

1000MW 级两极汽轮发电机稳态负序能力分析

[李进才]

[上海电机学院, 200240]

[摘要] 根据电磁学和传热学理论, 通过 ANSYS Maxwell 有限元电磁软件计算了负序运行时转子的涡流损耗分布, 并利用 ANSYS Workbench 软件的集成仿真平台实现了负序电流的电磁热耦合, 获得了 1000MW 级发电机稳态负序运行下的转子温升分布计算结果。仿真结果表明, 稳态负序温升主要集中在月牙槽尖角处, 这与实际发电机故障情况下转子本体烧伤情况相符, 为大型发电机的设计和运行提供了数值参考。

[关键词] ANSYS Maxwell; 涡流损耗; Workbench; 负序电流

Analysis On Static Negative Sequence Capacity of 2-Pole 1000 MW Turbo-generator

[Li Jincai]

[Shanghai Dianji University, 200240]

[Abstract] Based on the electromagnetic and heat transfer theory, distribution of the eddy current loss of rotor is calculated by ANSYS Maxwell Finite Element Software, and the electromagnetic heat coupling of negative sequence current is achieved through integral simulation platform of Workbench, so that the calculation results of temperature distribution of rotor is obtained when 1000 MW generator is under the static negative sequence current operational condition. The results show that the temperature rise is mainly concentrated in the groove angle of passing hollow, which coincide with the rotor burns situation when generator was under breakdown condition, providing the numeric reference for design and operation of large-size turbine generator.

[Keyword] ANSYS Maxwell; Eddy Current Loss; ANSYS Workbench; Negative Sequence Current

1 前言

大型发电机在电机制造业中占有重要的地位, 发电机的单机容量越大, 其经济价值越高。随着单机容量的不断增加, 大型发电机的电磁负荷和热负荷也随之同步提高, 由此导致电机各个部件的温度增高^[1]。

然而，发电机不对称运行时，更会使得发电机温升进一步提高。正常运行的电力系统是三相对称的，当电力系统或发电机的对称运行状态遭到破坏时（如短路、三相负载不对称等），就会引起三相电压电流的不对称。由对称分量法可知，此时的各相电流可以分解为三个对称的独立网络：正序、负序和零序。正序电流产生的旋转磁场与转子转向、速度均相同，二者之间没有相对运动。此外，发电机出口主变压器靠发电机侧为三角形联结，所以零序分量对发电机的影响可不考虑。而负序电流所产生的负序磁场同样以同步转速旋转，但与正序旋转磁场的旋转方向相反。因而，以同步转速旋转的发电机转子将以 2 倍同步转速切割该负序磁场，在转子本体表面感生出 2 倍工频涡电流，引起较大的涡流损耗，使得转子本体温度升高，极端情况下可能损坏发电机转子甚至发电机本身。据相关统计，1978 年~1987 年的十年间，全国由于各种原因造成不对称运行而产生的负序电流损坏的发电机有十台，而 1992 年~1993 年仅一年的时间里，华北电力系统直属的发电厂中就有三台发电机负序电流超标，或烧坏部分部件，或是造成长时间的停机检修^[2]。近年来，随着电力系统稳定性的提高，虽然因负序电流造成的发电机损坏有所减少，但居安思危，也有必要从源头杜绝此类问题的再发生。因此认真研究负序电流的产生机理及其对汽轮发电机的危害问题，对发电机的设计及安全运行有重要意义。

根据电磁学和传热学理论，利用 ANSYS Maxwell 电磁场有限元软件，本文计算了 1000MW 级发电机负序电流（稳态负序 $I_2/I_N=6\%$ ）在转子表面感应产生的涡流损耗，并利用磁热耦合的方法将该涡流损耗通过 Workbench 集成仿真平台耦合到 Mechanical 热分析模块中，计算了由该涡流损耗引起的转子温度分布及数值结果；得出了一些有益的结论，为大型发电机的设计与运行提供数值参考。

2 发电机负序涡流场的计算

2.1 负序涡流场的三维物理模型

正文本文采用的发电机三维物理模型，考虑了发电机定子铁心、定子绕组、转子铁心、转子绕组、转子月牙槽，不考虑槽楔的影响。并且，在发电机的径向方向，取定、转子槽底开始向外各延伸 20mm 区域；在发电机的轴向，因为是对称的，为节约计算机资源，故从转子上截取连续的一段，它包含两个完整的月牙槽、两各二分之一的非开槽部分及一个整个非开槽区域，如图 1 所示。

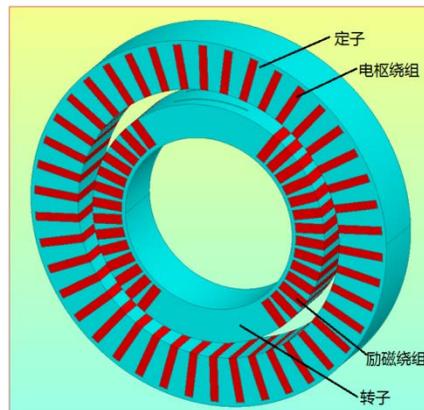


图 1 发电机三维计算模型

汽轮发电机内电磁场分布较为复杂，为了方便计算并考虑满足工程需要的前提下，需要作如下假设^[3]：

- (1) 忽略定子线圈中的涡流；
- (2) 转子绕组采用氢内冷技术，转子绕组中的负序发热基本上被冷却介质带走，转子绕组的温度为恒定值，故忽略转子线圈中的涡流损耗；
- (3) 激励源与各场量均按正弦规律变化，忽略谐波分量；
- (4) 忽略位移电流；
- (5) 材料的电磁特性呈线性、各项同性。

2.2 负序涡流场的数学模型

ANSYS Maxwell 软件 3D 涡流场采用 T - Ω 法来进行求解。该方法将求解区域 V 分成涡流区 V_1 和非涡流区 V_2 ，并将源电流归入非涡流区。为了求解的方便并考虑到各求解域的特性，在涡流区引入矢量电位 T ，而非涡流区不引入，故负序涡流场满足如下的场方程^{[4][5]}：

$$\left. \begin{aligned} \nabla \times \rho \nabla \times T - \nabla \rho \nabla \cdot T + \frac{\partial \mu(T - \nabla \psi)}{\partial t} &= -\partial \mu H_s \\ \nabla \cdot \mu(T - \nabla \psi) &= -\nabla \cdot \mu H_s \end{aligned} \right\} \quad \text{在 } V_1 \text{ 中}$$

$$\nabla \cdot \mu \nabla \psi = \nabla \cdot \mu H_s \quad \text{在 } V_2 \text{ 中}$$

式中： ρ ——电阻率， Ω/m ； μ ——磁导率， H/m ； T ——矢量电位； ψ ——标量磁位； H_s ——源电流密度 J_s 所产生的磁场强度； $H_s = \frac{1}{4\pi} \int_{\Omega_s} \frac{J_s \times r}{r^3} d\Omega$ 。

本文的负序涡流场计算中，考虑到加载的方便，定子上下层绕组用一个单独的导条来模拟，且导条的电流值取上下层绕组电流的矢量叠加，从而使得定子中的负序电流对转子的磁场保持不变。

由于三相负序电流的作用，发电机定、转子和气隙间将产生反向同步负序旋转磁场，转子正向同步旋转，从而导致转子相对于负序旋转磁场有 2 倍同步转速，在转子表面感生出 2 倍频负序涡电流。该感应涡电流频率较高，集肤效应较强，且对负序磁场具有较大的阻尼作用，使得负序磁场不易透入转子深处，其深度在转子表面约深达几毫米，可用下式表示

$$h = \sqrt{\frac{1}{\pi f \mu \sigma}}$$

式中： f ——激励源的频率， Hz ； μ ——材料的绝对磁导率， H/m ； σ ——材料的电导率， S/m 。

考虑到转子相对于负序磁场以 2 倍转速旋转，故在利用有限元软件计算时，在定子绕组上施加 2 倍工频电流而转子等效为静止来模拟实际情况。计算得到的负序磁场分布如图 2 所示。

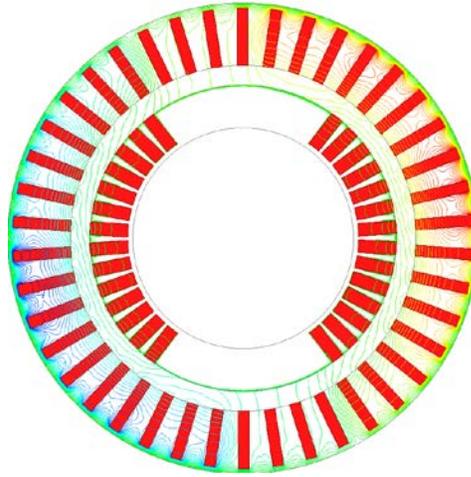


图2 负序磁力线分布

3 发电机负序温度场的计算

3.1 负序温度场的三维物理模型

本文考虑的是负序电流引起的涡流损耗作用在转子本体上时，转子本体的温度分布情况，所以在电磁热耦合的负序温度场中，仅将转子本体作为计算区域，而不考虑定子及绕组的情况。

3.2 负序温度场的数学模型

ANSYS Mechanical 负序温度场也采用有限元法分析。根据传热学的基本原理，温度场的基本方程为：

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{\partial}{\partial x}(\lambda_x \frac{\partial T}{\partial x}) + \frac{\partial}{\partial y}(\lambda_y \frac{\partial T}{\partial y}) + \frac{\partial}{\partial z}(\lambda_z \frac{\partial T}{\partial z}) = \rho C \frac{\partial T}{\partial t} - q \\ T|_{\Omega_1} = T_0 \\ -k \frac{\partial T}{\partial n}|_{\Omega_2} = q \\ -k \frac{\partial T}{\partial n}|_{\Omega_3} = \alpha(T - T_f) \end{array} \right.$$

式中： T ——温度，℃； λ_x ——x轴导热系数，W/mK-1； λ_y ——y轴导热系数，W/mK-1； λ_z ——z轴导热系数，W/mK-1； ρ ——密度，kg/m³； C ——比热，J/kgK-1； Ω_1 ——边界条件I（已知物体边界上的温度 T_0 ）； Ω_2 ——边界条件II（已知物体边界上的热流密度 q ）； Ω_3 ——边界条件III（已知与物体接触的流体介质温度 T_f 和换流系数 α ）。

4 计算结果与分析

4.1 转子负序涡流场

利用 ANSYS Maxwell 软件进行分析计算，稳态 $I_2/I_N=6\%$ 时，1000MW 级发电机负序涡流损耗密度分布如图 3，从图中可以看出，由于集肤效应的影响，感应涡流集中在转子本体的表面，超过透入深度，电流迅速衰减，从而涡流损耗主要集中在转子表面，而转子内部几乎没有，且转子月牙槽尖角处的涡流损耗密度明显高于转子其他部位。

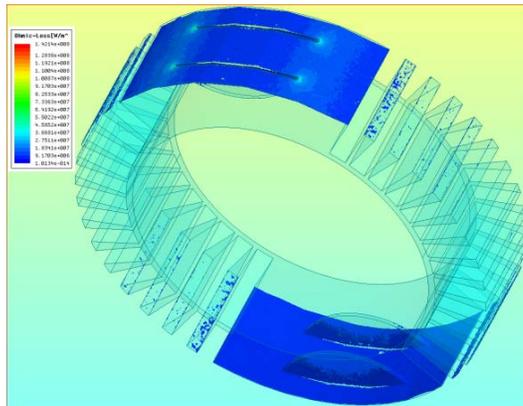


图 3 负序涡流损耗密度分布

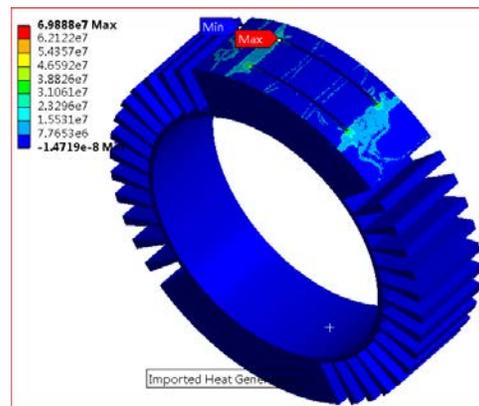


图 4 负序涡流损耗耦合分布

利用 Workbench 集成仿真平台，通过耦合的方法，将转子实体损耗无损的耦合到温度场，耦合的损耗分布如图 4，其分布与 Maxwell 中的损耗分布相同。

4.2 转子负序温度场

在负序温度场分析中，利用以上定子侧负序电流引起的实心转子内的负序涡流损耗作为热源，然后通过加载合适的温度场边界条件，如图 5。这里转子表面（包括月牙槽表面）为对流换热边界条件；由于温度场模型取的是转子轴向的一段，所以转子轴向两个端面取绝热边界条件；转子内表面取恒温边界条件。仿真出负序温度场的分布，如图 6 所示。

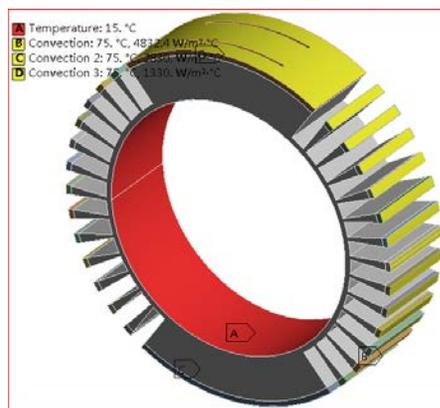


图 5 温度场边界条件的加载

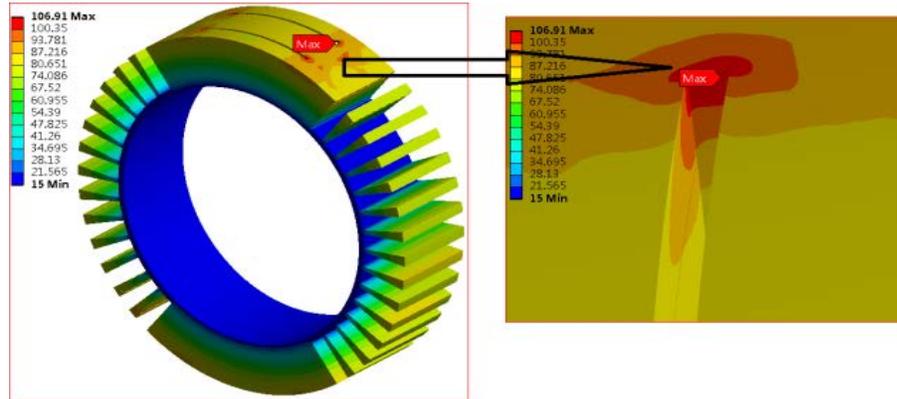


图 6 负序温度场分布

从图 6 可以看出，当 1000MW 级发电机承受稳态负序电流 $I_2/I_N=6\%$ 时，转子表面温度最高约 106.91°C ，小于 IEC 60034-3:2007 标准规定的 130°C 的稳态温度限制；而且温度最高点分布在月牙槽尖角处，这与实际事故情况下转子本体烧伤最严重的区域相吻合。

5 结论

本文利用 ANSYS Maxwell 电磁软件及 Workbench 集成仿真平台，采用有限元法对 1000MW 级两极汽轮发电机承受稳态负序电流 $I_2/I_N=6\%$ 时的负序涡流场和负序温度场进行了研究，通过分析可以得出以下结论：

(1) 转子本体的最高温度符合我国标准规定的转子表面长期允许的最高温度 (130°C) 的要求，能够满足安全运行的条件。

(2) 转子本体温度最高点分布在月牙槽尖角处，从而这些部位的烧伤最为严重，而实际事故情况下发电机转子转子烧伤严重程度分布也验证了这一点。可以通过采用在转子大齿表面开设阻尼槽并在槽中放置高导电率的槽楔的方法，来降低发电机负序损耗对转子本体的影响。

仿真结果表明，QFSN 型 1000MW 级两极汽轮发电机在稳态负序电流 $I_2/I_N=6\%$ 条件下，能够满足安全运行的要求。

[参考文献]

- [1] 董建洋. 百万千万级汽轮发电机负序能力研究[D]. 杭州:浙江大学, 2006:1.
- [2] 李永生. 负序电流及其对汽轮发电机的危害[J]. 华电北电力技术, 1994, (9):9-12.
- [3] 刘明慧, 咸哲龙, 赵继敏. QFSN 型 800MW 级两极汽轮发电机稳态负序能力分析[J]. 上海大中型电机, 2011, (1):17-19, 35.
- [4] 谢德馨, 姚缨英, 白保东, 李锦彪. 三维涡流场有限元分析[M]. 北京:机械工业出版社, 2001. 3:27.
- [5] 钟后鸿, 郑东平, 咸哲龙, 梁旭彪. 发电机负序涡流场和温度场三维有限元分[J]. 电机技术, 2013, (4):10-12.