

高压直流输电换相失败对带静偏心故障调相机的影响

马明晗, 贺鹏康, 李永刚, 姜 猛, 武玉才

(华北电力大学 新能源电力系统国家重点实验室, 河北 保定 071003)

摘要:为了研究高压直流输电逆变器换相失败对带静偏心故障调相机的影响,首先以一台TTS-300-2型双水内冷调相机为研究对象,基于Simulink+Maxwell/Simplorer构建了含同步调相机的高压直流输电的场-路-网耦合模型,联合仿真得到不同静偏心率下调相机的气隙磁场。其次,分析了换相失败对不同静偏心率下调相机气隙磁通密度的影响,并采用麦克斯韦应力张量法计算发生换相失败前后转子受到的不平衡磁拉力。最后,采用非线性Newmark隐式积分法计算换相失败对不同静偏心率下调相机转子振动的影响。结果表明,换相失败使带静偏心故障调相机气隙磁场增大,转子所受磁拉力与振动幅值明显增大,并且其影响程度随调相机静偏心率的增大而增大。换相失败对带静偏心故障调相机的影响分析对解释机组异常振动、诊断静偏心故障有一定的参考价值。

关键词:高压直流输电;同步调相机;换相失败;有限元分析;静偏心故障;不平衡磁拉力

中图分类号:TM 342;TM 721.1

文献标志码:A

DOI:10.16081/j.epae.202107022

0 引言

大型同步调相机在高压直流输电工程中对于维持输电系统的相对稳定、抑制换相失败起着重要的作用^[1]。同步调相机具有良好的动态无功补偿性能,是高压直流输电工程首选的无功补偿装置^[2]。因此,调相机的安全可靠运行对维持高压直流输电的电能质量、电网电压稳定具有重要作用。

调相机转子气隙偏心的产生机理与同步发电机相似^[3],由制造、运行、安装时调相机转子气隙不均匀造成。可认为当转子气隙偏心率超过10%时调相机存在静偏心故障。对于气隙偏心故障,前人已做了大量的研究。文献[4]通过检测定子电流与电压,经过Park变换后判断电机是否存在偏心故障。文献[5]通过电压空间矢量的高频分量与电流空间矢量的低频分量来判断感应电机是否发生偏心故障。文献[6-7]通过建立有限元模型验证了解析法对于偏心故障计算的合理性。文献[8-9]计算了带偏心故障电机定子匝间短路后转子所受电磁转矩的变化。文献[10]研究了发电机偏心故障与绕组匝间短路共同存在的情况下对磁场及电磁振动的影响,得出发电机故障后振动位移曲线波动较大的结论。文献[11]建立了无刷直流电机有限元仿真模型,在动偏心状态下对定子电流进行傅里叶分解,研究了

动偏心程度与特征频率幅值的关系,得出偏心程度越大特征频率幅值越大的结论。文献[12-13]提出了一种通过测量主齿谐波的幅值来判断感应电机是否存在静偏心故障的方法。通过对前人的工作总结发现,气隙偏心故障的研究多半针对发电机、感应电机与直流电机。由于大型同步调相机并网运行时间较短,对于其偏心故障诊断的分析较为匮乏。

大型同步调相机运行方式较发电机有所区别,由于其并联在高压直流输电系统的送端与受端,交电网故障容易对同步调相机产生冲击,造成带病运行机组的运行状态恶化,严重时甚至造成某些监测指标短期越限,影响高压直流输电系统的安全稳定运行。换相失败^[14-15]是高压直流输电工程常见故障,据统计,2012年在华东地区已建成的6回高压直流输电线路中共发生54次换相失败^[16]。因此研究高压直流输电换相失败对带静偏心故障调相机的影响,不仅对带病运行调相机的故障预警有指导意义,还对静偏心故障的准确诊断有参考价值。

本文以一台TTS-300-2型双水内冷调相机为研究对象,采用Simulink仿真软件搭建了含同步调相机的高压直流输电模型,仿真得到换相失败后调相机励磁电流、机端电压数据;建立Simulink+Maxwell/Simplorer场-路-网耦合仿真模型分析了换流站逆变器换相失败对存在静偏心故障调相机的气隙磁通密度、转子不平衡磁拉力与转子振动的影响。

1 机网故障分析

1.1 静偏心故障分析

图1为调相机发生静偏心故障的示意图。图中, $g(\alpha_m, t)$ 为调相机气隙, α_m 为调相机的机械角, t 为时间; δ_s 为转子磁场相对定子的静偏心值。当调相机

收稿日期:2021-01-26;修回日期:2021-05-21

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51777075);河北省自然科学基金资助项目(E2020502064);中央高校基本科研业务费专项资金资助项目(2021MS066)

Project supported by the National Natural Science Foundation of China(51777075),the Natural Science Foundation of Hebei Province(E2020502064) and the Fundamental Research Funds for the Central Universities(2021MS066)

发生静偏心故障时,转子旋转中心发生偏移,与定子几何中心不再重合,转子几何中心与转子旋转中心仍是同一点。

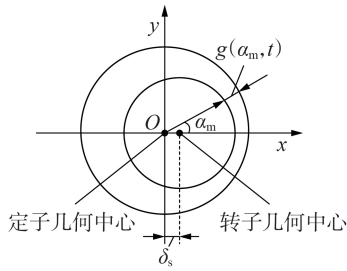


图1 调相机发生静偏心故障示意图

Fig.1 Schematic diagram of synchronous condenser with static eccentric failure

静偏心故障下气隙表达式为:

$$g(\alpha_m, t) = g_0(1 - \delta_s \cos \alpha_m) \quad (1)$$

其中, g_0 为平均气隙。以 α_m 最小值为起点, 气隙磁势可表示为^[17]:

$$f(\alpha_m, t) = F_s \cos(\omega t - \alpha_m - \psi - \pi/2) + F_r \cos(\omega t - \alpha_m) = F_1 \cos(\omega t - \alpha_m - \beta) \quad (2)$$

$$\begin{cases} F_1 = \sqrt{F_s^2 \cos^2 \psi + (F_r - F_s \sin \psi)^2} \\ \beta = \arctan \frac{F_s \cos \psi}{F_r - F_s \sin \psi} \end{cases} \quad (3)$$

其中, F_1 为合成磁势; F_s 为电枢反应磁势; F_r 为主磁势; ψ 为调相机内角; ω 为角频率。

正常情况下, 单位面积的磁导率为:

$$\Lambda(\alpha_m, t) = \frac{\mu_0}{g(\alpha_m, t)} = \frac{\mu_0}{g_0} \Lambda_0 \quad (4)$$

其中, μ_0 为相对磁导率; Λ_0 为正常运行情况下的气隙磁导率, 为定值。

发生静偏心故障情况下, 单位面积的磁导率为:

$$\begin{aligned} \Lambda'(\alpha_m, t) &= \frac{\mu_0}{g(\alpha_m, t)} = \frac{\mu_0}{g_0(1 - \delta_s \cos \alpha_m)} = \\ &= \Lambda_0(1 + \delta_s \cos \alpha_m + \delta_s^2 \cos^2 \alpha_m + \dots) = \\ &= \Lambda_0 [1 + 0.5 \delta_s^2 + \delta_s \cos \alpha_m + 0.5 \delta_s^2 \cos(2\alpha_m) + \dots] \end{aligned} \quad (5)$$

正常情况下气隙磁通密度的表达式为:

$$B(\alpha_m, t) = f(\alpha_m, t) \Lambda(\alpha_m, t) = F_1 \cos(\omega t - \alpha_m - \beta) \Lambda_0 \mu_0 / g_0 \quad (6)$$

静偏心故障下的气隙磁通密度的表达式为:

$$B'(\alpha_m, t) = f(\alpha_m, t) \Lambda'(\alpha_m, t) = F_1 \cos(\omega t - \alpha_m - \beta) \Lambda_0 \times [1 + 0.5 \delta_s^2 + \delta_s \cos \alpha_m + 0.5 \delta_s^2 \cos(2\alpha_m)] \quad (7)$$

由式(6)、(7)可知, 正常情况下调相机气隙磁通密度以基波为主, 发生转子静偏心故障后, 气隙磁通密度出现偶数次谐波。

1.2 静偏心故障转子受力分析

在静偏心故障作用下, 调相机的气隙磁场分布

将变得不均匀, 不均匀的磁场使调相机转子产生不平衡磁拉力。不平衡磁拉力是引发调相机转子异常振动的重要因素之一^[18]。

根据麦克斯韦应力张量法, 正常情况下转子表面单位面积所受磁拉力为:

$$q(\alpha_m, t) = \frac{B^2(\alpha_m, t)}{2\mu_0} \quad (8)$$

整个转子所受到的磁拉力为所有单位面积磁拉力的积分, 转子所受不平衡磁拉力为:

$$\begin{cases} F_x = LR \int_0^{2\pi} q(\alpha_m, t) \cos \alpha_m d\alpha_m = 0 \\ F_y = LR \int_0^{2\pi} q(\alpha_m, t) \sin \alpha_m d\alpha_m = 0 \end{cases} \quad (9)$$

其中, R 为转子半径; L 为转子轴向长度。气隙均匀分布时转子所受不平衡磁拉力合力为0。当转子发生静偏心故障时转子所受不平衡磁拉力可表示为:

$$\begin{cases} F_x = \frac{F_1^2 LR \pi}{4\mu_0} [2\Lambda_0 \Lambda_s + \Lambda_0 \Lambda_s \cos(2\omega t)] \\ F_y = \frac{F_1^2 LR \pi}{4\mu_0} \Lambda_0 \Lambda_s \sin(2\omega t) \end{cases} \quad (10)$$

其中, Λ_s 为转子静偏心引起的磁导分量。

由式(10)可知, 当转子发生静偏心故障时, 直流分量不随时间变化, 不会导致转子振动; 引发转子振动主要为2倍频分量。

1.3 换相失败影响分析

换相失败是高压直流输电最常见的故障。当系统变流器进行换相时, 等值电路满足:

$$L_m \frac{di_o(t)}{dt} - L_m \frac{di_c(t)}{dt} = E(t) \quad (11)$$

其中, L_m 为等效电感; $i_o(t)$ 、 $i_c(t)$ 分别为开通、关断时逆变桥流过的电流; $E(t)$ 为逆变桥线电压。

对式(11)积分可得晶闸管电压随时间变化的换相面积 A 以及关断角 α 的表达式分别为:

$$\begin{cases} A = L_m I_d = \frac{1}{2} \int_{\pi-\beta}^{\pi-\beta+\gamma} E(\omega t) d(\omega t) \\ \alpha = \beta - \gamma \end{cases} \quad (12)$$

其中, I_d 为直流电流; γ 为换相角。

设 α_{min} 为晶闸管恢复阻断时的最小关断角, 当 $\alpha < \alpha_{min}$ 时逆变器发生换相失败。当减小 I_d 时, 换相面积也会变小, 此时将抑制系统发生换相失败^[19]。当系统发生换相失败时, 调相机发出大量无功, 励磁电流也会在短时间内激增, 随着系统自身的恢复, 励磁电流逐渐恢复至原有状态。

2 场-路-网耦合仿真模型

为研究高压直流输电换相失败对带静偏心故障调相机的影响, 本文以一台 TTS-300-2 型双水内冷调相机为研究对象, 基于 Simulink+Maxwell / Simplorer

搭建场-路-网耦合仿真模型,具体参数见附录 A 表 A1。

2.1 调相机二维有限元模型

采用 Maxwell 仿真软件搭建的调相机二维有限元物理模型如附录 A 图 A1 所示。对调相机二维有限元模型进行网格剖分后,每个网格单元都满足式 (13) 所示的数学模型。

$$\begin{cases} \Omega: \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{1}{\mu} \frac{\partial A_z}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{1}{\mu} \frac{\partial A_z}{\partial y} \right) = -J_z \\ T: A_z = A_{z0} \end{cases} \quad (13)$$

其中, A_z 为矢量磁位; μ 为磁导率; J_z 为 z 轴电流密度分量; A_{z0} 为边界 T 的已知值; Ω 为模型求解区域。

为了计算方便,本文定义调相机转子气隙的静偏心率,其表达式为:

$$e = \frac{\varepsilon}{\delta} \times 100\% \quad (14)$$

其中, ε 为调相机转子几何中心沿径向偏离定子几何中心的偏心距; δ 为转子气隙大小。

2.2 含同步调相机的高压直流输电模型

采用 Simulink 仿真平台搭建了含同步调相机的高压直流输电模型,其主电路结构见附录 A 图 A2,整流侧与逆变侧都采用 2 个通用桥模块串联而成的 12 脉动变换器。交流侧并联滤波器的目的是抑制交流系统谐波分量。考虑到绝缘性和经济性,300 Mvar 同步调相机经升压变压器接入 330 kV 电压等级的交流母线。AnsoftSFunction 模块主要起 Simulink 与 Simplorer 之间仿真数据传递的作用,其中三相电压数据采集点位于输电线路受端交流母线上,励磁电流数据采集点位于调相机励磁回路上。

2.3 Simulink+Maxwell/Simplorer 场-路-网耦合模型

Simulink+Maxwell/Simplorer 场-路-网耦合仿真模型见附录 A 图 A3, U、V、W 相受控源与励磁电流受控源数据都来自于 Simulink 仿真模块。

3 结果分析

3.1 换相失败前气隙磁通密度与不平衡磁拉力

当调相机带额定负载运行时,分别设置转子气隙静偏心率为 0、10%、15%、20%,在场-路-网耦合模型中对调相机进行仿真计算。气隙磁通密度的波形及其谐波分析分别见附录 A 图 A4 及图 2。由图 A4 及图 2 可知,当调相机运行于额定工况时,气隙磁通密度分布均匀,对其进行傅里叶分解可知,仅存在奇数次谐波分量;当调相机转子发生静偏心故障后,气隙磁通密度产生畸变,出现频次为 2 倍频的偶数次谐波,并且静偏心率越大,畸变程度越严重,2 倍频幅值越大,这与前文理论推导结果一致。

图 3 为转子所受不平衡磁拉力与气隙静偏心率之间的关系图。调相机在未发生静偏心故障下额定

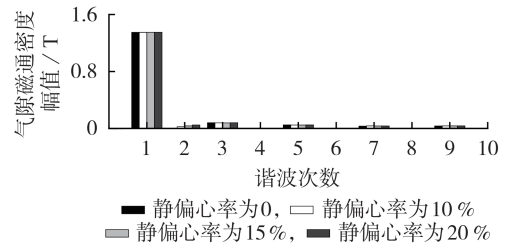


图 2 气隙磁通密度的谐波分析
Fig.2 Harmonic analysis of air-gap magnetic flux density

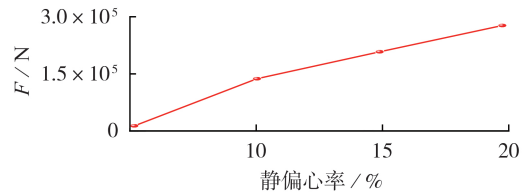


图 3 不平衡磁拉力与静偏心率的关系
Fig.3 Relationship between unbalanced magnetic tension and static eccentricity

运行时,转子所受到的不平衡磁拉力较小;静偏心故障会引起不平衡磁拉力幅值增加,且随着静偏心率的增加,不平衡磁拉力增加,两者之间的关系近似于正比例函数。

3.2 换相失败对带病运行机组的影响分析

为研究换相失败对带静偏心故障调相机转子所受不平衡磁拉力的影响,设输电线路 C 相发生阻性接地故障,故障时刻为 8.0 s,故障持续时间为 0.05 s。同样设调相机转子气隙静偏心率分别为 0、10%、15%、20%,基于 Simulink+Maxwell/Simplorer 仿真平台进行联合仿真。

3.2.1 换相失败对气隙磁通密度的影响

图 4 为换相失败后,不同静偏心率下调相机的气隙磁通密度谐波分解图。

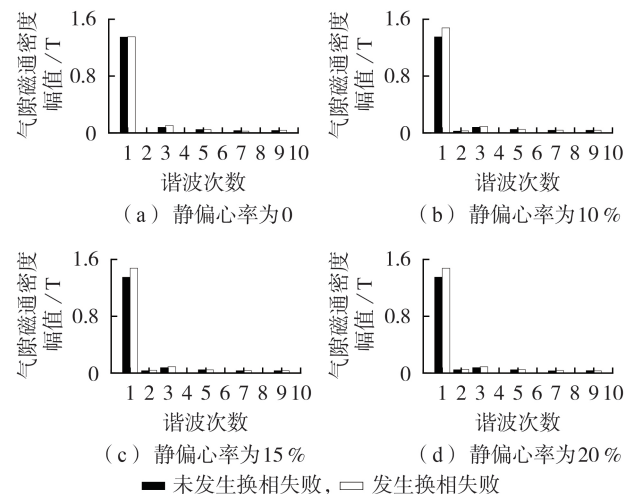


图 4 换相失败后气隙磁通密度谐波分析
Fig.4 Harmonic analysis of air-gap magnetic flux density after commutation failure

由图4可见,换相失败导致气隙磁通密度基波幅值与2倍频、3倍频谐波含量均增大,随着静偏心率的增加,其增大程度也越明显。

3.2.2 换相失败对不平衡磁拉力的影响

换相失败情况下不同静偏心率调相机转子所受到的不平衡磁拉力如图5所示。当第8.0 s系统发生换相失败时,由于励磁电流与机端电压剧烈波动,转子所受不平衡磁拉力变化较大,换相失败故障消除后逐渐恢复至稳定状态;静偏心率越大,不平衡磁拉力变化程度越大,对换相失败的抵御能力越弱。带静偏心故障调相机在换相失败的影响下,转子所受不平衡磁拉力的变化情况更加复杂。随着静偏心率的增加,不平衡磁拉力的最大幅值也增加,这将使转子振动状态恶化,导致机组轴振超标甚至是转子扫膛的风险。

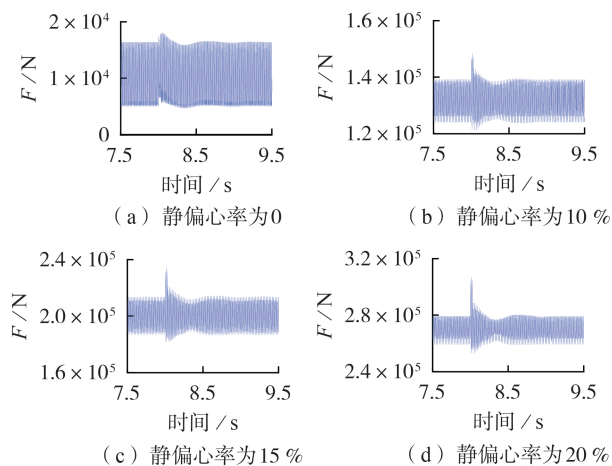


图5 换相失败后不同静偏心率转子所受不平衡磁拉力
Fig.5 Unbalanced magnetic pulling force of rotor with different static eccentricity after commutation failure

根据前文所述,换相失败可使带静偏心故障调相机故障特征扩大,可在换相失败期间提取调相机特征参数进行静偏心故障识别与判定。

3.2.3 换相失败对转子振动的响应

附录A表A2为300 Mvar双水内冷调相机转子振动现场监测数据。由表A2可知,额定运行时转子振幅在40 μm 左右。

为了得到调相机转子振动数据,本文采用非线性Newmark隐式积分法计算换相失败对转子正常与偏心故障时的振动位移的影响。计算结果如图6所示。

由图6可知,当正常情况时调相机的转子振幅较为平稳,幅值维持在40 μm 左右,与附录A表A2所示数据大致相同。当第8.0 s系统发生换相失败时,由于不平衡磁拉力变化较大,转子振幅也随之增大。当静偏心率为10%时,换相失败使转子振动最大值达到50.12 μm ,超过了调相机转子振动限值

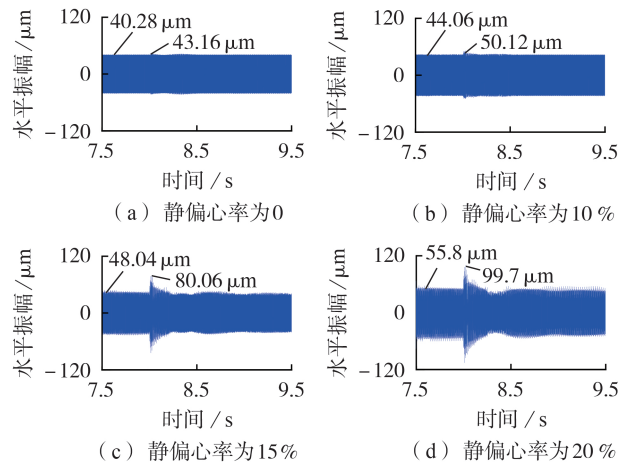


图6 换相失败前、后不同静偏心率转子振动位移
Fig.6 Different static eccentricity of rotor vibration displacement before and after commutation failure

50 μm 。由图6(d)可知,静偏心率为20%时转子最大振幅已超过50 μm 。则静偏心率在10%~15%时可利用换相失败对故障特征放大的特性进行静偏心故障诊断。

4 结论

本文通过搭建场-路-网耦合仿真模型对带静偏心故障的大型同步调相机换相失败前后气隙磁通密度、不平衡磁拉力进行分析与研究,得出以下结论。

1)当调相机发生转子气隙静偏心故障后,气隙磁通密度中将出现以2倍频为主的偶数次谐波,且其幅值随着静偏心率的加深而增大;静偏心率越大,转子所受不平衡磁拉力幅值也越大。

2)换流站逆变器换相失败导致带静偏心故障调相机气隙磁通密度基波幅值与2倍频、3倍频谐波含量均增大,静偏心率越大,其增大程度越明显。

3)当调相机带病运行时,网侧换相失败会引起转子不平衡磁拉力在短时间内变化剧烈,换相失败恢复期间存在机组轴振超标的风险。

4)当高压直流输电系统发生换相失败时,调相机励磁迅速动作,带静偏心故障运行机组不平衡性增强,转子气隙静偏心故障特征放大,这一现象可以用于诊断调相机转子气隙静偏心故障。

附录见本刊网络版(<http://www.epae.cn>)。

参考文献:

- [1] 黄华,潘学萍,李乐,等. 并网大容量调相机对交直流电力系统无功电压灵敏度的影响[J]. 电力自动化设备,2018,38(12): 162-167.
HUANG Hua, PAN Xueping, LI Le, et al. Effect of integrated large capacity synchronous condenser on reactive power and voltage sensitivity for AC/DC power system[J]. Electric Power Automation Equipment, 2018, 38(12): 162-167.
- [2] 曹泽宇,孙毅超,丁楠木,等. 基于惰速点整定的新型同步调

- 相机并网成功率提高方法[J]. 电力系统自动化,2020,44(6): 138-145.
- CAO Zeyu,SUN Yichao,DING Nanmu, et al. Improvement method of grid-connection success rate for new-type synchronous condenser based on idle speed point setting[J]. Automation of Electric Power Systems,2020,44(6):138-145.
- [3] 诸嘉慧,袁新枚,邱阿瑞,等. 大型水轮发电机转子偏心对单元件横差保护影响的分析[J]. 电力系统自动化,2005,29(11): 45-48.
- ZHU Jiahui,YUAN Xinmei,QIU Arui, et al. Analysis of the effect of eccentricity on single element transverse differential protection in large-sized hydro-generator[J]. Automation of Electric Power Systems,2005,29(11):45-48.
- [4] CARDOSO A J M,SARAIVA E S. Computer-aided detection of airgap eccentricity in operating three-phase induction motors by Park's vector approach[J]. IEEE Transactions on Industry Applications,1993,29(5):897-901.
- [5] HUANG X H,HABETLER T G. Detection of mixed air gap eccentricity in closed-loop drive-connected induction motors [C]//4th IEEE International Symposium on Diagnostics for Electric Machines,Power Electronics and Drives. Atlanta,GA, USA:IEEE,2003:312-316.
- [6] 仇志坚,李琛,周晓燕,等. 表贴式永磁电机转子偏心空载气隙磁场解析[J]. 电工技术学报,2013,28(3):114-121.
- QIU Zhijian,LI Chen,ZHOU Xiaoyan, et al. Analytical calculation of no-load air-gap magnetic field in surface-mounted permanent magnet motors with rotor eccentricity[J]. Transactions of China Electrotechnical Society,2013,28(3):114-121.
- [7] 章跃进,章君达. 偏心式谐波磁力齿轮气隙磁场分式线性变换解析模型[J]. 电工技术学报,2018,33(15):3572-3577.
- ZHANG Yuejin,ZHANG Junda. Analytical model of magnetic field of eccentric harmonic magnetic gear using fractional linear transformation method[J]. Transactions of China Electrotechnical Society,2018,33(15):3572-3577.
- [8] 方红伟,夏长亮,修杰. 定子绕组匝间短路时发电机电磁转矩分析[J]. 中国电机工程学报,2007,27(15):83-87.
- FANG Hongwei,XIA Changliang,XIU Jie. Analysis of generator eletro-magnetic torque on armature winding inter-turn short circuit fault[J]. Proceedings of the CSEE,2007,27(15):83-87.
- [9] 何玉灵,孟庆发,仲昊,等. 发电机气隙静偏心故障前后定子绕组电磁力的对比分析[J]. 华北电力大学学报(自然科学版),2017,44(5):74-80.
- HE Yuling,MENG Qingfa,ZHONG Hao, et al. Comparative analysis of stator winding electromagnetic force before and after static air-gap eccentricity fault of generator[J]. Journal of North China Electric Power University(Natural Science Edition),2017,44(5):74-80.
- [10] 谢颖,刘海东,李飞,等. 同步发电机偏心与绕组短路故障对磁场及电磁振动的影响[J]. 中南大学学报(自然科学版),2017,48(8):2034-2043.
- XIE Ying,LIU Haidong,LI Fei, et al. Effect of rotor eccentricity and stator short circuit faults on magnetic field and electromagnetic vibration characteristics of synchronous generator[J]. Journal of Central South University(Science and Technology),2017,48(8):2034-2043.
- [11] 赵向阳,葛文韬. 基于定子电流法监测无刷直流电动机转子动态偏心的故障模型仿真研究[J]. 中国电机工程学报,2011,31(36):124-130,246.
- ZHAO Xiangyang,GE Wentao. Simulation research of fault model of detecting rotor dynamic eccentricity in brushless DC motor based on motor current signature analysis[J]. Proceedings of the CSEE,2011,31(36):124-130,246.
- [12] CAMERON J R,THOMSON W T,DOW A B. Vibration and current monitoring for detecting airgap eccentricity in large induction motors[J]. IEE Proceedings B Electric Power Applications,1986,133(3):155.
- [13] SAHRAOUI M,GHOGGAL A,ZOUZOU S E, et al. Dynamic eccentricity in squirrel cage induction motors-simulation and analytical study of its spectral signatures on stator currents [J]. Simulation Modelling Practice and Theory,2008,16(9): 1503-1513.
- [14] 景柳铭,王宾,董新洲,等. 高压直流输电系统连续换相失败研究综述[J]. 电力自动化设备,2019,39(9):116-123.
- JING Liuming,WANG Bin,DONG Xinzhou, et al. Review of consecutive commutation failure research for HVDC transmission system[J]. Electric Power Automation Equipment,2019, 39(9):116-123.
- [15] 曾雪洋,刘天琪,王顺亮,等. 换相失败下柔性直流与传统直流互联输电系统的暂态无功协调控制策略[J]. 电力自动化设备,2019,39(12):28-35.
- ZENG Xueyang,LIU Tianqi,WANG Shunliang, et al. Coordinated transient reactive power control strategy for transmission system connected by VSC-HVDC and LCC-HVDC under commutation failure[J]. Electric Power Automation Equipment, 2019,39(12):28-35.
- [16] 李新年,陈树勇,庞广恒,等. 华东多直流馈入系统换相失败预防和自动恢复能力的优化[J]. 电力系统自动化,2015,39(6): 134-140.
- LI Xinnian,CHEN Shuyong,PANG Guangheng, et al. Optimization of commutation failure prevention and automatic recovery for East China multi-infeed high-voltage direct current system[J]. Automation of Electric Power Systems,2015,39(6): 134-140.
- [17] 戈宝军,毛博,林鹏,等. 无刷双馈电机转子偏心对气隙磁场的影响[J]. 电工技术学报,2020,35(3):502-508.
- GE Baojun,MAO Bo,LIN Peng, et al. Effect of rotor eccentricity fault on air gap magnetic field in brushless doubly-fed machine[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2020,35(3):502-508.
- [18] 万书亭,李和明,李永刚. 转子匝间短路对发电机定转子振动特性的影响[J]. 中国电机工程学报,2005,25(10):122-126.
- WAN Shuting,LI Heming,LI Yonggang. Analysis of generator vibration characteristic on rotor winding inter-turn short circuit fault[J]. Proceedings of the CSEE,2005,25(10):122-126.
- [19] 赵盛,李博通,李斌,等. 单相跳闸对换相过程的影响机理及连续换相失败抑制方法[J]. 电力自动化设备,2020,40(4):17-24,55.
- ZHAO Sheng,LI Botong,LI Bin, et al. Influence mechanism of single-phase tripping on commutation process and suppression strategy of continuous commutation failure[J]. Electric Power Automation Equipment,2020,40(4):17-24,55.

作者简介:



马明哈

马明哈(1990—),男,河北保定人,讲师,博士,主要研究方向为电气设备状态检测和故障诊断(E-mail: NCEPU_MMH@outlook.com);

贺鹏康(1996—),男,甘肃庆阳人,硕士研究生,主要研究方向为电气设备状态检测和故障诊断(E-mail: 2192213127@ncepu.edu.cn)。

(编辑 王欣竹)

(下转第 200 页 continued on page 200)

Planning method of power sources and coupling points based on autonomous web-of-cell mode

ZHAO Pengzhen¹, XU Qian², XIE Ning¹, WANG Chengmin¹, WANG Lei², ZOU Bo²

(1. School of Electronic Information and Electrical Engineering, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China;

2. Economic Research Institute of State Grid Zhejiang Electric Power Co., Ltd., Hangzhou 310008, China)

Abstract: Aiming at the limitations of traditional power grid modes, the AWoC (Autonomous Web-of-Cell) is proposed, and its mode and basic planning method are introduced. The planning of power sources and coupling points is mathematically modeled and an evaluation method of planning scheme is established. The example simulation with the actual load situation of an area is carried out, and the results show that multi-cell partition of AWoC has advantages in reliability and economy, and AWoC provides a new effective attempt for connecting high permeability renewable energy generation and energy storage to power grid.

Key words: AWoC; coupling point; power grid planning; power source location and capacity determination; penetration rate; renewable energy generation

(上接第193页 continued from page 193)

Influence of commutation failure of HVDC transmission on synchronous condenser with static eccentric failure

MA Minghan, HE Pengkang, LI Yonggang, JIANG Meng, WU Yucai

(State Key Laboratory of Alternate Electrical Power System with Renewable Energy Sources, North China Electric Power University, Baoding 071003, China)

Abstract: To study the influence of commutation failure of HVDC inverters on SC (Synchronous Condenser) with static eccentric failure, firstly a TTS-300-2 dual internal water-cooled SC is used as the research object, the field-circuit-network coupling model of HVDC transmission with SC is constructed based on Simulink+Maxwell/Simplorer, and the air-gap magnetic flux field of SC with different static eccentricity is obtained by co-simulation. Secondly, the influence of commutation failure on the air-gap magnetic flux density of the SC with different static eccentricity is analyzed, and the Maxwell stress tensor method is used to calculate the unbalanced magnetic tension of the rotor before and after the commutation failure. Finally, the nonlinear Newmark implicit integration method is adopted to calculate the influence of the commutation failure on the rotor vibration of SC with different static eccentricity. The results show that the commutation failure increases the air-gap magnetic flux field of SC with static eccentric failure, and the magnetic tension and vibration amplitude of rotor increase significantly. The influence of commutation failure increases with the increase of static eccentricity. The analysis of the influence of the commutation failure on SC with static eccentric failure has certain reference value for explaining the abnormal vibration of SC and diagnosing the static eccentric failure.

Key words: HVDC transmission; synchronous condenser; commutation failure; finite element analysis; static eccentric failure; unbalanced magnetic tension

附录 A

表 A1 调相机的基本参数
Table A1 Basic parameters of synchronous condenser

序号	参数	数值	序号	参数	数值
1	额定容量/Mvar	300	7	转子槽数/槽分度数	32/45
2	额定电压/kV	20	8	定子槽数	48
3	定子额定电流/A	8 660	9	转子本体长度/mm	5 950
4	额定频率/Hz	50	10	转子外径/mm	1 100
5	额定励磁电流/A	1 800	11	单边气隙长度/mm	70
6	空载额定励磁电流/A	705			

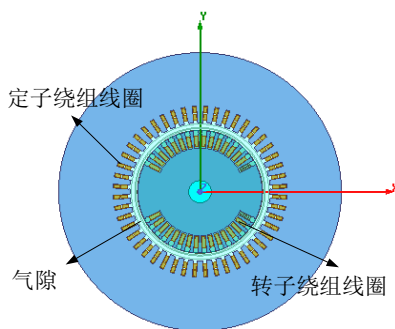
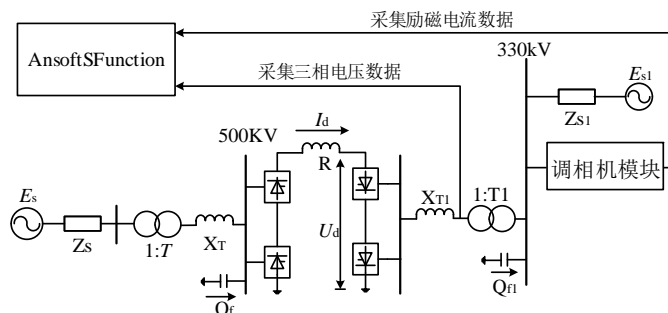


图 A1 调相机二维有限元模型

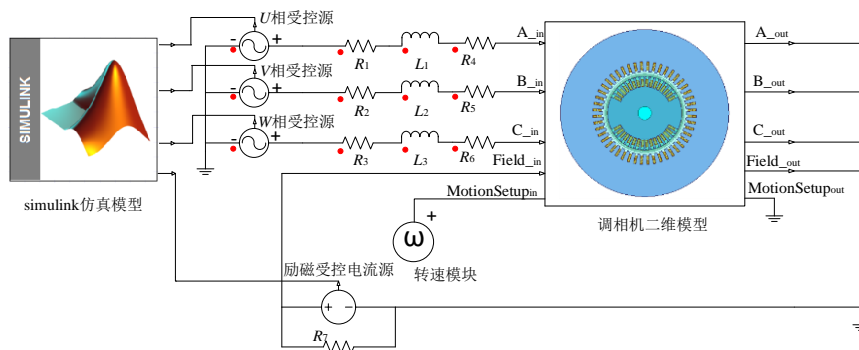
Fig.A1 Finite element physical model of synchronous condenser



注: I_d 、 U_d 分别为系统直流电流和直流电压; E_s 、 Z_s 和 E_{s1} 、 Z_{s1} 分别为整流侧和逆变侧交流系统的等值电动势、等值阻抗; R 为直流电路实际电阻。

图 A2 含同步调相机的高压直流输电拓扑图

Fig.A2 Topological diagram of high-voltage direct current transmission with synchronous condenser



注: R_1 、 R_2 、 R_3 为线路电阻; L_1 、 L_2 、 L_3 为调相机内部电感; R_4 、 R_5 、 R_6 为调相机内部电阻; R_7 为励磁系统内阻; A_{in} 、 B_{in} 、 C_{in} 、 $Field_{in}$ 和 A_{out} 、 B_{out} 、 C_{out} 、 $Field_{out}$ 分别为调相机三相电源输入与励磁电流输入和输出口。

图 A3 Simulink+Simpleror/Maxwell 耦合仿真电路图

Fig.A3 Simulink+Simpleror/Maxwell coupling simulation circuit diagram

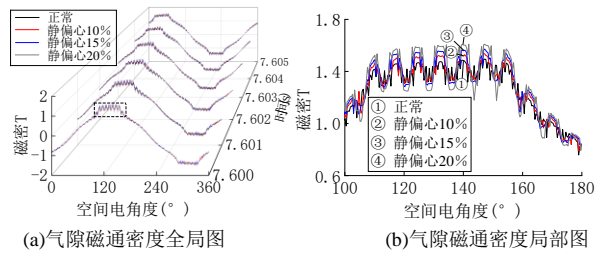


图 A4 气隙磁通密度

Fig.A4 Air-gap magnetic flux density

表 A2 300 Mvar 双水内冷调相机转子振动现场监测数据

Table A2 Field monitoring datas of rotor vibration of 300 Mvar dual internal water cooling synchronous condenser

工况	转速	转子振动峰值/ μm			
		第一次监测		第二次监测	
		轴向	径向	轴向	径向
减速	699	46	42	63	37
减速	2 344	47	42	31	14
额定	3 000	41	38	42	38
超速	3 600	106	80	88	62