

励磁涌流对高压直流输电系统换相失败的影响机理及评估方法

饶宇飞¹, 张鹏辉², 李程昊¹, 田春笋¹, 方舟¹, 焦在滨²

(1. 国网河南省电力公司电力科学研究院, 河南 郑州 450052;
2. 陕西省智能电网重点实验室(西安交通大学), 陕西 西安 710049)

摘要: 交流系统中合空载变压器会产生严重的励磁涌流。该励磁涌流的注入, 在导致逆变器交流母线电压发生畸变的同时, 也会引起基波电压的变化, 这必然会对逆变器的换相过程产生影响。目前的研究主要集中在基波电压下降造成的换相失败, 对于电压畸变引起的换相失败的研究较少。从换相电压对时间的面积角度阐述了电压畸变导致换相失败的机理, 在此基础上提出快速评估励磁涌流是否会造成换相失败的方法, 从而为采取及时有效的措施提供指导, 这对电网的安全稳定运行具有重要的意义。最后, 在 PSCAD/EMTDC 中进行了仿真分析, 验证了所提的评估方法的有效性。

关键词: 高压直流输电; 励磁涌流; 换相失败; 电压畸变; 换相电压对时间的面积

Mechanism and evaluating method for HVDC commutation failure caused by inrush current

RAO Yufei¹, ZHANG Penghui², LI Chenghao¹, TIAN Chunsun¹, FANG Zhou¹, JIAO Zaibin²

(1. Electric Power Research Institute of State Grid Henan Electric Power Company, Zhengzhou 450052, China;
2. Shaanxi Key Laboratory of Smart Grid (Xi'an Jiaotong University), Xi'an 710049, China)

Abstract: Switching on no-load transformer in AC system will generate serious inrush current. The injection of this inrush current will lead to the change of fundamental voltage and voltage distortion at AC bus of inverter, which will inevitable influence the commutation process of the inverter. At present, the research is mainly focused on the commutation failure caused by the change of fundamental voltage, while the study of commutation failure resulted by voltage distortion is less. The mechanism of commutation failure created by voltage distortion is analyzed from a perspective of the commutation voltage time area. On this basis, a quick way to evaluate whether the inrush current will bring about commutation failure or not is proposed. This will provide guidance for taking timely and effective actions, which have great sense of making sure the grid operate safely and stably. Finally, the PSCAD/EMTDC simulation results prove the method of evaluation is effective.

This work is supported by National Natural Science Foundation of China (No. 51377129).

Key words: HVDC; inrush current; commutation failure; voltage distortion; commutation voltage time area

0 引言

随着我国经济的高速发展, 用电需求不断增加。然而, 我国的能源和负荷中心分布不平衡, 需要经过远距离的传输将电能从西部送往东部^[1-2]。相比交流输电而言, 高压直流输电在远距离、大规模传输电能时表现出更好的经济性^[3]。此外, 直流输电还

具有可控性强、输电损耗小等特点。因此, 近年来直流输电发展的如火如荼, 交直流混联电网逐渐形成^[4]。

换相失败是直流系统中的常见的故障, 它会引引起直流电压短时下降和直流电流短时增大, 不利于系统的正常运行。许多情况下一次换相失败可以自动恢复, 但如果发展为连续的换相失败, 就会导致直流系统闭锁^[5-7]。目前对于换相失败的研究主要集中于交流系统故障引起的逆变器交流母线电压降低

而导致的换相失败^[8]。研究的内容^[9]主要是换相失败的产生机理、影响因素、判别方法和处理方式；研究的对象近年来主要发展为多馈入系统^[10-12]和混合多馈入系统^[13]。但是，对由逆变器交流母线电压畸变而造成的换相失败的研究少之又少。文献[14]报道了一次电压畸变导致换相失败的事件，文献[15]指出三广直流的一次换相失败是由电压畸变引起的。文献[16]从换相电压时间面积的角度揭示了基波电压下降造成换相失败的原因；文献[17-18]应用该理论分析了交流母线电压畸变而导致换相失败的机理，并引入了谐波换相系数的概念，定量地表征了各次谐波对换相过程的影响。但是上述的研究都没有给出能够快速评估逆变器的交流母线电压畸变是否会引起换相失败的方法。

导致逆变器交流母线电压畸变的原因有很多，如系统故障、电力电子器件的异常运行等。文献[19]研究了直流偏磁导致的逆变器交流母线电压畸变与换相失败之间的关系，文献[20]分析了我国皖电东送特高压工程系统调试期间，练塘站进行2号主变500 kV侧充电试验时，导致团林-枫泾±500 kV直流工程枫泾换流站的直流换相失败保护动作而闭锁双极换流器的事件。在交流系统中变压器的投切操作是常见的操作，由于变压器铁芯的饱和特性，其在空载合闸的过程中会产生高幅值、不平衡、高谐波的励磁涌流。该谐波在电网中传播时，可能会产生幅值的放大和相位的改变^[21]，最终引起换流器所在的交流母线的电压波形发生畸变，从而导致换相失败。

本文从换相电压对时间的面积的角度阐述了逆变器交流母线电压畸变对换相失败的影响，在此基础上提出了能同时表征交流母线基波电压下降和谐波电压畸变的指标LTHD，并采用优化的方法求得了利用该指标判断是否会发生换相失败的边界值。在PSCAD/EMTDC中搭建了天中直流的仿真模型，然后在河南500 kV网络中的不同位置进行变压器的空载合闸操作，将通过指标计算得到的是否会换相失败的判别结果与实际的仿真结果进行比较，验证了文中所提的评估指标的有效性。

1 谐波对换相过程的影响

在交流系统中进行变压器的空载合闸操作时，必然会产生包含丰富谐波成分的励磁涌流。电网的电压等级越高，变压器的容量越大，励磁涌流越严重。励磁涌流的注入会导致直流系统逆变站所在的交流母线的电压发生畸变的同时基波电压也可能发生变化，逆变器是依靠电网电压换流的，所以励磁

涌流的注入必然会对换相过程产生影响，严重时就会导致换相失败。目前对于基波电压下降影响换相的研究比较完备，因此，研究励磁涌流对换相过程的影响的关键就在于分析逆变器交流母线电压畸变对换相过程的影响。该影响机理的分析也是进一步评估励磁涌流是否会造成换相失败的基础。

1.1 换相过程

现有的高压直流输电工程均采用12脉动换流器。它是由两个6脉动换流器串联组成的，它们分别带有一个变压器，一个是Y-Y连接，一个是Y-Δ连接，因此，其二次侧的交流电压的相位相差30°。其结构如图1所示。当逆变器的交流母线电压已知的情况下，根据替代定理可以将它用理想的电压源来代替。图中， U_{Ya} 、 U_{Yb} 和 U_{Yc} 为经过Y-Y换流变压器变换后的交流侧三相电压， U_{Da} 、 U_{Db} 和 U_{Dc} 为经过Y-Δ换流变压器变换后的交流侧三相电压。 L_c 为换流变压器的等效电感， L_d 代表直流侧的平波电抗。换流桥采用的电力电子器件为晶闸管，晶闸管VT₁到VT₁₂间隔30°按顺序依次导通。

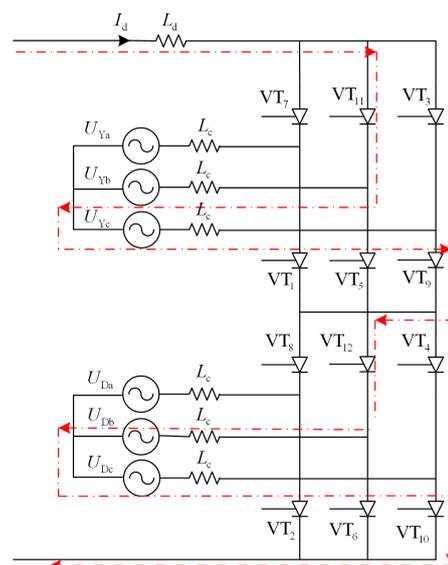


图1 十二脉动换流桥

Fig. 1 Twelve-pulse converter bridge

由于晶闸管为半控型器件。当要开通晶闸管时，除了要让晶闸管承受正向电压外，还要在晶闸管上施加触发脉冲，加触发脉冲的时刻相对自然换相点滞后的时间所对应的电角度就为触发延迟角 α 。当要关断晶闸管时，需要在晶闸管的两端施加反向电压，并且该电压至少要维持一段时间以使得晶闸管恢复反向阻断能力。这段时间所对应的电角度就是熄弧角 γ ，所需的这段时间的最小值对应的电角度就为最小熄弧角 γ_{\min} 。电流从要关断的晶闸管转移

到要开通的晶闸管的过程被称为换相过程，由于换流变压器电感的存在，施加触发脉冲以后换相过程不能瞬时完成，该换相过程所对应的电角度就为换相重叠角 μ 。触发延迟角、换相重叠角和熄弧角满足关系式 $\alpha + \mu + \gamma = \pi$ ，因此，当触发角过大或者换相过程过长都会使得熄弧角减小，当熄弧角小于最小熄弧角，使得待关断的晶闸管没有在承受反向电压的期间恢复阻断能力，它就会在电压反转时重新导通，即发生换相失败。

12 脉动换流器在实际的运行中有不同的运行工况。晶闸管的触发延迟角和换相重叠角的大小决定了换流器处于何种工作状态。对于逆变器而言，由于不存在工况 5，有两种运行工况，即工况 4-5 和工况 5-6。

工况 4-5 是指当 $0 \leq \mu < 30^\circ$ 的同时 $90^\circ + \mu/2 \leq \alpha < 180^\circ$ ，在 30° 的运行周期中，4 个阀和 5 个阀轮流导通的运行方式。即仅可能有一个 6 脉动换流器处于换相的过程中。正常运行时，晶闸管的换相重叠角小于 30° ，所以此工况为常见工况。假设图 1 中换相前 VT_9 、 VT_{10} 、 VT_{11} 和 VT_{12} 导通， VT_9 和 VT_{11} 要完成换相，根据换相过程中直流电流的流电路径可得换相过程的等效电路如图 2 所示。图中， U_L 为另一个换流桥导通的两相的线电压， $2L_c$ 为另一个换流桥的换流变压器在电流回路中的等效电感。

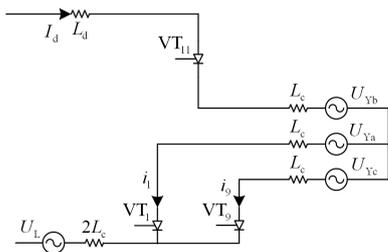


图 2 4-5 工况的换相过程等效电路

Fig. 2 Equivalent circuit of commutation process under 4-5 operating condition

由等效电路可得

$$L_c \frac{di_9}{dt} + U_{Yc} = L_c \frac{di_{11}}{dt} + U_{Ya} \quad (1)$$

$$i_1 + i_9 = I_d \quad (2)$$

式中： i_1 为流过晶闸管 VT_{11} 的电流； i_9 为流过晶闸管 VT_9 的电流； I_d 为要传输的直流电流。

工况 5-6 是指当 $\mu > 30^\circ$ 同时 $90^\circ + \mu/2 < \alpha < 180^\circ$ ，在 30° 的运行周期中，5 个阀和 6 个阀轮流导通的运行方式。只有当换流器过负荷或者交流电压过低时才会出现此类工况。当 5 个阀导通时，只有某一个 6 脉动换流器处于换相的过程中，换相

过程的等效电路与图 2 类似。当 6 个阀导通时，假设 VT_9 和 VT_{11} 要完成换相，同时 VT_2 和 VT_{10} 也处于换相过程，则换相过程的等效电路如图 3 所示。

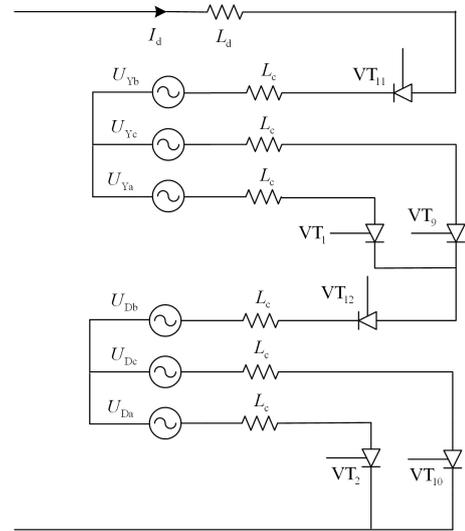


图 3 5-6 工况的换相过程等效电路

Fig. 3 Equivalent circuit of commutation process under 5-6 operating condition

对于每一个 6 脉动换流桥的换相过程所列的方程与(1)、(2)相同。

需要指出的是，由于实际的交流系统并非无穷大电源，存在等值电感 L_s ，所以两个 6 脉动换流桥实际上是通过该等值电感“耦合”在一起的。所以，邻桥的换相对本桥所有未导通的阀的电压产生影响，继而影响阀的换相过程。本文研究的是逆变器交流母线电压已知的情况下，给出快速评估是否会发生换相失败的方法。即逆变器交流母线的电压是可测量的，根据替代定理，可将交流系统视作理想电压源，也可以认为上述某一个 6 脉动换流桥对另一个 6 脉动换流桥的换相电压的影响已经计及在了测量量里面，从而使本文的分析考虑到了桥间的相互影响，使得分析的结果更加符合实际。

本文认为当某一个 6 脉动换流桥发生了换相失败，则整个特高压直流输电系统发生了单极换相失败。所以，本文研究的关键在于判断何时某一个 6 脉动换流桥发生了换相失败。而由上述分析可得，当逆变器交流母线电压可以直接测量的情况下，可以认为邻桥的运行状态不会影响本桥的换相过程的分析。所以，本文将 6 脉动换流桥当作分析换相失败的基本模块。另外，两个 6 脉动换流桥相比，只是电压和触发脉冲同时做了 30° 的移相，所以，可以对任意一个 6 脉动换流桥做分析。因此，下文中将不对电压等物理量在下标上做区分。

由式(1)、式(2)可得

$$U_{ca} = 2L_c \frac{di_d}{dt} \quad (3)$$

对式(3)两端进行积分, 积分的下限为换相开始的时刻 α/ω , 积分的上限为换相结束的时刻 $(\alpha + \mu)/\omega$ 。对于晶闸管 VT1 来说, 换相开始时电流 0, 换相结束时电流为 I_d , 所以

$$I_d = \int_{\alpha/\omega}^{(\alpha+\mu)/\omega} \frac{U_{ca}}{2L_c} dt \quad (4)$$

上式表达的意义为: 换相过程中所需要的换相电压对时间的面积是由所传输的直流电流决定的。

正常情况下, 设线电压 U_{ca} 可以表示为

$$U_{ca} = E_{1N} \sin(\omega t) \quad (5)$$

式中, E_{1N} 为交流系统额定状态下线电压的幅值。将式(5)代入式(4)可得熄弧角的表示为

$$\gamma = \arccos\left(\frac{2I_d \omega L_c}{E_{1N}} + \cos\beta\right) \quad (6)$$

当一个 6 脉动换流器发生较长时间的换相失败, 甚至是持续换相失败时, 会导致传输的直流电流增大。由式(6)可得, 直流电流的增加导致另一个换流桥的熄弧角减小, 严重时会产生换相失败。也就是说, 在 12 脉动换流器中, 一个换流桥换相失败后会对另外一个换流桥的换相过程产生影响。本文不对某一 6 脉动换流桥换相失败后的后续影响进行深入分析, 而把重点放在评估交流母线的电压畸变达到何种程度时会导致某一 6 脉动换流器发生换相失败。

1.2 谐波对换相过程的影响

对于基波电压下降导致的换相失败的研究较多, 文献[13]从换相电压时间面积的角度解释了基波电压下降引起换相失败的机理。同样, 当逆变器所在的交流母线电压发生畸变时, 也可以从换相电压对时间的面积的角度定性分析谐波对换相过程的影响。式(4)右端换相电压对时间的积分可以用图 4 中曲线 U_a 和 $(U_a + U_c)/2$ 所围成的面积来表示, 换相过程所需的该面积的大小由直流电流 I_d 决定。图 4(c)中, 当电压发生畸变时, 由于直流系统的整流侧往往采用定电流控制, 所以在分析时认为所传输的直流电流保持不变, 即换相过程所需的换相电压对时间的面积保持不变。对比图 4(b), 换相电压畸变时换相过程就会延长, 导致熄弧角减小, 当熄弧角小于最小熄弧角时就会换相失败。图 4(a)圆圈内图形的局部放大图见图 4(b)、图 4(c)。

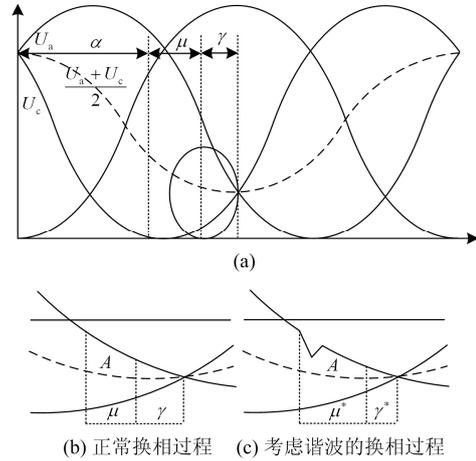


图 4 谐波对换相过程的影响

Fig. 4 Commutation process considering harmonics

为了成功换相, 换相过程必须在 $(\pi - \gamma_{\min})/\omega$ 之前完成, 所以换相电压对时间的面积的最大值为 A_{\max} 。

$$A_{\max} = \int_{\alpha/\omega}^{(\pi - \gamma_{\min})/\omega} \frac{U_{ca}}{2L_c} dt \quad (7)$$

为了保证换相成功, 需要满足: 换相过程所需的电压对时间的面积小于最大值, 即

$$I_d \leq \int_{\alpha/\omega}^{(\pi - \gamma_{\min})/\omega} \frac{U_{ca}}{2L_c} dt \quad (8)$$

当线电压中含有谐波时, 电压 U_{ca} 可以表达为基波和各次谐波电压之和的形式:

$$U_{ca} = U_1 \sin(\omega t) + \sum_{n=2}^N U_n \sin(n\omega t + \varphi_n) \quad (9)$$

将式(9)代入式(8)得到当电压畸变时, 为了换相成功所要满足的条件:

$$I_d \leq \int_{\alpha/\omega}^{(\pi - \gamma_{\min})/\omega} \frac{U_1 \sin(\omega t) + \sum_{n=2}^N U_n \sin(n\omega t + \varphi_n)}{2L_c} dt \quad (10)$$

2 励磁涌流是否会造成交换失败的评估

合空变产生的励磁涌流注入系统后, 会导致逆变器所在的交流母线的基波电压发生变化, 同时产生谐波电压。因此, 对励磁涌流是否会造成交换失败进行评估的关键在于找到评估交流母线电压同时发生畸变和基波电压变化时是否会造成换相失败的方法。本文就提出一种在交流母线的基波电压和各次谐波电压的幅值已知的情况下快速判断是否会发生换相失败的方法。

2.1 励磁涌流的特性

由于变压器铁芯材料的非线性特性和饱和特性，当变压器铁芯的磁通大于饱和磁通时，励磁涌流会随着铁芯磁通的增加而迅速增加。实际工程中的电力变压器在正常工作时，其磁通已接近饱和磁通，因此，当变压器空载合闸投入电网时，会产生严重的励磁涌流，其值可以达到额定电流的6~8倍。

对于三相变压器，因为三相电压存在120°的相位差，所以三相励磁涌流不会相同。某一相的励磁涌流可能不再偏离时间轴的一侧，变为对称性涌流，但其他两相仍为非对称性涌流。励磁涌流的波形是间断的，存在间断角。图5为三相励磁涌流的波形图。

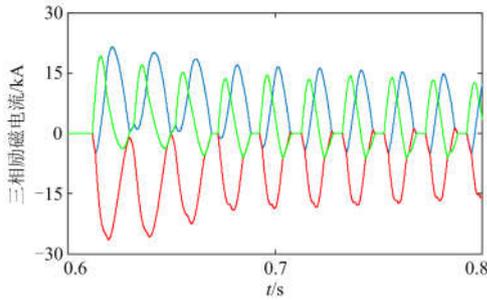


图5 励磁涌流波形图

Fig. 5 Waveform of inrush current

励磁涌流中除了基波分量外，还含有大量的谐波分量。傅里叶分解是将采样窗内的波形进行周期延拓，将其视为周期函数，因此，其分解的结果受数据窗长和数据窗的位置的影响比较大。而最小二乘矩阵束算法是假设信号可以表示为 N 个具有任意幅值、相位、频率和衰减因子的指数函数的线性组合的形式，即

$$x(kT_s) = \sum_{i=1}^N R_i e^{(-\alpha_i + j\omega_i)kT_s} \quad (11)$$

式中： $x(kT_s)$ 为实际信号； R_i 为第 i 个信号的复幅值； α_i 为第 i 个信号的衰减因子； ω_i 为第 i 个信号角频率； T_s 为采样间隔； N 为信号阶数。

由图5可以看出，励磁涌流是非周期的具有衰减特性的暂态信号。而矩阵束算法认为信号可以表示为衰减指数和的形式，这正好与励磁涌流的特点相契合，因此，采用矩阵束算法对励磁涌流的谐波成分进行分析的结果受数据窗长和数据窗的位置的影响较小。图6为采用矩阵束算法得到的三相励磁涌流的幅频特性图。

由图6可以得到励磁涌流中主要含有低次谐波，以2次和3次谐波为主。因此，励磁涌流注入后在逆变器交流母线产生的畸变也以低次谐波为主。

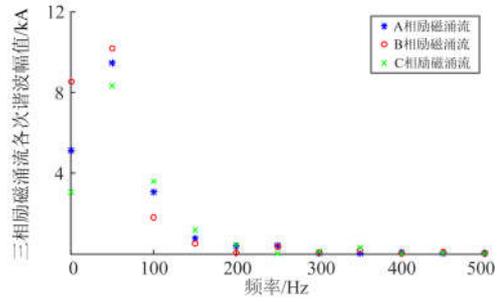


图6 励磁涌流幅频特性

Fig. 6 Amplitude-frequency characteristic of inrush current

2.2 评估指标的提出

总谐波畸变率综合地表征了系统中谐波的含有量。该值的大小可以在一定的程度上体现谐波影响的大小。但是，当励磁涌流注入系统时，不仅会在逆变器交流母线上产生各次谐波电压，还会使得基波电压发生变化，当基波电压下降时也会对换相的过程产生不利的影 响。因此，本文在总谐波畸变率的基础上定义了可以同时表达基波电压下降和谐波畸变的指标 LTHD。

$$LTHD = \sqrt{(U_1 - E_{IN})^2 + \sum_{n=2}^{10} U_n^2} / E_{IN} \quad (12)$$

式中， E_{IN} 为逆变器交流母线电压的额定值。

2.3 评估指标边界的求取

指标 LTHD 大致反映了励磁涌流的注入对逆变器交流母线电压影响的大小，该值越大，说明励磁涌流产生的作用越大，对换相过程的影响越大。所以，为了求取评估指标的边界值，需要寻找在换相成功的前提下该指标的最大值。如果在实际中计算得到的指标值大于最大值，则很可能会造成换相失败。本文采用优化的方法求该最值。

$$\text{目标函数: } \text{MAX} \left(\sqrt{(U_1 - E_{IN})^2 + \sum_{n=2}^{10} U_n^2} / E_{IN} \right)$$

约束条件:

$$I_d \leq \int_{\alpha/\omega}^{(\pi-\gamma_{\text{min}})/\omega} \frac{U_1 \sin(\omega t) + \sum_{n=2}^N U_n \sin(n\omega t + \varphi_n)}{2L_c} dt$$

$$U_{1\text{min}} \leq U_1 \leq E_{IN}$$

$$0 \leq U_n \leq U_{n\text{max}}$$

$$-\pi \leq \varphi_n \leq \pi$$

求取约束条件中基波电压的下限和各次谐波电压的上限。

首先定义换相裕度 M 为：在保证换相成功的前提下，所允许的不利于换相的因素如基波电压下降、谐波电压等的作用效果的最大值。即

$$M = \int_{\alpha/\omega}^{(\pi-\gamma_{\min})/\omega} \frac{E_{1N} \sin(\omega t)}{2L_c} dt - I_d \quad (13)$$

对于各次谐波电压而言, 为了保证换相成功

$$\int_{\alpha/\omega}^{(\pi-\gamma_{\min})/\omega} \frac{U_n \sin(n\omega t + \varphi_n)}{2L_c} dt \leq M$$

得到

$$U_n \leq n\omega L_c M / \sin\left(\frac{n(\pi - \alpha - \gamma_{\min})}{2}\right)$$

所以

$$U_{n\max} = n\omega L_c M / \sin\left(\frac{n(\pi - \alpha - \gamma_{\min})}{2}\right) \quad (14)$$

对于基波电压而言, 为了保证换相成功

$$\int_{\alpha/\omega}^{(\pi-\gamma_{\min})/\omega} \frac{U_{1\min} \sin(\omega t)}{2L_c} dt = I_d$$

得到

$$U_{1\min} = \frac{2I_d \omega L_c}{\cos \alpha - \cos(\pi - \gamma_{\min})} \quad (15)$$

3 评估方法有效性的验证

指标 LTHD 的提出给了快速评估励磁涌流是否会造成换相失败的方法。接下来通过在 PSCAD/EMTDC 中搭建天中直流的仿真模型, 在交流电网的不同位置进行空载合闸操作, 计算指标值, 判断是否会换相失败, 并与实际仿真结果比较来验证本文的评估方法的有效性。

3.1 仿真模型

本文采用天中直流的仿真模型。交流系统为河南 500 kV 网络, 直流系统是额定电压为 ± 800 kV, 额定电流为 3.125 kA, 双极功率为 5 GW 的单极双十二脉动的特高压输电线路。模型的示意图如图 7 所示。对于每一个三相全波桥式电路, 额定状态下其基本参数为: 触发延迟角 $\alpha = 140^\circ$, 最小熄弧角 $\gamma_{\min} = 12^\circ$, 换流变压器的等效漏抗 $\omega L_c = 6.93 \Omega$,

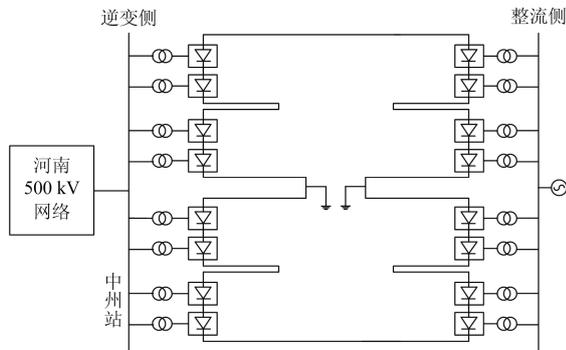


图 7 天中直流示意图

Fig. 7 Diagram of Tianshan-Zhongzhou DC project

线电压的幅值为 $E_{1N} = 165.59\sqrt{2}$ kV, 流过的直流电流 $I_d = 3.125$ kA。

由上述的参数计算可得约束条件中基波电压的下限和各次谐波电压的上限(计算中只保留 10 次以内的谐波)如表 1 所示。

表 1 基波电压下限和各次谐波电压上限

Table 1 Minimum fundamental voltage and maximum harmonic voltages

谐波次数	各次电压上下限幅值/kV
1	202.51
2	14.67
3	15.44
4	16.62
5	18.34
6	20.81
7	24.40
8	29.84
9	38.56
10	54.11

在 Matlab 中求得优化的结果为: 0.367。

3.2 仿真结果

在河南 500 kV 系统的不同位置进行空载合闸操作, 测量逆变器所在的交流母线的电压, 傅里叶分解后计算指标值, 判断是否会发生换相失败, 将判断的结果与仿真的结果进行对比。

具体地, 如在嵩山站于 0.610 5 s(此时励磁涌流最为严重)进行空载合闸操作, 逆变器交流母线(中州站)的电压波形如图 8 所示。

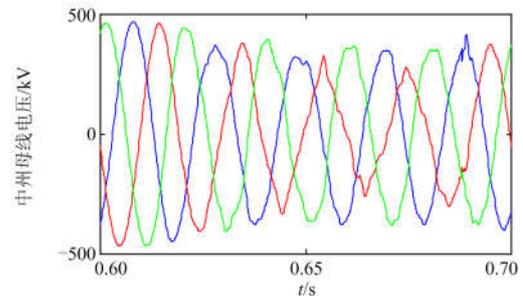


图 8 逆变器交流母线电压

Fig. 8 Voltage of AC bus of inverter

对畸变情况最为严重的一相的电压于 0.65~0.69 s 分析其谐波成分, 计算得到指标为 0.467, 判断为会发生换相失败, 而实际的仿真结果如图 9 所示, 也判断为发生了换相失败。

模型中的换相失败模块检测对应阀组的最小熄弧角, 当熄弧角降低至零时, 换相失败模块出现一个上升沿, 表示该阀组发生了换相失败。

另外, 也可以通过观察换流变压器的阀侧电流

来判断是否发生了换相失败。此时，换流变压器的阀侧电流的波形如图 10 所示。

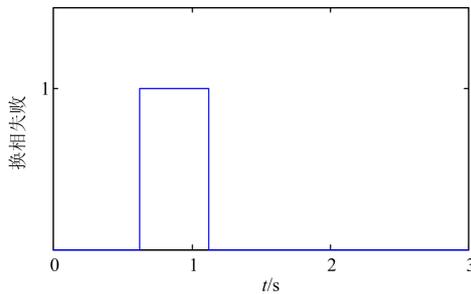


图 9 换相失败模块动作情况

Fig. 9 Operation of commutation failure module

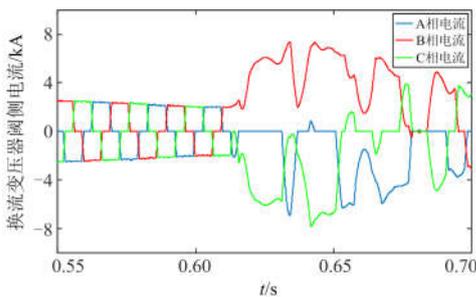


图 10 换流变压器阀侧电流波形图

Fig. 10 Current waveform of valve side of converter transformer

由换流变压器的阀侧电流的波形图可以看出，在合闸以前换流桥正常换相，在进行变压器的空载合闸以后，B 相电流一直为正，说明共阳极组中与 B 相相连的晶闸管持续导通，同理 A 相和 C 相的电流一直为负，说明共阴极组中分别与 A 相和 C 相相连的晶闸管持续导通，没有正常地完成换相，即发生了换相失败。通过观察换流变压器的阀侧电流得到的是否会换相失败的结果与换相失败模块的判断结果相同。

同理可得到在其他位置进行变压器的空载合闸操作时的指标计算值和仿真结果，如表 2 所示。

表 2 仿真和指标计算结果

Table 2 Results of simulation and calculation of index

合空变的位置	指标值	是否发生换相失败判断结果	是否发生换相失败仿真结果
嵩山	0.47	是	是
绿城	0.18	否	否
马寺	0.18	否	否
郑州	0.42	是	是
庄周	0.44	是	是
官渡	0.47	是	是
武周	0.20	否	否
圣临	0.17	否	否
开封	0.40	是	是
丰鹤	0.15	否	否

计算结果与仿真的结果基本一致，验证了本文采用指标 LTHD 进行评估的有效性。

4 结论

随着高压直流输电的快速发展，交直流混联电网逐渐形成。变压器的空载合闸操作是交流电网中的常见工况，该操作会伴随严重的励磁涌流，而换相失败是直流系统的常见故障。因此，需要从电网的需求出发，研究励磁涌流对换相过程的影响机理，在此基础上提出快速地评估励磁涌流是否会造成换相失败的方法，从而为采取及时有效的措施提供指导，保障电网的安全稳定运行。

励磁涌流对换相过程的影响主要表现在励磁涌流不仅会导致逆变器交流母线的电压发生畸变，还会引起基波电压发生变化。本文首先从换相电压对时间的面积的角度阐述了逆变器交流母线的谐波电压对换相过程的影响机理，在此基础上提出了可以综合表征励磁涌流对换相过程影响程度大小的指标 LTHD。然后，采用优化的方法求得了在保证换相成功的前提下该指标的最大值，从而得到判断励磁涌流是否会造成换相失败的阈值。

在 PSCAD/EMTDC 中搭建了天中直流的仿真模型。在交流电网的不同位置进行空载合闸操作，将通过指标计算得到的判断结果与实际的仿真结果对比，验证了本文所提的评估方法的有效性。

参考文献

- [1] 王少辉, 唐飞, 向农. 华东电网多直流同时换相失败仿真分析[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(12): 16-21.
WANG Shaohui, TANG Fei, XIANG Nong. Commutation failure simulation analysis of East China power grid multiple HVDC lines[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(12): 16-21.
- [2] 王轩, 魏宏, 欧朱建, 等. 一种抑制 HVDC 换相失败的 STATCOM 补偿方案[J]. 电力系统保护与控制, 2018, 46(5): 135-142.
WANG Xuan, WEI Hong, OU Zhujian, et al. A STATCOM compensation scheme for suppressing commutation failure in HVDC system[J]. Power System Protection and Control, 2018, 46(5): 135-142.
- [3] RAHMAN M H, XU L, YAO L Z. Protection of large partitioned MTDC networks using DC-DC converters and circuit breakers[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2016, 1(1): 170-178. DOI: 10.1186/s41601-016-0030-0.
- [4] 温家良, 吴锐, 彭畅, 等. 直流电网在中国的应用前景分析[J]. 中国电机工程学报, 2012, 32(13): 7-12.
WEN Jialiang, WU Rui, PENG Chang, et al. Analysis of DC grid prospects in China[J]. Proceedings of the CSEE, 2012, 32(13): 7-12.

- [5] 李新年, 易俊, 李柏青, 等. 直流输电系统换相失败仿真分析及运行情况统计[J]. 电网技术, 2012, 36(6): 266-271.
LI Xinnian, YI Jun, LI Baiqing, et al. Simulation analysis and operation statistics of commutation failure in HVDC transmission system[J]. Power System Technology, 2012, 36(6): 266-271.
- [6] 王钢, 李志铿, 黄敏, 等. HVDC 输电系统换相失败的故障合闸角影响机理[J]. 电力系统自动化, 2010, 34(4): 49-54.
WANG Gang, LI Zhikeng, HUANG Min, et al. Influence of initial fault voltage angle on commutation failure identification in a HVDC system[J]. Automation of Electric Power Systems, 2010, 34(4): 49-54.
- [7] 许朋见, 黄金海, 许静静, 等. 宾金特高压直流换相失败保护的研究[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(2): 140-146.
XU Pengjian, HUANG Jinhai, XU Jingjing, et al. Study of Bin-Jin UHVDC project commutation failures protection[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(2): 140-146.
- [8] THIO C V, DAVIES J B, KENT K L. Commutation failures in HVDC transmission systems[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 1996, 11(2): 946-957.
- [9] 袁阳, 卫志农, 雷霄, 等. 直流输电系统换相失败研究综述[J]. 电力自动化设备, 2013, 33(11): 140-147.
YUAN Yang, WEI Zhinong, LEI Xiao, et al. Survey of commutation failures in DC transmission systems[J]. Electric Power Automation Equipment, 2013, 33(11): 140-147.
- [10] 邵瑶, 汤涌. 采用多馈入交互作用因子判断高压直流输电系统换相失败的方法[J]. 中国电机工程学报, 2012, 32(4): 108-115.
SHAO Yao, TANG Yong. A commutation failure detection method for HVDC systems based on multi-infeed interaction factors[J]. Proceedings of the CSEE, 2012, 32(4): 108-115.
- [11] 肖浩, 朱佳, 李银红, 等. 多馈入直流系统换相失败免疫水平快速确定方法研究[J]. 中国电机工程学报, 2015, 35(11): 2711-2717.
XIAO Hao, ZHU Jia, LI Yinhong, et al. Study on rapid determination method of commutation failure immunity levels for multi-infeed HVDC transmission systems[J]. Proceedings of the CSEE, 2015, 35(11): 2711-2717.
- [12] 邵瑶, 汤涌. 多馈入交直流混合电力系统研究综述[J]. 电网技术, 2009, 33(17): 24-30.
SHAO Yao, TANG Yong. Research survey on multi-infeed AC/DC hybrid power systems[J]. Power System Technology, 2009, 33(17): 24-30.
- [13] 肖浩, 李银红, 何璇, 等. 混合多馈入直流系统换相失败免疫水平快速评估方法[J]. 中国电机工程学报, 2017, 37(17): 4986-4998.
XIAO Hao, LI Yinhong, HE Xuan, et al. A rapid assessment method of commutation failure immunity level for hybrid multi-infeed HVDC transmission systems[J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(17): 4986-4998.
- [14] 郝跃东, 倪汝冰. HVDC 换相失败影响因素分析[J]. 高电压技术, 2006, 32(9): 38-41.
HAO Yuedong, NI Rubing. Analysis on influence of commutation failure in HVDC[J]. High Voltage Engineering, 2006, 32(9): 38-41.
- [15] 吕鹏飞, 王明新, 徐海军. 三广直流鹅城换流站换相失败原因分析[J]. 继电器, 2005, 33(18): 75-78.
LÜ Pengfei, WANG Mingxin, XU Haijun. Analysis of commutation failure reason in Three Georges-Guangdong HVDC system Echeng station[J]. Relay, 2005, 33(18): 75-78.
- [16] ZHANG Lidong, DOFANS L. A novel method to mitigate commutation failures in HVDC systems[C] // 2002 International Conference on Power System Technology, November, 2002, Kunming, China: 51-56.
- [17] 王峰, 刘天琪, 周胜军, 等. 谐波对 HVDC 系统换相失败的影响机理及定量分析方法[J]. 中国电机工程学报, 2015, 35(19): 4888-4894.
WANG Feng, LIU Tianqi, ZHOU Shengjun, et al. Mechanism and quantitative analysis method for HVDC commutation failure resulting from harmonics[J]. Proceedings of the CSEE, 2015, 35(19): 4888-4894.
- [18] WANG Feng, LIU Tianqi, LI Xingyuan. Decreasing the frequency of HVDC commutation failures caused by harmonics[J]. IET Power Electronics, 2017, 10(2): 215-221.
- [19] 肖楚鹏, 金祖洋, 邱泽晶, 等. 直流偏磁对换相失败的影响机理及定量分析方法[J]. 科学技术与工程, 2016, 36(16): 30-35.
XIAO Chupeng, JIN Zuyang, QIU Zejing, et al. Mechanism and quantitative analysis method for the influence of DC-bias on commutation failure[J]. Science Technology and Engineering, 2016, 36(16): 30-35.
- [20] 梁志峰. 500 kV 林枫直流输电系统双极闭锁案例分析[J]. 现代电力, 2015, 32(3): 81-87.
LIANG Zhifeng. Case study on bipolar blocking of 500 kV Linfeng HVDC transmission system[J]. Modern Electric Power, 2015, 32(3): 81-87.
- [21] 童扬莹. 大型变压器涌磁过程的谐波及其在电网中的放大[J]. 电网技术, 1995, 19(2): 28-31.
TONG Yangying. Harmonics in excitation inrush current process of large power transformer and its magnification in network[J]. Power System Technology, 1995, 19(2): 28-31.

收稿日期: 2018-07-16; 修回日期: 2018-10-31

作者简介:

饶宇飞(1984—), 男, 硕士, 高级工程师, 研究方向为电力系统安全稳定分析; E-mail: ryf326@163.com

张鹏辉(1993—), 男, 通信作者, 硕士研究生, 研究方向为高压直流输电; E-mail: 1844376597@qq.com

李程昊(1988—), 男, 博士, 工程师, 研究方向为直流输电及柔性直流输电系统建模仿真。E-mail: chenghaoli.cn@gmail.com

(编辑 姜新丽)