

交流暂态故障对柔性直流系统影响的评判研究^{*}

陈继开, 窦延辉, 李国庆, 辛业春, 王振浩

(东北电力大学电气工程学院 吉林 132012)

摘要:在模块化多电平电压源换流器高压直流输电(MMC-HVDC)系统中,发生在交流输电线路的各类暂态故障或扰动不但会引起与交流系统连接的MMC换流站内上下桥臂不同程度过流、过压现象,也会将对向站的正常运行产生一定程度的负面影响。如何利用MMC换流站内各电气信息实现交流暂态故障或扰动对其运行状态影响程度的评判将是今后MMC-HVDC研究领域的热点问题。针对上述问题,首先分析了交流输电线路暂态故障对站内电压、电流的影响,指出站内各电气信息之间的联系。而后鉴于MMC-HVDC系统阻尼对暂态故障能量传递的抑制作用,考虑故障扰动时站内电压、电流具有变化无规律、频率复杂且扰动特征能量等级低等特点,提出利用Renyi小波包能量熵对交流暂态故障发生时站内电气信息进行特征提取,并根据特征提取结果构建了系统运行状态评判指标集。基于Renyi熵权和灰色关联分析理论,提出了一种双端MMC-HVDC系统运行状态综合评判方法。最后,利用双端31电平MMC-HVDC系统进行了各类交流暂态故障的模拟实验,并基于该方法实现了不同交流暂态故障对MMC-HVDC系统运行状态影响程度的评判,判断结果证明了该方法的有效性。

关键词:暂态故障;模块化多电平电压源换流器;高压直流输电;运行状态评判;灰色关联分析;Renyi熵

中图分类号: TM93 TP274 TH701 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 470.40

Operating state evaluation for MMC-HVDC system under AC transient faults

Chen Jikai, Dou Yanhui, Li Guoqing, Xin Yechun, Wang Zhenhao

(School of Electrical Engineering, Northeast Electric Power University, Jilin 132012, China)

Abstract: In MMC-HVDC system, the AC transient faults will bring over-current and overvoltage occurred on arms of rectification and inverter station, as well as abnormal operating state. To evaluate the operating state of MMC-HVDC system is a new issue by using electrical information of MMC when AC transient faults or disturbance occur. To address this issue, this work firstly analyzes the influence of AC transient faults on the electrical signals in MMC in detail, and investigates the relationship of electrical information in MMC. Then, considering system damping, irregular change and complex frequency of the currents and voltages and disturbance feature with low energy in MMC, Renyi wavelet packet energy entropy (RWPEE) is utilized to extract feature of AC transient faults. Based on the feature extraction, the evaluation index set is obtained. In combination of Renyi entropy weight and grey relational analysis, a novel evaluation method is proposed to evaluate operating state of MMC-HVDC system when AC transient faults occur. Finally, 2-terminal 31-level MMC-HVDC is used to generate experimental data, and operating state of MMC-HVDC system is evaluated. The experimental results prove the effectiveness of the proposed method.

Keywords: AC transient faults; modular multilevel converter high voltage direct current (MMC-HVDC); operation state evaluation; grey relational analysis; Renyi entropy

0 引言

作为一种新型的换流技术,模块化多电平换流技术

具有模块化程度高、开关频率低、易于扩展,可以实现任意电平输出等特点,所以目前在大容量电力输送、交流系统隔离、非同步交流系统联网、海岛电力输送等方面获得了广泛的应用^[1]。因此,许多专家学者已经围绕模块化

多电平电压源换流器高压直流输电(modular multilevel converter high voltage direct current, MMC-HVDC)相关技术理论开展了广泛的研究,其中交直流混联系统故障机理与保护控制策略成为目前的研究热点之一。基于多电平电压源换流器(modular multilevel converter, MMC)拓扑结构,文献[2]对典型暂态扰动的特性进行分析,建立了交流电网不平衡时 MMC 的电磁暂态模型;文献[3]定量分析 MMC-HVDC 系统直流侧故障瞬间电气信息的暂态特性、短路故障状态下的等值电路模型,给出了故障电压、电流的数学表达式;文献[4]对 MMC-HVDC 系统的阀侧交流母线故障进行了分类,就单相接地故障对系统的影响进行了深入的研究分析,并提出了相应的控制保护策略;文献[5]采用基于排序法的电容均压控制算法与最近电平逼近调制策略相结合以实现电容电压的平衡。

分析上述文献不难发现,现阶段的研究主要是从电气机理的角度分析 MMC 交直流混联系统典型故障特性以及构建相应的控制保护策略,而针对交流暂态故障对 MMC-HVDC 系统整体运行的影响程度的评判研究几乎还处于空白状态。同时,由于故障发生位置、时间、发生条件以及换流站运行工况等因素的共同作用,各类交流暂态故障对换流站运行所产生的负面影响仅从直流线路电压、电流等时域信号变化方面观察其差异并不明显,并

且传统的状态评判方法无法满足精度的要求^[6-8]。

针对上述问题,如果能够提出一种综合评判方法,准确反映双端 MMC-HVDC 系统受各类型暂态故障或扰动影响的严重程度,实现对其运行状态评判,必将为 MMC-HVDC 系统暂态运行控制研究提供前期理论支撑。鉴于此,本文构建了基于 Renyi 熵权-灰色关联分析法的评判方法,并将其应用到双端 MMC-HVDC 系统运行状态评判中,最终从理论分析和实验证明了该方法的有效性。

1 MMC 换流站交流暂态故障分析

1.1 交流暂态故障对换流站运行的影响机理

MMC-HVDC 系统拓扑如图 1 所示,两个换流站均为三相六桥臂结构,每个桥臂由若干个相互连接且结构相同的子模块与电抗器 L_0 、等效阻抗 R_0 串联构成,上、下两个桥臂构成一个相单元, O 点为中性点。 u_{lj} ($j = A, B, C$) 为变压器 T_1 的网侧电压, u'_{lj} ($j = A, B, C$) 为变压器 T_1 的阀侧电压,整流站的桥臂电压用 6 个受控电压源 u_{pj} 、 u_{nj} ($j = A, B, C$) 来等效,下标 p 、 n 分别为上桥臂和下桥臂,相应的桥臂电流分别为 i_{pj} 和 i_{nj} , U_d 为直流电压, I_d 为直流电流。功率由 MMC1 向传输 MMC2 传输。

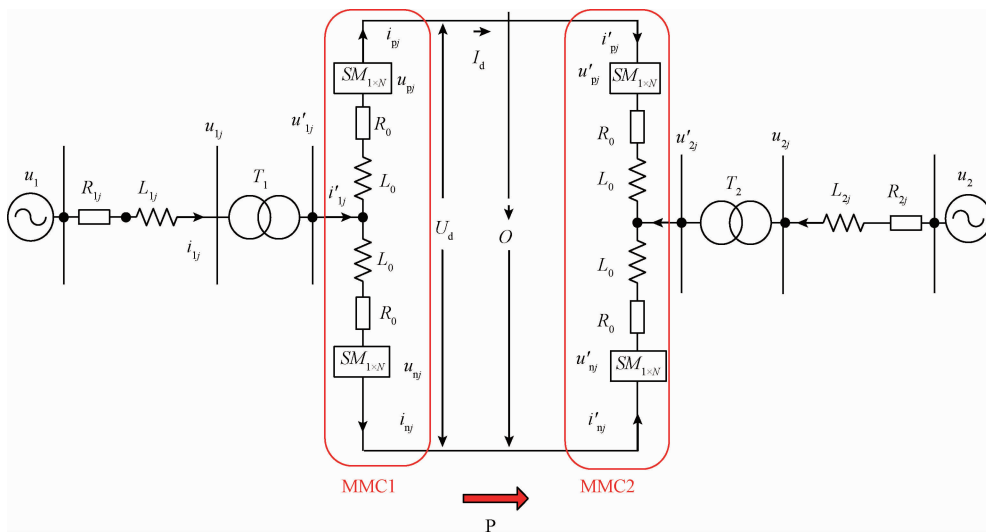


图1 双端 MMC 系统的等效电路

Fig.1 2-terminal MMC-HVDC system

如图 1 所示,根据 Kirchhoff 电流定律可得:

$$i'_{lj} = i_{pj} + i_{nj} \quad j = A, B, C \quad (1)$$

忽略 R_0 上的直流压降 (R_0 一般为较小的值),对 j 相上、下桥臂分别应用 Kirchhoff 电压定律,可得:

$$u'_{lj} - \left(\frac{U_d}{2} - u_{pj} \right) = L_0 \frac{di_{pj}}{dt} \quad (2)$$

$$u'_{lj} - \left(-\frac{U_d}{2} + u_{nj} \right) = L_0 \frac{di_{nj}}{dt} \quad (3)$$

将式(2)和(3)相加再除以 2 可得:

$$u'_{lj} - \frac{u_{nj} - u_{pj}}{2} = L_0 \frac{di'_{lj}}{dt} \quad (4)$$

式(4)描述了换流站交流侧的动态特性。将式(2)

减去式(3)可得:

$$U_d = (u_{pj} + u_{nj}) - L_0 \frac{d(i_{pj} - i_{nj})}{dt} \tag{5}$$

根据 Kirchhoff 电流定律可得直流侧电流:

$$I_d = \sum_{j=A,B,C} i_{pj} \tag{6}$$

式(5)和(6)描述了换流站直流侧的动态特性。以上根据 Kirchhoff 定律得到了 MMC 换流站的动态数学模型不仅适用于正常状态,而且适用于电网暂态故障状态^[9]。

根据式(1)~(6)可知,当 MMC-HVDC 系统交流输电线路发生暂态故障时,由于网侧 $u_{ij}, i_{ij} (j = A, B, C)$ 发生变化,导致 u'_{ij}, i'_{ij} 的幅值和相角改变, $u_{pj}, u_{nj}, i_{pj}, i_{nj}$ 也随之改变,进而引起 I_d, U_d 改变。由于 I_d, U_d 的改变, MMC2 内各电气信息也随之发生改变。基于上述分析可知,当 MMC-HVDC 系统整流侧交流输电线路发生暂态故障时,不但会对整流侧 MMC1 产生影响,也会通过母线将故障扰动传递到逆变侧 MMC2。

1.2 交流暂态故障对换流站运行的影响机理

根据 1.1 节的分析可知,当输电线路发生暂态故障或扰动时,会对双端 MMC 换流站的上、下桥臂及直流母线的电流、电压产生影响。但由于系统阻尼和 MMC 环流抑制及保护策略等因素的作用,直接根据其电流、电压的时域信号的变化对 MMC-HVDC 系统的运行状态进行评判存在较大的困难。以网侧 AB 相接地短路故障、阀侧 AB 相短路为例,利用双端 31 电平柔性直流输电系统实际运行的波形图进行说明。故障发生在 1 s,持续时间为 0.01 s。得到 MMC 换流站上桥臂电流信号,如图 2、3 所示。

通过对比图 2、3 对可知,网侧 AB 相接地短路和阀侧 AB 相短路故障对应桥臂电流的波形相近(其他相桥臂电流、电压类似),无法根据其波形直接进行 MMC-HVDC 系统的运行状态进行评判。

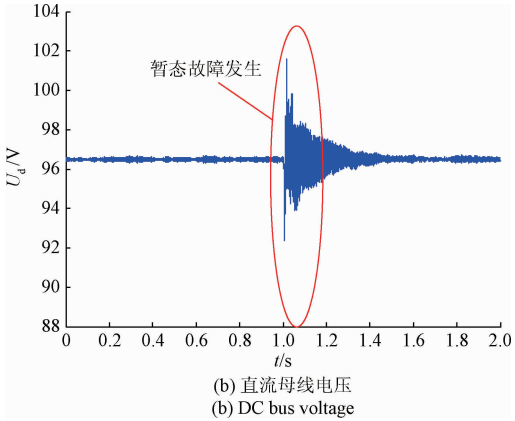
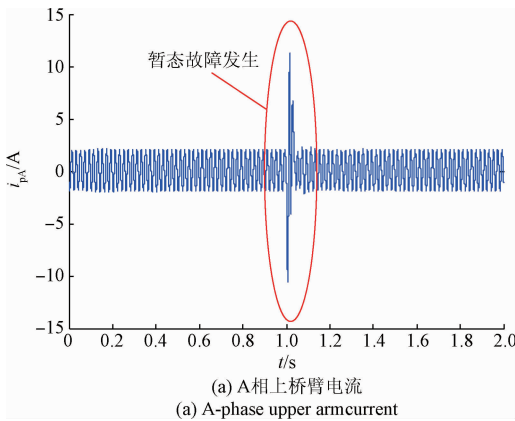


图 2 网侧 AB 相接地短路故障
Fig. 2 AB-phase grounded short circuit fault in grid side

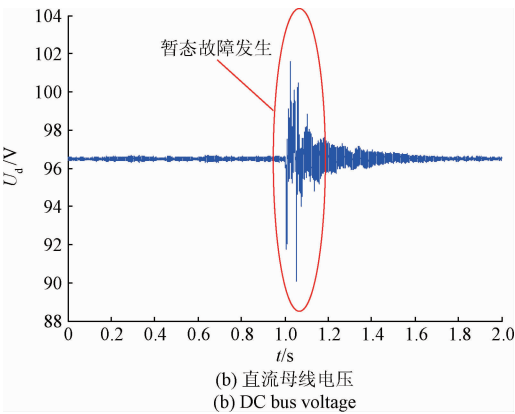
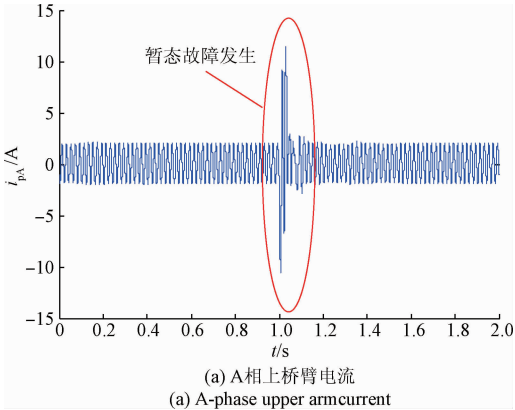


图 3 阀侧 AB 相接地短路
Fig. 3 AB-phase short circuit fault in valve side

1.3 交流暂态故障特征提取

根据 1.2 节电气信号时域的分析结果,考虑到 MMC-HVDC 系统内阻尼对暂态故障能量传递的抑制作用,对向站桥臂及阀侧电压、电流具有变化无规律、频率复杂且能量等级低的特点,传统的特征提取方法无法满足其精

度的要求^[10-13]。这里提出 Renyi 小波包能量熵^[14] (Renyi wavelet packet energy entropy, RWPEE)对两种短路故障的 A 相上桥臂电流信号和直流母线电压信号进行暂态故障特征提取,如图 4、5 所示。

通过对比图 4、5 可知,网侧 AB 相接地短路故障的 A 相上桥臂电流 RWPEE 的熵值大于阀侧 AB 相短路故障的 A 相上桥臂电流 RWPEE 的熵值,但网侧 AB 相接地短

路故障的直流母线 RWPEE 的熵值要小于阀侧 AB 相短路故障的 A 相上桥臂电流 RWPEE 的熵值。虽然 RWPEE 能够很好的表征 MMC 换流站内各电气量的变化,但单纯依靠某一电气量的变化无法直接判断 MMC-HVDC 系统的运行状态,需将 MMC 换流站内所有电气量进行熵统计计算,并将计算后的结果综合在一起对 MMC-HVDC 系统的运行状态进行评判。

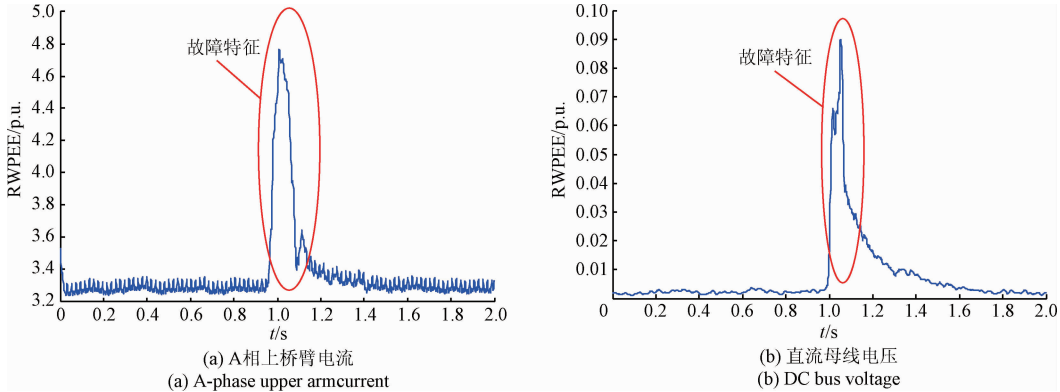


图 4 网侧 AB 相接地短路故障的 RWPEE
Fig. 4 RPWEE of AB-phase grounded short circuit fault in grid side

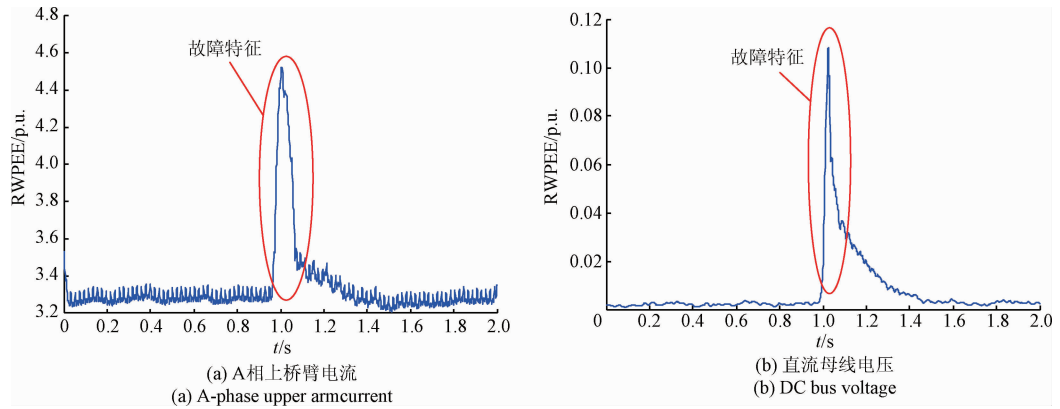


图 5 阀侧 AB 相短路故障的 RWPEE
Fig. 5 RWPEE of AB-phase short circuit fault in valve side

2 基于 Renyi 熵权-灰色关联分析的评判方法

2.1 特征数据预处理与指标集的构造

基于 1.3 节的分析可知,与原始时域信号相比,信号的 RWPEE 能够更好地反映暂态故障对 MMC 换流站各电气信息的影响程度,所以本文利用 RWPEE 对换流站内信息(MMC1、MMC2 各相桥臂和 T₂ 阀侧的电压、电流等)进行暂态特征提取,并将暂态特征提取的结果利用式(7)进行计算。

$$x_{i'} = \frac{a_{1i'}}{a_{2i'}} \tag{7}$$

式中: $a_{1i'} = \int_{t_b}^{t_{b+1}} W_{RWPEE} dt$,表示在暂态故障发生的时间范围为 $[t_b, t_{b+1}]$ 的 RWPEE 的积分, $a'_{2i} = (\sum_{c=1}^{b-1} \int_{t_c}^{t_{c+1}} W_{RWPEE} dt + \sum_{c=b+1}^d \int_{t_c}^{t_{c+1}} W_{RWPEE} dt)/(d-1)$, $t_{b+1} - t_b = t_{c+1} - t_c$,表示在未发生暂态故障时,时间范围为 $[0, t_b]$ 和 $[t_{b+1}, t_d]$ 的 RWPEE 的积分的平均值。由此可得到 32 个指标,如表 1 所示。利用此方法获得的指标,更加直观地反映系统受暂态故障的影响。

表 1 指标集及代表含义
Table 1 Definition of index set

指标	代表含义
x_1	直流母线电流 RWPEE 熵值的比值
x_2	直流母线电压 RWPEE 熵值的比值
$x_{i'jp} (i' = 3, 4, 5, j = A, B, C)$	MMC1 侧 j 相上桥臂电流 RWPEE 熵值的比值
$x_{i'jn} (i' = 6, 7, 8, j = A, B, C)$	MMC1 侧 j 相下桥臂电流 RWPEE 熵值的比值
$x_{i'jp} (i' = 9, 10, 11, j = A, B, C)$	MMC1 侧 j 相上桥臂电压 RWPEE 熵值的比值
$x_{i'jn} (i' = 12, 13, 14, j = A, B, C)$	MMC1 侧 j 相下桥臂电压 RWPEE 熵值的比值
$x_{i'jp} (i' = 15, 16, 17, j = A, B, C)$	MMC2 侧 j 相上桥臂电流 RWPEE 熵值的比值
$x_{i'jn} (i' = 18, 19, 20, j = A, B, C)$	MMC2 侧 j 相下桥臂电流 RWPEE 熵值的比值
$x_{i'jp} (i' = 21, 22, 23, j = A, B, C)$	MMC2 侧 j 相上桥臂电压 RWPEE 熵值的比值
$x_{i'jn} (i' = 24, 25, 26, j = A, B, C)$	MMC2 侧 j 相下桥臂电压 RWPEE 熵值的比值
$x_{i'j} (i' = 27, 28, 29, j = A, B, C)$	T_2 阀侧 j 相电流 RWPEE 熵值的比值
$x_{i'j} (i' = 30, 31, 32, j = A, B, C)$	T_2 阀侧 j 相电压 RWPEE 熵值的比值

2.2 状态评判方法的构造

由于 MMC-HVDC 系统故障发生位置、时刻等方面的不同,对 MMC-HVDC 系统的影响也不尽相同,电气信息繁杂且运行信息不完全明确^[14],为了提高 MMC-HVDC 系统状态评判的准确性,将 Renyi 熵权和灰色关联分析结合,实现对 MMC-HVDC 的状态评判。其具体步骤如下:

1) 指标数据的归一化

设共有 n 种暂态扰动参与评判,评判指标数量为 m 个, $x_{ij'}$ 为第 i' 个暂态扰动的第 j' 个指标,根据如下原则进行指标参数归一化。

对于指标数值与运行状态成正比的指标 i' 对应参数按照式(8)进行归一化。

$$y_{ij'} = \frac{x_{ij'} - \min(x_{ij'})}{\max(x_{ij'}) - \min(x_{ij'})} \tag{8}$$

对于指标数值与运行状态成反比的指标 i' 对应参数按照式(9)进行归一化。

$$y_{ij'} = \frac{\max(x_{ij'}) - x_{ij'}}{\max(x_{ij'}) - \min(x_{ij'})} \tag{9}$$

继而组成规范指标矩阵 $Y = [Y_1, Y_2, \cdots, Y_m]$,其中相量 $Y_{j'=1, \cdots, m} = \{y_{ij'} | 1 \leq i' \leq n\}$ 。

2) 确定各指标权重

利用式(10)对规范指标矩阵 $Y = [Y_1, Y_2, \cdots, Y_m]$ 进行计算:

$$S(j') = \frac{1}{1 - q} \frac{(\ln \sum_{i'=1}^n p^q(i'))}{\ln n} \tag{10}$$

式中: $p(i') = \frac{y_{ij'}}{\sum_{i'=1}^n y_{ij'}}$, $S(j')$ 表示第 j' 个指标的熵值。

3) 各指标权重的归一化

根据式(11)对确定各指标的权重进行归一化。

$$W(j') = \frac{S(j')}{\sum_{j'=1}^m S(j')} \tag{11}$$

式中: $W = [W(1), W(2), \cdots, W(m)]$ 。

4) 关联系数的确定

令未发生暂态扰动 $Y_0 = [y_{01}, y_{02}, \cdots, y_{0m}]$ 为理想方案, $y_{0j'}$ 与 $y_{ij'}$ 的关联系数为:

$$\theta_{ij'} = \frac{\Delta \min + \eta \Delta \max}{\Delta_{ij'} + \eta \Delta \max} \tag{12}$$

式中: $i' = 1, 2, \cdots, n$; $\Delta \min = \min_i [\min_j (|y_{0j'} - y_{ij'}|)]$; $\Delta \max = \max_{i'} [\max_j (|y_{0j'} - y_{ij'}|)]$; $\Delta_{ij'} = |y_{0j'} - y_{ij'}|$; η 为分辨系数,取值区间为 $[0, 1]$ 。

5) 加权关联度求解,并归一化

$$\psi = \theta W^T \tag{13}$$

$$\zeta(i') = \frac{\psi(i')}{\sum_{i'=1}^n \psi(i')} \tag{14}$$

式中: $\zeta = [\zeta(1), \zeta(2), \cdots, \zeta(n)]$ 。

6) 根据关联度大小将 ζ 进行排序

将正常运行状态获得的指标数值序列设为理想方案,所以暂态扰动的关联度越大,说明 MMC-HVDC 系统的运行状态与未发生暂态扰动时系统的运行状态越接近,此时暂态扰动对 MMC-HVDC 系统的运行状态影响越小。

3 仿真实验

鉴于第 1、2 节的分析,本文采用双端 MMC-HVDC 数字物理混合实验平台的进行验证,RT-LAB 实时仿真系统如图 6 所示。MMC-HVDC 数字物理混合实验平台各控制、电气模块如图 7、8 所示,其参数如表 2 所示。以网侧 A 相接地短路(F_1)、网侧 AB 相接地短路(F_2)、网侧 ABC

短路(F_3)、网侧 AB 相不接地短路(F_4)、阀侧 A 相接地短路(F_5)、阀侧 AB 相短路(F_6)、阀侧 ABC 短路(F_7)、阀侧 AB 相接地短路(F_8)为例,发生时间为 1 s,持续时间为 0.01 s,采集数据的时间为 2 s,Renyi 熵参数 q 取 0.1。



图 6 RT-LAB 实时仿真系统
Fig. 6 RT-LAB real-time simulation system



图 7 换流器组
Fig. 7 Converter group



图 8 直流输电线路物理模型
Fig. 8 Physic model of DC transmission lines

表 2 MMC-HVDC 数字物理混合实验平台电气参数
Table 2 Parameters of MMC-HVDC numeral physics mix platform

参数	数值
交流系统电压 u_1 、 u_2	380 V
交流系统等效电感 L_{1j} 、 L_{2j}	0.000 17 H/km
交流系统等效电阻 R_{1j} 、 R_{2j}	0.5 Ω /km
变压器变比 $u_{1j}/u_{1j'}$	380 V/190 V
变压器 T_1 、 T_2 容量	2 000 VA
变压器 T_1 、 T_2 接线形式	Y_0d
桥臂等效电感 L_0	16 mH
桥臂等效电阻 R_0	0.001 Ω
桥臂子模块数 N	30

基于 MMC-HVDC 系统 MMC 内采集到的电压、电流信号按照 2.1 节的特征数据预处理方法进行运算,得到 8 种暂态故障的对应指标数据矩阵 $X_{8 \times 32}$ 。采用提出的评判方法对 MMC-HVDC 运行状态的进行评判。首先利用步骤一进行指标数值归一化可得到 $Y = [Y_1, Y_2, \dots, Y_m]$,归一化后的数据如图 9 所示。

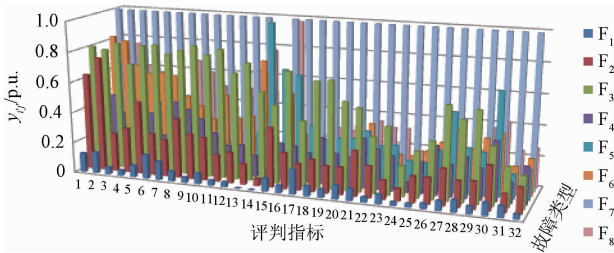


图 9 各指标被归一化后的数值
Fig. 9 Normalized indexes

根据步骤 2)~4)确定各指标权重 W ,然后将未发生暂态扰动设为理想状态, $\eta = 0.5^{[15]}$,根据式(12)确定关联系数矩阵 θ 。再利用步骤 5)可得到 $\xi = [0.232\ 5, 0.142\ 0, 0.081\ 7, 0.137\ 2, 0.119\ 9, 0.130\ 1, 0.050\ 3, 0.106\ 2]$,如图 10 所示。

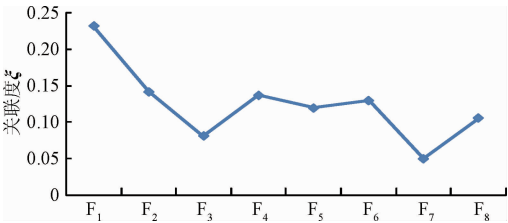


图 10 各暂态故障的关联度
Fig. 10 Correlation of all transient faults

最后将关联度 ξ 进行排序。通过分析 ξ 发现, F_1 的关联度最大,而后关联度按照 F_2 、 F_4 、 F_6 、 F_5 、 F_8 、 F_3 的顺序依次降低, F_7 的关联度最小。所以 F_7 对 MMC 的运行状态影响最严重, F_3 、 F_8 、 F_5 、 F_6 、 F_4 、 F_2 对 MMC 的运行状态影响其次, F_1 对 MMC-HVDC 系统的运行状态影响最小。

为了验证提出评判方法的有效性,采用本文的原评判指标和数据矩阵 $X_{8 \times 32}$,利用 Shannon 熵权法、反熵权法和熵权模糊综合评判法对 MMC-HVDC 系统的运行状态进行评判,其评判结果如表 3 所示。

表 3 各暂态故障对 MMC-HVDC 系统运行状态影响排序

Table 3 Evaluation results of operating state for MMC-HVDC system under AC transient faults

排序	Renyi 熵权-灰色关联分析评判法	Shannon 熵权法	反熵权法	熵权模糊综合评判法
1	F ₁	F ₁	F ₁	F ₁
2	F ₂	F ₂	F ₂	F ₂
3	F ₄	F ₄	F ₄	F ₄
4	F ₆	F ₅	F ₅	F ₆
5	F ₅	F ₆	F ₆	F ₅
6	F ₈	F ₈	F ₈	F ₈
7	F ₃	F ₃	F ₃	F ₃
8	F ₇	F ₇	F ₇	F ₇

通过分析表 3 可知,本文提出的评判方法的评判结果与熵权模糊综合评判法的评判结果一致。对于 F₁、F₂、F₃、F₄、F₇、F₈,Shannon 熵权法和反熵权法的评判结果与本文提出的评判方法的评判结果一致。但对于 F₅、F₆ 的排序与本文所提方法相反。通过对比 F₅ 和 F₆ 的 MMC 换流站内各电气量发现(以直流母线电压为例,如图 11 所示),阀侧 A 相接地短路对 MMC-HVDC 系统运行状态的影响程度要大于阀侧 AB 相短路对 MMC-HVDC 系统运行状态的影响程度。所以 Shannon 熵权法和反熵权法对 F₅ 和 F₆ 的评判有误,而本文提出的方法能有效地对 MMC-HVDC 系统的运行状态进行评判。

通过分析上述各评判方法的判断结果可知,Shannon 熵权法和反熵权法在小样本无规律指标的评价问题中,准确性低。而本文提出的方法排除主观权重的影响,对小样本无规律指标的评价问题决策准确性较高。此外,由于本文的判断结果与熵权模糊综合评判法的评判结果一致,说明本文所提出方法的有效性。

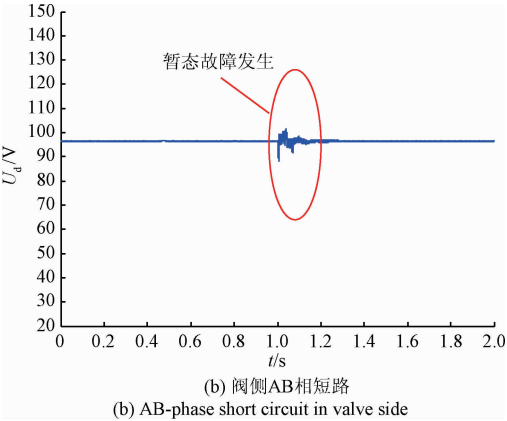


图 11 直流母线电压

Fig. 11 DC bus voltages

4 结 论

本文研究了双端 MMC-HVDC 系统交流暂态故障的故障机理,分析了暂态故障时各电气信息的特点,构建出一种新的暂态故障特征提取方法,并基于特征提取结果构造了指标集,继而提出了交流暂态故障对系统运行影响程度的评判方法,最终得到如下结论。

- 1)不同的交流暂态故障会对 MMC-HVDC 系统的运行状态产生不同的影响。单纯利用对站内各电气信号的时域分析结果无法实现对 MMC-HVDC 系统的运行状态的评判。
- 2)基于小波包频域分辨率高的特点,结合 Renyi 熵对小概率事件灵活的统计特性,利用 Renyi 小波包能量熵获得换流站电气信号特征数据,能从宏观的角度对小概率的暂态扰动引发的特征变化实现熵统计。
- 3)本文提出的评判方法能够将 MMC-HVDC 系统中众多、繁杂的电气量有机的融合在一起,提高了 MMC-HVDC 系统的运行状态评判的精度。

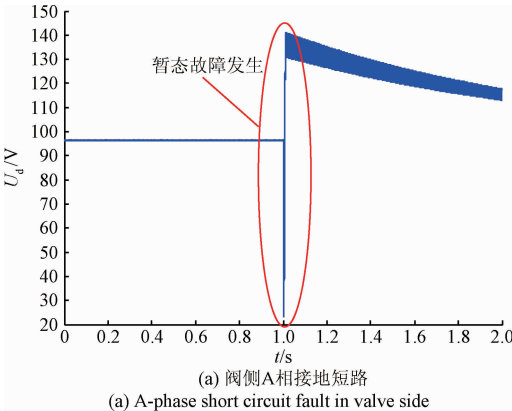
参考文献

[1] 刘波峰,候维杨,李诚明. MMC 子模块电容电压检测新方法 [J]. 电子测量与仪器学报, 2017, 31 (7): 1137-1143.

LIU B F, HOU W Y, LI CH M. New sub-module voltage measuring technique in modular multilevel converter [J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2017, 31(7): 1137-1143.

[2] 秦海鸿,赵海伟,马策宇,等. 基于模块化多电平变换器的静止同步补偿器桥臂不对称及其控制策略 [J]. 电工技术学报, 2016, 31 (14): 183-192.

QIN H H, ZHAO H W, MA C Y, et al. Asymmetric bridge arm of static synchronous compensator based on modular multilevel converter and its control strategy [J].



- Transactions of China Electrotechnical Society, 2016, 31(14):183-192.
- [3] 杨海倩,王玮,荆龙,等. MMC-HVDC 系统直流侧故障暂态特性分析[J]. 电网技术,2016,40(1):40-46.
YANG H Q, WANG W, JING L, et al. Analysis on transient characteristic of DC transmission line fault in MMC based HVDC transmission system [J]. Power System Technology, 2016, 40(1):40-46.
- [4] 裴鹏,章姝俊,黄晓明,等. MMC-HVDC 系统中阀侧交流母线故障保护策略研究[J]. 电力系统保护与控制, 2014, 42(19):150-154.
QIU P, ZHANG SH J, HUANG X M, et al. Research on the protection strategies of internal AC bus fault based on MMC-HVDC[J]. Power System Protection and Control, 2014, 42(19):150-154.
- [5] 康润生,张锐. 模块化多电平逆变器的仿真分析[J]. 电子测量技术,2016,39(3):23-28.
KANG R SH, ZHANG R. The simulation analysis of modular multilevel inverter [J]. Electronic Measurement Technology, 2016, 39(3):23-28.
- [6] TU Q, XU Z. Impact of sampling frequency on harmonic distortion for modular multilevel converter [J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2011, 26(1):298-306.
- [7] 谢松,邹阳,蔡金锭. 基于模糊粗糙集的变压器油纸绝缘状态评估黄云程[J]. 仪器仪表学报,2017,38(1):190-197.
XIE S, ZOU Y, CAI J D. Assessment of transformer oil-paper insulation status with fuzzy rough set [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2017, 38(1):190-197.
- [8] 林彬,宋东,和麟. 基于马氏距离与组距估计的复杂系统健康评估[J]. 仪器仪表学报,2016,37(9):2022-2028.
LIN B, SONG D, HE L. Complex system health assessment based on Mahalanobis distance and bin-width estimation technique[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2016, 37(9):2022-2028.
- [9] GUAN M Y, XU Z. Modeling and control of a modular multilevel converter-based HVDC system under unbalanced grid conditions[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2012, 27(12):4858-4867.
- [10] 孙抗,郭景蝶,马星河. 高压电缆局部放电小波包-峰度法在线检测与定位[J]. 电子测量与仪器学报,2017, 31(7):1099-1106.
SUN K, GUO J D, MA X H. On line partial discharge detection and localization based on the wavelet packet-kurtosis[J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2017, 31(7):1099-1106.
- [11] 孙萍萍. 基于小波包理论的激波信号去噪研究[J]. 国外电子测量技术,2016,35(7):38-42.
SUN P P. Denoising of shock signal based on wavelet packet theory[J]. Foreign Electronic Measurement Technology, 2016, 35(7):38-42.
- [12] SHI W R, JIANG Y S, ZHAO Y. Backbone formulation algorithm in wireless sensor network based on cross-entropy method[J]. Instrumentation, 2014 1(1):3-13.
- [13] CHEN J K, DOU Y H, WANG Z H, et al. A novel method for PD feature extraction of power cable with Renyi entropy[J]. Entropy, 2015, 17(11):7698-7712.
- [14] CHEN J K, DOU Y H, LI Y, et al. A transient fault recognition method for an AC-DC hybrid transmission system based on MMC information fusion[J]. Energies, 2017, 10(23):1-20.
- [15] 黄云程,蔡金锭. 融合改进层次分析与灰色关联法评估油纸绝缘状态[J]. 仪器仪表学报,2015,36(9):2083-2090.
HUANG Y CH, CAI J D. Fusing improved analytic hierarchy process and grey correlation method to evaluate oil paper insulation condition[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2015, 36(9):2083-2090.

作者简介



陈继开(通讯作者),2000 年于陕西科技大学获得学士学位,2007 年于兰州理工大学获得硕士学位,2011 年于哈尔滨工业大学获得博士学位,现为东北电力大学副教授,主要研究方向为柔性直流输电关键技术、电能质量分析与控制。

E-mail:chenjikai@neepu.edu.cn。

Chen Jikai (Corresponding author) received his B. Sc. degree from Shaanxi University of Science & Technology in 2000, received his M. Sc. degree from Lanzhou University of Technology in 2007, and received his Ph. D. degree from Harbin Institute of Technology in 2011. Now he is an associate professor and master student supervisor in Northeast Electric Power University. His main research interests include Power quality analysis and control, and MMC-HVDC.