有功和无功功率, $U_{th}$ 为柔性直流输电系统的临界电压, $\theta_{LCC}$ 和 $\theta_{MMC}$ 分别为高压直流输电和柔性直流输电的相角, $Z_c$ 表示高压直流输电系统与柔性直流输电系统间的等效阻抗; $U_{lim}$ 为高压直流输电系统换相失败临界电压, $X_{pu}$ 为换相电抗标么值, $\gamma_{min}$ 为关断角最小值, $\gamma_{ref}$ 表示关断角参考值, $U_{\Delta}$ 表示引起换相失败的最小电压降落, $U$ 表示高压直流输电系统受端测得的交流电压标么值。

3. 根据权利要求1所述的方法,其特征在于,所述柔性直流输电系统的临界相角的计算公式如下:

$$\begin{cases} P_{ac} = \frac{U_{th} U_{ac}}{Z_{ac}} \sin \theta_{th} \\ Q_{ac} = \frac{U_{th}^2}{Z_{ac}} - \frac{U_{th} U_{ac}}{Z_{ac}} \cos \theta_{th} \end{cases};$$

式中; $P_{ac}$ 和 $Q_{ac}$ 分别为换相失败故障下混合多馈入直流输电系统向受端交流电网注入的有功功率和无功功率; $U_{ac}$ 表示受端交流电网电压有效值, $Z_{ac}$ 表示受端交流电网等效阻抗, $U_{th}$ 为柔性直流输电系统的临界电压, $\theta_{th}$ 为柔性直流输电系统的临界相角。

4. 根据权利要求1所述的方法,其特征在于,所述高压直流输电系统采用标准控制模型进行控制。

5. 根据权利要求1所述的方法,其特征在于,还包括:对高压直流输电系统换相失败故障是否恢复进行判别:若高压直流输电系统换相失败故障恢复,则关闭切换信号,切换柔性直流输电系统功率外环控制方式为定无功功率控制方式;若系统未恢复,则维持切换信号。

6. 根据权利要求5所述的方法,其特征在于,对高压直流输电系统换相失败故障是否恢复进行判别的方法为:

实时获取高压直流输电系统受端的电压、相角、功率参数以及柔性直流输电系统逆变侧电压及相角参数测量值计算柔性直流输电系统的临界电压和临界相角;

将柔性直流输电系统逆变侧电压及相角参数测量值与柔性直流输电系统的临界电压和临界相角进行比较,若测量值大于临界电压和临界相角的标准,且维持至少5个周波,高压直流输电系统换相失败故障恢复完成。

7. 一种混合多馈入直流输电系统换相失败故障协同恢复装置,其特征在于,用于实现权利要求1-6任一项所述一种混合多馈入直流输电系统换相失败故障协同恢复方法,所述装置包括:

数据获取模块,用于实时获取高压直流输电系统受端的电压、相角、功率参数以及柔性直流输电系统逆变侧电压及相角参数测量值,并计算柔性直流输电系统的临界电压和临界相角;所述柔性直流输电系统的临界电压是在高压直流输电系统存在换相失败故障下,基于高压直流输电系统输出的功率和电压关系计算获得的;所述柔性直流输电系统的临界相角是在高压直流输电系统存在换相失败故障下,基于混合多馈入直流输电系统向受端交流电网注入的功率与相角关系计算获得的;

协同恢复模块,用于将柔性直流输电系统逆变侧电压及相角参数测量值与柔性直流输电系统的临界电压和临界相角进行比较,当同时满足测量值低于临界电压和临界相角的标准时,说明高压直流输电系统存在换相失败故障,触发切换信号,控制开关切换柔性直流输电系统功率外环控制方式为定电压控制方式,利用柔性直流输电的无功输出能力协同恢复高压直流输电系统换相失败故障。

8. 一种电子设备,包括存储器、处理器及存储在存储器上并可在处理器上运行的计算机程序,其特征在于,所述处理器执行所述计算机程序时实现如权利要求1-6任一项所述一种混合多馈入直流输电系统换相失败故障协同恢复方法。

9. 一种包含计算机可执行指令的存储介质,所述计算机可执行指令在由计算机处理器执行时实现如权利要求1-6任一项所述一种混合多馈入直流输电系统换相失败故障协同恢复方法。

10. 一种计算机程序产品,包括计算机程序/指令,其特征在于,该计算机程序/指令被处理器执行时实现权利要求1-6任一项所述一种混合多馈入直流输电系统换相失败故障协同恢复方法的步骤。

## 一种混合多馈入直流输电系统换相失败故障协同恢复方法

### 技术领域

[0001] 本发明属于电力系统技术领域,涉及电力系统在混合多馈入直流输电系统换相失败故障情况下,利用局部电气量测量值进行的换相失败故障协同恢复方法,尤其是一种混合多馈入直流输电系统换相失败故障协同恢复方法。

### 背景技术

[0002] 随着清洁能源的发展,电力系统中风电、光伏等新能源大规模渗透。高压直流输电具有传输容量大、距离远的特点,能够高效的将清洁能源送往负荷中心,成为解决大规模新能源传输问题的主要手段。传统高压直流输电采用晶闸管换相换流器进行换相,实现交直流间的转换。然而,传统的高压直流输电由于晶闸管半控的特性,当电网电压跌落,晶闸管两端的反向电压不足以关断晶闸管,本该关断的晶闸管维持导通,进而引起换相失败。柔性直流输电作为一种新型直流输电技术,采用全控型的IGBT作为换相元件,能够控制其导通和关断,具备有功和无功功率的四象限控制能力。将传统直流和柔性直流输电馈入同一个局部电网,构成混合多馈入直流输电系统,利用柔性直流输电的功率控制能力向电网注入无功功率,提高局部电网电压水平,实现换相失败恢复;现有的混合多馈入直流输电系统,采用基于传统直流和柔性直流通信的方式进行协同控制,存在通讯延迟及噪声干扰等问题。因此,如何基于局部电气量测量值,满足传统直流与柔性直流输电场站间在无通信条件下,实现混合多馈入直流输电系统换相失败协同恢复,保障电力系统安全稳定运行至关重要。

### 发明内容

[0003] 本发明所要解决的技术问题是克服上述现有技术存在的不足,提供一种不依赖通信的混合多馈入直流输电系统换相失败故障协同恢复方法,利用局部的电压、相角测量作为判据,通过调整柔性直流输电系统控制策略,无需多个直流输电场站间通讯,实现多馈入直流输电系统换相失败故障协同恢复。

[0004] 为此,本发明采用如下的技术方案:

[0005] 一种混合多馈入直流输电系统换相失败故障协同恢复方法,所述混合多馈入直流输电系统至少包括高压直流输电系统和柔性直流输电系统,其中,高压直流输电系统和柔性直流输电系统共同馈入同一个受端交流电网,柔性直流输电系统采用功率外环和电流内环的双环控制模式,在功率外环控制中设有一控制开关,控制开关根据切换信号Signal切换控制方式,控制开关的切换信号Signal触发时为定电压控制方式,否则为定无功功率控制方式;所述方法具体为:

[0006] 实时获取高压直流输电系统受端的电压、相角、功率参数以及柔性直流输电系统逆变侧电压及相角参数测量值,并计算柔性直流输电系统的临界电压和临界相角;

[0007] 将柔性直流输电系统逆变侧电压及相角参数测量值与柔性直流输电系统的临界电压和临界相角进行比较,当同时满足测量值低于临界电压和临界相角的标准时,说明高

压直流输电系统存在换相失败故障,触发切换信号,控制开关切换柔性直流输电系统功率外环控制方式为定电压控制方式,利用柔性直流输电的无功输出能力协同恢复高压直流输电系统换相失败故障;其中,所述柔性直流输电系统的临界电压是在高压直流输电系统存在换相失败故障下,基于高压直流输电系统输出的功率和电压关系计算获得的;所述柔性直流输电系统的临界相角是在高压直流输电系统存在换相失败故障下,基于混合多馈入直流输电系统向受端交流电网注入的功率与相角关系计算获得的。

[0008] 进一步地,所述柔性直流输电系统的临界电压的计算公式如下:

$$[0009] \quad \begin{cases} P_{LCC} = \frac{U_{lim} U_{th}}{Z_c} \sin(\theta_{LCC} - \theta_{MMC}) \\ Q_{LCC} = \frac{U_{lim}^2}{Z_c} - \frac{U_{lim} U_{th}}{Z_c} \cos(\theta_{LCC} - \theta_{MMC}) \end{cases};$$

$$[0010] \quad U_{lim} = U - U_{\Delta};$$

$$[0011] \quad U_{\Delta} = 1 - \frac{X_{pu}}{X_{pu} + \cos \gamma_{min} - \cos \gamma_{ref}};$$

[0012] 式中, $P_{LCC}$ 和 $Q_{LCC}$ 为高压直流输电系统输出的有功和无功功率, $U_{th}$ 为柔性直流输电系统的临界电压, $\theta_{LCC}$ 和 $\theta_{MMC}$ 分别为高压直流输电和柔性直流输电的相角, $Z_c$ 表示高压直流输电系统与柔性直流输电系统间的等效阻抗; $U_{lim}$ 为高压直流输电系统换相失败临界电压, $X_{pu}$ 为换相电抗标么值, $\gamma_{min}$ 为关断角最小值, $\gamma_{ref}$ 表示关断角参考值, $U_{\Delta}$ 表示引起换相失败的最小电压降落, $U$ 表示高压直流输电系统受端测得的交流电压标么值。

[0013] 进一步地,所述柔性直流输电系统的临界相角的计算公式如下:

$$[0014] \quad \begin{cases} P_{ac} = \frac{U_{th} U_{ac}}{Z_{ac}} \sin \theta_{th} \\ Q_{ac} = \frac{U_{th}^2}{Z_{ac}} - \frac{U_{th} U_{ac}}{Z_{ac}} \cos \theta_{th} \end{cases};$$

[0015] 式中; $P_{ac}$ 和 $Q_{ac}$ 分别为换相失败故障下混合多馈入直流输电系统向受端交流电网注入的有功功率和无功功率; $U_{ac}$ 表示受端交流电网电压有效值, $Z_{ac}$ 表示受端交流电网等效阻抗, $U_{th}$ 为柔性直流输电系统的临界电压, $\theta_{th}$ 为柔性直流输电系统的临界相角。

[0016] 进一步地,所述高压直流输电系统采用标准控制模型进行控制。

[0017] 进一步地,还包括:对高压直流输电系统换相失败故障是否恢复进行判别:若高压直流输电系统换相失败故障恢复,则关闭切换信号Signal,切换柔性直流输电系统功率外环控制方式为定无功功率控制方式;若系统未恢复,则维持切换信号Signal。

[0018] 进一步地,对高压直流输电系统换相失败故障是否恢复进行判别的方法为:

[0019] 实时获取高压直流输电系统受端的电压、相角、功率参数以及柔性直流输电系统逆变侧电压及相角参数测量值计算柔性直流输电系统的临界电压和临界相角;

[0020] 将柔性直流输电系统逆变侧电压及相角参数测量值与柔性直流输电系统的临界电压和临界相角进行比较,若测量值大于临界电压和临界相角的标准,且维持至少5个周

波,高压直流输电系统换相失败故障恢复完成。

[0021] 基于相同的原理,本发明还提供了一种混合多馈入直流输电系统换相失败故障协同恢复装置,用于实现所述一种混合多馈入直流输电系统换相失败故障协同恢复方法,所述装置包括:

[0022] 数据获取模块,用于实时获取高压直流输电系统受端的电压、相角、功率参数以及柔性直流输电系统逆变侧电压及相角参数测量值,并计算柔性直流输电系统的临界电压和临界相角;所述柔性直流输电系统的临界电压是在高压直流输电系统存在换相失败故障下,基于高压直流输电系统输出的功率和电压关系计算获得的;所述柔性直流输电系统的临界相角是在高压直流输电系统存在换相失败故障下,基于混合多馈入直流输电系统向受端交流电网注入的功率与相角关系计算获得的;

[0023] 协同恢复模块,用于将柔性直流输电系统逆变侧电压及相角参数测量值与柔性直流输电系统的临界电压和临界相角进行比较,当同时满足测量值低于临界电压和临界相角的标准时,说明高压直流输电系统存在换相失败故障,触发切换信号,控制开关切换柔性直流输电系统功率外环控制方式为定电压控制方式,利用柔性直流输电的无功输出能力协同恢复高压直流输电系统换相失败故障。

[0024] 本发明还提供了一种电子设备,包括存储器、处理器及存储在存储器上并可在处理器上运行的计算机程序,所述处理器执行所述计算机程序时实现所述一种混合多馈入直流输电系统换相失败故障协同恢复方法。

[0025] 本发明还提供了一种包含计算机可执行指令的存储介质,所述计算机可执行指令在由计算机处理器执行时实现所述一种混合多馈入直流输电系统换相失败故障协同恢复方法。

[0026] 一种计算机程序产品,包括计算机程序/指令,该计算机程序/指令被处理器执行时实现所述一种混合多馈入直流输电系统换相失败故障协同恢复方法的步骤。

[0027] 本发明的有益效果是:

[0028] 本发明通过对混合多馈入直流输电系统及控制模型进行分析设计推得可基于在站内直接测量参数计算的柔性直流输电系统的临界电压及临界相角,进而可利用所得到的临界电压和临界相角进行换相失败故障判别,在信号触发下切换至定直流电压控制,实现混合多馈入直流输电系统换相失败故障协同恢复。本发明的混合多馈入直流输电系统换相失败故障协同恢复方法,能够在直流输电系统场站间无通信的条件下,实现对换相失败的协同恢复控制。

## 附图说明

[0029] 图1为本发明一示例的混合多馈入直流输电系统模型;

[0030] 图2为本发明一示例的高压直流输电系统逆变侧控制模型;

[0031] 图3为本发明一示例的柔性直流输电系统逆变侧控制模型;

[0032] 图4为本发明一种混合多馈入直流输电系统换相失败故障协同恢复方法流程图;

[0033] 图5为实施例1场景一故障下系统主要参数变化图;图5中的(a)为柔性直流输电系统逆变侧相角变化图,图5中的(b)为柔性直流输电系统输出的无功功率变化图,图5中的(c)为高压直流输电系统的换相电压变化图,图5中的(d)为高压直流输电系统的关断角变

化图；

[0034] 图6为实施例1场景二故障下系统主要参数变化图；图6中的(a)为柔性直流输电系统逆变侧相角变化图，图6中的(b)为柔性直流输电系统输出的无功功率变化图，图6中的(c)为高压直流输电系统的换相电压变化图，图6中的(d)为高压直流输电系统的关断角变化图。

### 具体实施方式

[0035] 以下结合说明书附图对本发明作进一步说明。

[0036] 本发明对混合多馈入直流输电系统进行分析，从而设计获得可基于站内直接采集的参数数据计算的柔性直流输电系统的临界电压和临界相角，对高压直流输电系统换相失败故障进行判别，最终在无通信的条件下，实现对换相失败的协同恢复控制。其中，混合多馈入直流输电系统至少包含高压直流输电系统和柔性直流输电系统，二者从不同的送端交流电网输送功率，共同馈入同一个受端交流电网，在高压直流输电逆变侧形成混合多馈入直流输电系统。图1所示为一示例的混合多馈入直流输电系统模型结构，包含一个高压直流输电系统和一个柔性直流输电系统，图中 $U_{MMC}$ 为柔性直流输电系统出口处电压有效值， $U_{LCC}$ 为高压直流输电系统出口处电压有效值， $Z_C$ 为高压直流输电系统与柔性直流输电系统间的等效阻抗， $Z_{ac}$ 为受端交流电网等效阻抗， $U_{ac}$ 为受端交流电网电压有效值。

[0037] 图2示出了高压直流输电系统逆变侧控制模型，采用标准控制模型进行控制。图2中， $U_d$ 为直流电压， $I_d$ 为高压直流输电系统的直流电流，VDCOL为低压限流控制单元， $I_{dref}$ 为高压直流输电系统的直流电流参考值，CEC为电流误差控制， $\gamma_Y$ 和 $\gamma_\Delta$ 分别为变压器星型连结和三角形连结侧的关断角， $\gamma_{ref}$ 为关断角参考值， $\Delta\gamma_{CEC}$ 为经电流误差控制后的关断角补偿量， $\beta_{CC}$ 和 $\beta_{CEA}$ 分别为定直流电流控制和定关断角控制产生的熄弧角， $\beta$ 为经比较输出后的高压直流输电系统实际控制熄弧角， $\alpha$ 为控制晶闸管导通的触发角。在控制模型中，低压限流控制单元通过测量直流电压生成直流电流参考值；定电流控制通过直流电流参考值与实际值的差值，经PI环节得到的输出作为定电流控制产生的熄弧角 $\beta_{CC}$ ；定关断角控制通过比较关断角参考值与实际关断角 $\gamma_Y$ 和 $\gamma_\Delta$ 一个周期内的最小值的差值，并补偿以CEC的输出，经PI环节得到的输出作为定关断角控制产生的熄弧角。通过取定电流和定关断角控制产生的熄弧角最大值作为实际熄弧角，生成高压直流输电触发角控制信号。

[0038] 图3所示为柔性直流输电系统逆变侧控制模型，采用双环控制策略：功率外环和电流内环的双环控制模式。图3中， $P_{ref}$ 为有功功率参考值， $P$ 为实际有功功率出力测量值， $Q_{ref}$ 为无功功率参考值， $Q$ 为实际无功功率出力测量值， $U_{ref}$ 为交流电压参考值， $U$ 为实际交流电压测量值， $i_{dref}$ 和 $i_{qref}$ 为d轴和q轴电流参考值， $L$ 为桥臂电感， $\omega$ 为混合多馈入直流输电系统受端交流电网角频率， $E_d$ 和 $E_q$ 为内电势d轴和q轴值。

[0039] 如图3所示，电流内环控制先基于d轴和q轴电流、电压测量值进行控制，因而，将柔性直流输电系统逆变侧测得的三相交流电压瞬时值 $u_{abc}$ 和三相交流电流瞬时值 $i_{abc}$ 进行派克变换，以得到分解至dq轴的电压和电流测量值，其具体公式如下：

$$[0040] \quad \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \end{bmatrix} = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} \cos\theta & \cos(\theta - 120^\circ) & \cos(\theta + 120^\circ) \\ -\sin\theta & -\sin(\theta - 120^\circ) & -\sin(\theta + 120^\circ) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix}$$

$$[0041] \quad \begin{bmatrix} u_d \\ u_q \end{bmatrix} = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} \cos\theta & \cos(\theta - 120^\circ) & \cos(\theta + 120^\circ) \\ -\sin\theta & -\sin(\theta - 120^\circ) & -\sin(\theta + 120^\circ) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_a \\ u_b \\ u_c \end{bmatrix}$$

[0042] 式中： $i_d$ 和 $i_q$ 为d轴电流分量和q轴电流分量， $u_d$ 和 $u_q$ 为d轴电压分量和q轴电压分量， $i_a, i_b, i_c$ 分别为a相，b相和c相的电流瞬时值， $u_a, u_b, u_c$ 分别为a相，b相和c相的电压瞬时值， $\theta$ 为相角。

[0043] 如图3所示，在功率外环控制中设一控制开关，Signal为控制开关的切换信号，控制开关根据切换信号Signal切换控制方式，控制开关的切换信号Signal触发时为定电压控制方式，最大限度利用柔性直流输电的无功输出能力显著提升换相电压，协助高压直流输电系统换相失败故障恢复，否则为定无功功率控制方式。

[0044] 基于对上述混合多馈入直流输电系统和控制模型的分析，高压直流输电换相失败故障通常是由于电网所能提供的换相电压不足引起的，通过计算换相失败临界电压，可以在高压直流输电系统对换相失败故障进行简单判别。依照下式计算高压直流输电系统换相失败临界电压：

$$[0045] \quad U_{\text{lim}} = U - U_{\Delta}$$

$$[0046] \quad U_{\Delta} = 1 - \frac{X_{\text{pu}}}{X_{\text{pu}} + \cos\gamma_{\text{min}} - \cos\gamma_{\text{ref}}}$$

[0047] 式中： $U_{\text{lim}}$ 为高压直流输电系统换相失败临界电压， $X_{\text{pu}}$ 为换相电抗标么值， $\gamma_{\text{min}}$ 为关断角最小值，工程上一般取 $7^\circ$ ； $\gamma_{\text{ref}}$ 表示关断角参考值， $U_{\Delta}$ 表示引起换相失败的最小电压降落， $U$ 表示高压直流输电系统受端测得的交流电压标么值。

[0048] 在到达换相失败临界电压时，高压直流输电即将发生换相失败，此时高压直流输电系统送出的功率不发生改变。通过下式可以求得柔性直流输电系统的临界电压 $U_{\text{th}}$ ：

$$[0049] \quad \begin{cases} P_{\text{LCC}} = \frac{U_{\text{lim}} U_{\text{th}}}{Z_c} \sin(\theta_{\text{LCC}} - \theta_{\text{MMC}}) \\ Q_{\text{LCC}} = \frac{U_{\text{lim}}^2}{Z_c} - \frac{U_{\text{lim}} U_{\text{th}}}{Z_c} \cos(\theta_{\text{LCC}} - \theta_{\text{MMC}}) \end{cases}$$

[0050] 式中： $P_{\text{LCC}}$ 和 $Q_{\text{LCC}}$ 分别为高压直流输电系统输出的有功和无功功率， $U_{\text{th}}$ 为柔性直流输电系统的临界电压， $\theta_{\text{LCC}}$ 和 $\theta_{\text{MMC}}$ 分别为高压直流输电和柔性直流输电的相角， $Z_c$ 表示高压直流输电系统与柔性直流输电系统间的等效阻抗。

[0051] 进一步地，由于高压直流输电场站与柔性直流输电场站有一定的电气距离，仅靠柔性直流输电的临界电压进行换相失败判别可能产生误判。当高压直流输电发生换相失败时，相当于直流侧短路，输送功率急剧下降，将引起系统相位发生改变。依照下式计算柔性

直流输电系统的临界相角 $\theta_{th}$ ：

$$[0052] \quad \begin{cases} P_{ac} = \frac{U_{th}U_{ac}}{Z_{ac}} \sin \theta_{th} \\ Q_{ac} = \frac{U_{th}^2}{Z_{ac}} - \frac{U_{th}U_{ac}}{Z_{ac}} \cos \theta_{th} \end{cases}$$

[0053] 式中： $P_{ac}$ 和 $Q_{ac}$ 分别为混合多馈入直流输电系统向受端交流电网注入的有功功率和无功功率。 $U_{ac}$ 表示受端交流电网电压有效值， $Z_{ac}$ 表示受端交流电网等效阻抗，当高压直流输电系统输出的有功功率降至正常运行状态50%时，认为发生换相失败故障，取 $P_{ac} = 0.5P_{LCC} + P_{MMC}$ ，计算柔性直流输电系统的临界相角。

[0054] 基于上述设计的柔性直流输电系统的临界电压和临界相角，即可在无通信条件下实现本发明的一种混合多馈入直流输电系统换相失败故障协同恢复方法，如图4所示，具体如下：

[0055] 电压及相角测量环节：实时获取高压直流输电系统受端的电压、相角、功率参数以及柔性直流输电系统逆变侧电压及相角参数测量值，并计算柔性直流输电系统的临界电压和临界相角；其中，高压直流输电系统受端的电压、相角、功率参数具体为高压直流输电系统输出的有功和无功功率、高压直流输电系统受端测得的交流电压标么值、高压直流输电系统的相角。

[0056] 将柔性直流输电系统逆变侧电压及相角参数测量值与柔性直流输电系统的临界电压和临界相角进行比较，当同时满足测量值低于临界电压和临界相角的标准时，说明高压直流输电系统存在换相失败故障，触发切换信号，切换柔性直流输电系统功率外环控制方式为定电压控制方式，利用柔性直流输电的无功输出能力协同恢复高压直流输电系统存在换相失败故障。

[0057] 其中，当柔性直流输电系统切换控制方式后，需要提供定电压控制的电压参考值。一般的，可采用标么值1作为定电压控制的电压参考值。

[0058] 进一步地，还包括：对高压直流输电系统换相失败故障是否恢复进行判别：

[0059] 如图4所示，若高压直流输电系统换相失败故障恢复，则关闭切换信号Signal，切换柔性直流输电系统功率外环控制方式为定无功功率控制方式；若系统未恢复，则维持切换信号Signal。

[0060] 所涉及的换相失败故障判别方法包括但不限于以下方法：通过测量电压及相角大于临界电压与临界相角进行判别，具体如下：

[0061] 实时获取高压直流输电系统受端的电压、相角、功率参数以及柔性直流输电系统逆变侧电压及相角参数测量值计算柔性直流输电系统的临界电压和临界相角；

[0062] 将柔性直流输电系统逆变侧电压及相角参数测量值与柔性直流输电系统的临界电压和临界相角进行比较，若测量值大于临界电压和临界相角的标准，且维持至少5个周波，高压直流输电系统换相失败故障恢复完成。

[0063] 下面结合一具体实施例对本发明的效果作进一步说明。

[0064] 实施例1

[0065] 本实施例以图1所示混合多馈入直流输电系统模型为例结合表1所示参数进行仿

真验证,其中,柔性直流输电系统模型采用多电平柔性直流输电。交流系统短路比取2.5。算例设置两种不同程度的短路故障对混合多馈入直流输电系统换相失败故障协同恢复策略进行分析:

[0066] 场景一:高压直流输电逆变侧换流站高阻抗故障,接地电感0.4 H,短路时间0.15 S。

[0067] 场景二:高压直流输电逆变侧换流站高阻抗故障,接地电感0.1 H,短路时间0.15 S。

[0068] 算例中,包含对三种不同控制策略的对比:

[0069] 控制策略一:换相失败故障期间柔性直流输电系统维持定无功功率控制。

[0070] 控制策略二:换相失败故障期间采用基于场站间通讯的控制方法,在高压直流输电到达换相失败临界电压时,传输信号触发柔性直流输电系统切换控制,通讯延迟取120 ms。

[0071] 控制策略三:采用本发明的混合多馈入直流输电系统换相失败故障协同恢复方法进行控制。

[0072] 表1仿真算例相关参数

| 系统参数       | 高压直流输电    | 柔性直流输电  |
|------------|-----------|---------|
| 额定功率/MW    | 1000      | 500     |
| 直流电压/kV    | 500       | 400     |
| 变压器变比/kV   | 230/209.2 | 230/210 |
| 变压器漏抗/p.u. | 0.18      | 0.1     |
| 直流电感/H     | 0.15      | /       |

[0074] 场景分析:

[0075] 图5所示为场景一故障下,在不同控制策略下的系统主要参数变化,图5中的(a)为柔性直流输电系统逆变侧相角变化图,图5中的(b)为柔性直流输电系统输出的无功功率变化图,图5中的(c)为高压直流输电系统的换相电压变化图,图5中的(d)为高压直流输电系统的关断角变化图。在场景一故障下,电压跌落程度较低。由图中可以看出,三种控制策略下,策略三即采用本发明的混合多馈入直流输电系统换相失败故障协同恢复方法,提前感知辨识换相失败故障,最大限度利用柔性直流输电的无功输出能力,显著的提升了换相失败故障恢复过程中的换相电压,有效避免了连续换相失败。

[0076] 图6所示为场景二故障下,在不同控制策略下的系统主要参数变化,图6中的(a)为柔性直流输电系统逆变侧相角变化图,图6中的(b)为柔性直流输电系统输出的无功功率变化图,图6中的(c)为高压直流输电系统的换相电压变化图,图6中的(d)为高压直流输电系统的关断角变化图。在场景二故障下,电压跌落程度较高。由图中可以看出,三种控制策略下,策略三即采用本发明的混合多馈入直流输电系统换相失败故障协同恢复方法,提前感知辨识换相失败故障,最大限度利用柔性直流输电的无功输出能力,显著的提升了换相失败故障恢复过程中的换相电压。

[0077] 与前述一种混合多馈入直流输电系统换相失败故障协同恢复方法的实施例相对应,本发明还提供了一种混合多馈入直流输电系统换相失败故障协同恢复装置的实施例。装置包括:

[0078] 数据获取模块,用于实时获取高压直流输电系统受端的电压、相角、功率参数以及柔性直流输电系统逆变侧电压及相角参数测量值,并计算柔性直流输电系统的临界电压和临界相角;所述柔性直流输电系统的临界电压是在高压直流输电系统存在换相失败故障下,基于高压直流输电系统输出的功率和电压关系计算获得的;所述柔性直流输电系统的临界相角是在高压直流输电系统存在换相失败故障下,基于混合多馈入直流输电系统向受端交流电网注入的功率与相角关系计算获得的;

[0079] 协同恢复模块,用于将柔性直流输电系统逆变侧电压及相角参数测量值与柔性直流输电系统的临界电压和临界相角进行比较,当同时满足测量值低于临界电压和临界相角的标准时,说明高压直流输电系统存在换相失败故障,触发切换信号,控制开关切换柔性直流输电系统功率外环控制方式为定电压控制方式,利用柔性直流输电的无功输出能力协同恢复高压直流输电系统存在换相失败故障。

[0080] 本发明装置可以应用在任意具备数据处理能力的设备上,该任意具备数据处理能力的设备可以为诸如计算机等设备或装置。

[0081] 对于装置实施例而言,由于其基本对应于方法实施例,所以相关之处参见方法实施例的部分说明即可。以上所描述的装置实施例仅仅是示意性的,其中所述作为分离部件说明的单元可以是或者也可以不是物理上分开的,作为单元显示的部件可以是或者也可以不是物理单元,可以位于一个地方,或者也可以分布到多个网络单元上。可以根据实际的需要选择其中的部分或者全部模块来实现本发明方案的目的。本领域普通技术人员在不付出创造性劳动的情况下,即可以理解并实施。

[0082] 本发明还提供了一种电子设备,包括存储器(内存)、处理器及存储在存储器上并可在处理器上运行的计算机程序,所述处理器执行所述计算机程序时实现如所述的一种混合多馈入直流输电系统换相失败故障协同恢复方法。电子设备作为一个逻辑意义上的装置,是通过其所在任意具备数据处理能力的设备的处理器将非易失性存储器中对应的计算机程序指令读取到内存中运行形成的;除了处理器、内存、网络接口、以及非易失性存储器之外,实施例中装置所在的任意具备数据处理能力的设备通常根据该任意具备数据处理能力的设备的实际功能,还可以包括其他硬件,对此不再赘述。

[0083] 本发明实施例还提供一种计算机可读存储介质,其上存储有程序,该程序被处理器执行时,实现上述实施例中的一种混合多馈入直流输电系统换相失败故障协同恢复方法。

[0084] 所述计算机可读存储介质可以是前述任一实施例所述的任意具备数据处理能力的设备的内部存储单元,例如硬盘或内存。所述计算机可读存储介质也可以是任意具备数据处理能力的设备,例如所述设备上配备的插接式硬盘、智能存储卡(Smart Media Card, SMC)、SD卡、闪存卡(Flash Card)等。进一步的,所述计算机可读存储介质还可以既包括任意具备数据处理能力的设备的内部存储单元也包括外部存储设备。所述计算机可读存储介质用于存储所述计算机程序以及所述任意具备数据处理能力的设备所需的其他程序和数据,还可以用于暂时地存储已经输出或者将要输出的数据。



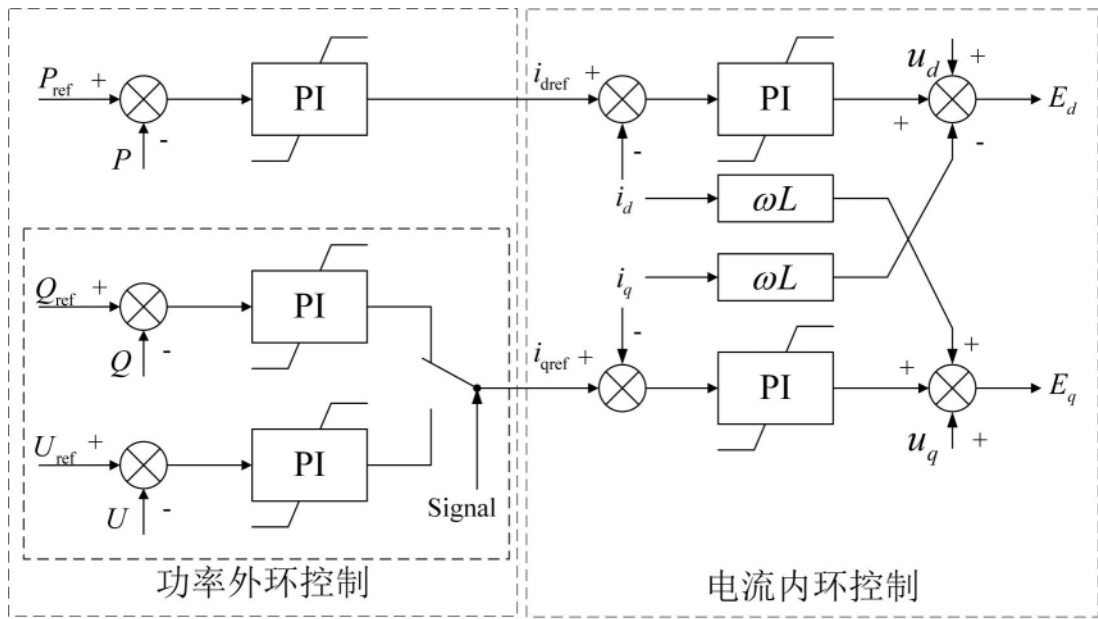


图3

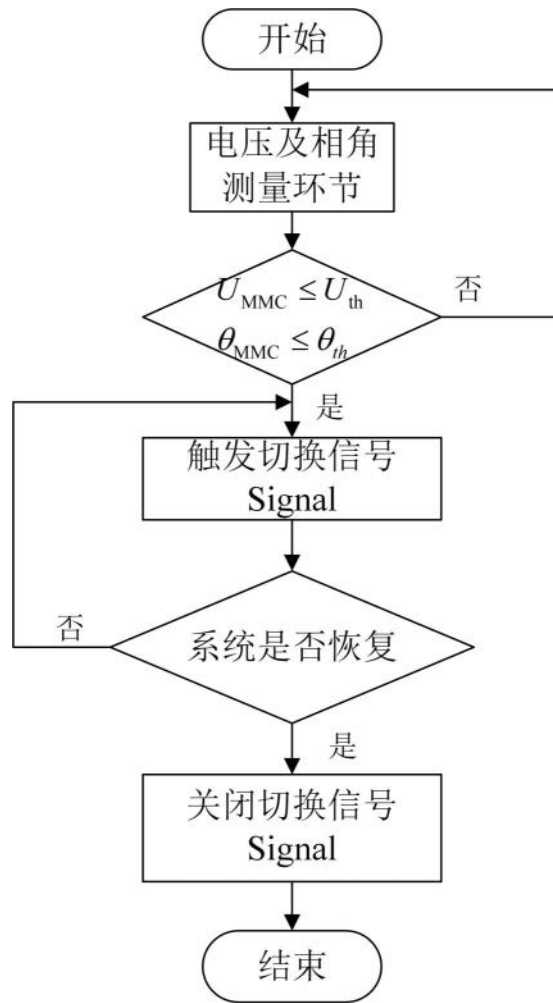


图4

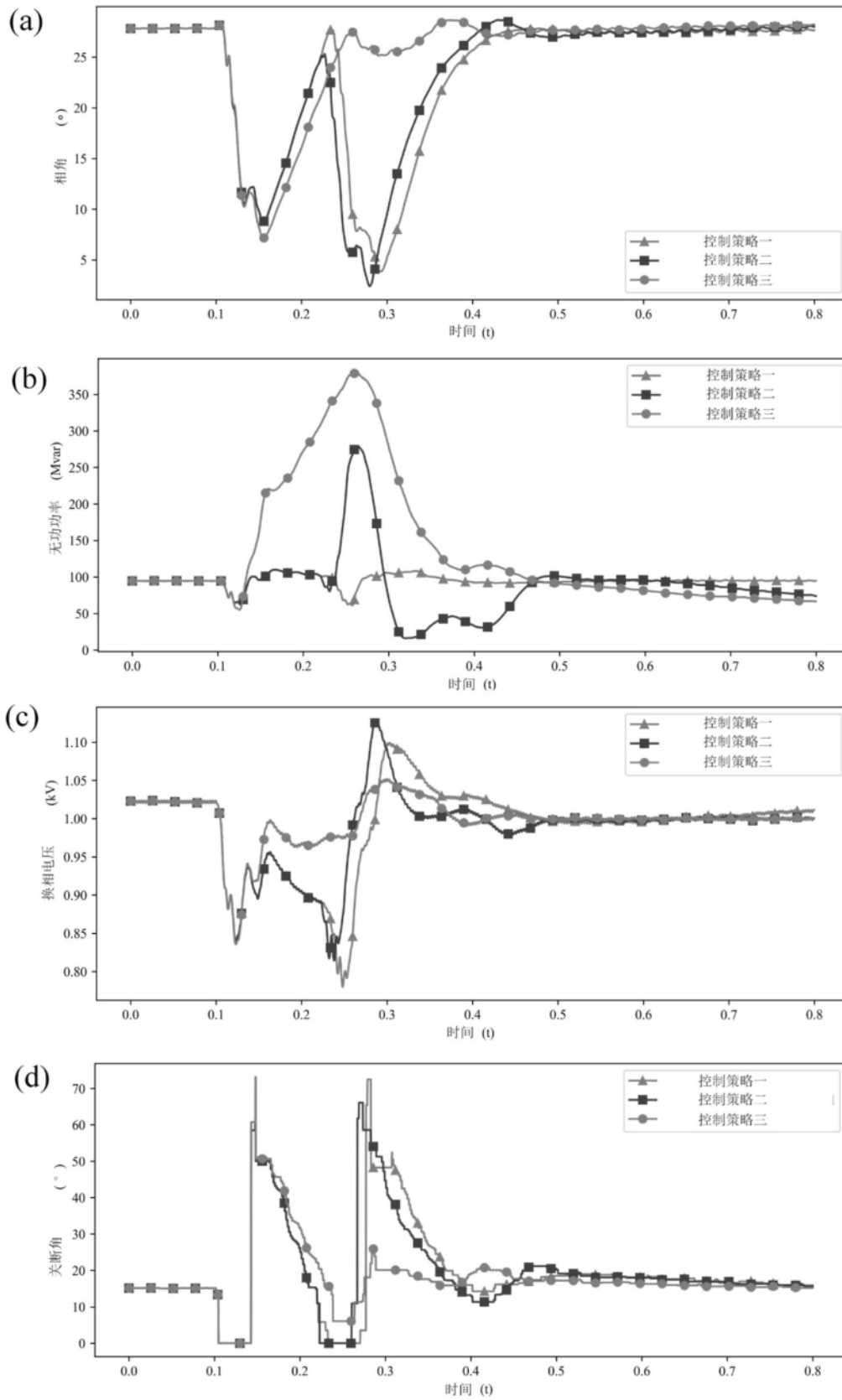


图5

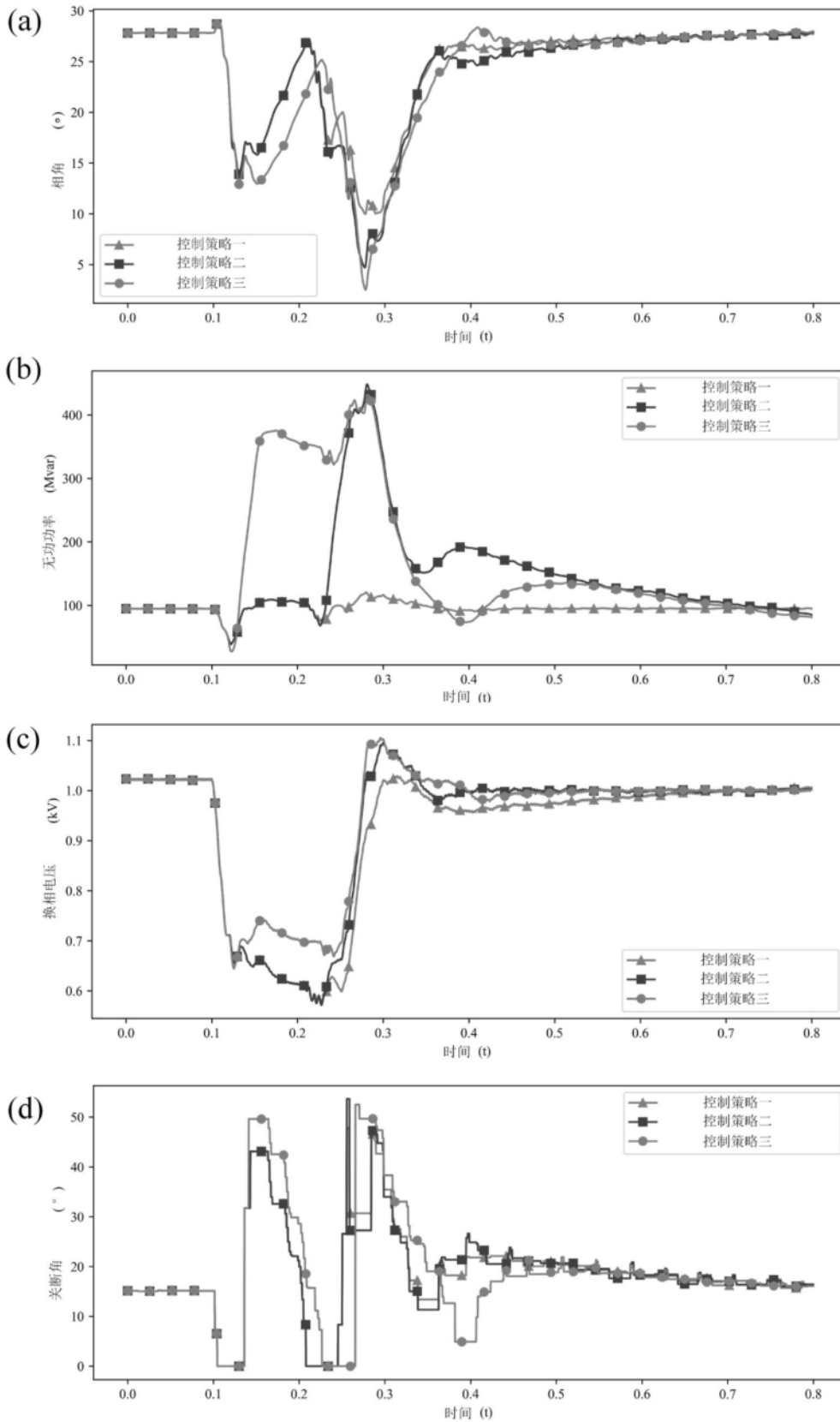


图6