

混合材质绕组风力发电机舱变压器负载损耗计算修正模型

——兼论 IEC 标准在跨材质场景的适用性拓展

文 / 马云 新疆新能电网建设服务有限公司

张奎 新疆新能电网建设服务有限公司

李璐璐 新疆新能电网建设服务有限公司

摘要：通常情况下电力变压器的负载损耗测量及计算方法，按照 1094.1 的方法和附录 G 中的公式进行计算。但 1094.1 的标准中只对于高低压线圈为相同材质的变压器负载损耗计算方法进行了描述，而对于特殊的高低压线圈使用不同材质生产的风电机舱用内置变压器，其负载损耗从常温折算到参考温度下的负载损耗计算方法未进行说明，这导致很多试验人员生搬硬套使用国标中的方法进行计算，最终计算出错误的结果。本文将围绕变压器高低压线圈为不同材质的机舱内置变压器，介绍一种从常温下折算到参考温度下的负载损耗计算方法供读者进行参考。

关键词：风力发电机舱内置变压器；高低压线圈不同材质；负载损耗计算；附加损耗计算

【DOI】10.12254/j.issn.2096-6539.2025.21.071

引言

2024 年 11 月 22 日国家能源局发布 1-10 月份全国电力工业统计数据。截至 10 月底，全国累计发电装机容量约 31.9 亿千瓦，同比增长 14.5%。其中，太阳能发电装机容量约 7.9 亿千瓦，同比增长 48.0%；风电装机容量约 4.9 亿千瓦，同比增长 20.3%。全国主要发电企业电源工程完成投资 7181 亿元，同比增长 8.3%；电网工程完成投资 4502 亿元，同比增长 20.7%。从以上数据中可以看出，风电装机容量逐年增长，风资源利用小时数逐年提高，而风电工程投资成本逐年下降。事实上，随着风电项目的“平价上网”时代的来临，风电项目投资方对风机性能要求越来越高，而对风机采购成本期望越来越低，因此风机单机成本的降低是风机制造商重点研究的方向之一。而将变压器内置于风机是降低“风机+变压器”机组成本的有效途径之一。具体优势分析如下：

(一) 节约风力发电机组的占地成本。对于陆上风电项目，目前“三北”地区弃风率虽然逐步降低，但压力依然巨大，就目前形势而言，多数风电项目集中于国内中南部及沿海省份，土地资源有限，目前行业上主要采用的是组合式变压器方案，即在距离风机 $\geq 15\text{m}$ 安全距离处设置组合式变压器，一般来说常规组合式变压器占地面积约 5mm^2 ，带高压开关的组合式变压器占地面积约 8mm^2 ，因此“风机+变压器”组合机组占地半径大，若将变压器内置于风机，可一定程度上节约施工、地基等成本。

(二) 平衡机舱与叶片之间的配重。针对内置于机舱的变压器的机组，由于叶片直径大，转动过程中塔筒受力一直处于周期性的动态变化之中，塔筒承受的不仅仅来自于机舱及叶片的重力，同时受到横向剪切力，因此对塔筒厚度要求较高，若变压器内置于机舱，可有效

平衡叶片和机舱的配重，塔筒侧重于考虑机舱和叶片的重力即可。

(三) 节约风机至变压器间的低压电缆用量，因此有效降低电缆成本。对于传统方案，变压器低压侧经地埋电缆，再经风机塔筒接至风机机舱变频装置，同时低压电压低，电流大，因此电缆截面大，根数多，用铜量大，因此若采用变压器机舱内置方案，则变压器至变频器路径大大缩短，虽高压电缆长度增加，但高压电缆截面小，电缆综合成本能得到有效控制。

(四) 采用高压电缆输电，降低线损，经维斯塔斯提供的验证数据，以目前主流的 2MW 风机平台为例，在风机全寿命周期内（20 年）可降低线损折合人民币约 120 万元。

(五) 变压器属于传统电力设备，一旦正常投运，运行平稳，若非工艺或结构缺陷不会出现较大故障，因此属于较为可靠的电力设备，放置于机舱顶部，变压器可满足风机 20 年的寿命周期要求。

由于变压器放置于风机机舱内部，需要考虑安全、污染、易维护、维修等因素，因此风机生产商重点关注变压器产品质量，由于变压器性能、结构、冷却系统甚至防振动结构的设计均需要与风力发电机配合，因此本新产品项目一般是在项目前期由风机制造商同变压器厂家共同研究开发。从成本的角度考虑，新研发设计的机舱内置变压器高压线圈大多选择铝线进行绕制，而低压选用铜箔进行绕制。由于高低压线圈为不同材质绕制，在进行负载损耗折算到参考温度下的损耗时，在标准中没有相应得公式可以进行参考，需要试验工程师根据自身经验再结合相关设计理念进行深入分析，最终获得一个合理的计算方法。

一、变压器负载损耗的定义

变压器的负载损耗，也称为铜损或短路损耗，主要发生在变压器负载运行时，即当变压器在其额定电压和额定负载下运行时产生的损耗。负载损耗主要由以下几部分组成：

(一) 电阻损耗 (I²R 损耗)

这是负载损耗的主要组成部分，是由于变压器绕组的电阻引起的。当电流通过绕组时，根据欧姆定律 (I²R)，会产生热量。这部分损耗与电流的平方和绕组的电阻成正比。

电阻损耗 = I²R，其中 I 是绕组中的电流，R 是绕组的电阻。

(二) 附加损耗

这包括由于绕组中的交流电流引起的邻近效应和集肤效应所造成的损耗。邻近效应是指电流在相邻导线中分布不均匀，导致额外的损耗。集肤效应是指交流电流趋向于集中在导体的表面，增加了有效电阻，从而增加了损耗。附加损耗还可能包括由于绕组结构不当或绝缘材料不良引起的其他类型的损耗。

总的来说，变压器的负载损耗主要由电阻损耗和附加损耗组成。这些损耗都以热能的形式表现出来，变压器的设计和运行需要特别考虑有效的散热措施，以保持变压器在安全的温度范围内运行。

二、常规变压器的负载损耗计算方法

根据 1094.1 的附录 G，在温度 θ₁ 时测量的绕组电阻，其测量值为 R₁。

在平均温度为 θ₂ 时，测量绕组的负载损耗，在规定电流 I 下测得的损耗为 P₂，此损耗由电阻损耗 I²R₂ 和附加损耗 P_{a2} 构成。

$$R_2 = R_1 \times (235 + \theta_2) / (235 + \theta_1) \text{ (铜)}, R_2 = R_1 \times (225 + \theta_2) / (225 + \theta_1) \text{ (铝)}$$

$$P_{a2} = P_2 - \sum I_2^2 R_2, \sum I_2^2 R_2 \text{ 是所有绕组直流电阻之和。}$$

在参考温度 θ_r 时，其绕组电阻是 R_r，其附加损耗是 P_{ar}，总损耗是 P_r。

$$R_r = R_1 \times (235 + \theta_r) / (235 + \theta_1) \text{ (铜)}, P_{ar} = P_{a2} \times (235 + \theta_2) / (235 + \theta_r) \text{ (铜)}$$

$$R_r = R_1 \times (225 + \theta_r) / (225 + \theta_1) \text{ (铝)}, P_{ar} = P_{a2} \times (225 + \theta_2) / (225 + \theta_r) \text{ (铝)}$$

对于参考温度为 75°C 的液浸式变压器，则上述公式变为如下所示“

$$R_r = R_1 \times 310 / (235 + \theta_1) \text{ (铜)}, P_{ar} = P_{a2} \times (235 + \theta_2) / 310 \text{ (铜)}$$

$$R_r = R_1 \times 300 / (225 + \theta_1) \text{ (铝)}, P_{ar} = P_{a2} \times (225 + \theta_2) / 300 \text{ (铝)}$$

$$\text{最后有: } P_r = \sum I_2^2 R_r + P_{ar}$$

通过以上方式，可以计算出高压低压线圈为相同材质的变压器负载损耗值，同时也是变压器试验工作者最常用的负载损耗计算方法。

三、高压铝材质、低压铜材质风力发电机舱内置变压器负载损耗折算到参考温度下的计算依据

当变压器高低压线圈的材质不相同，我们可以将附加损耗按照直流电阻损耗占比进行分量计算，原因及依据的原理如下：

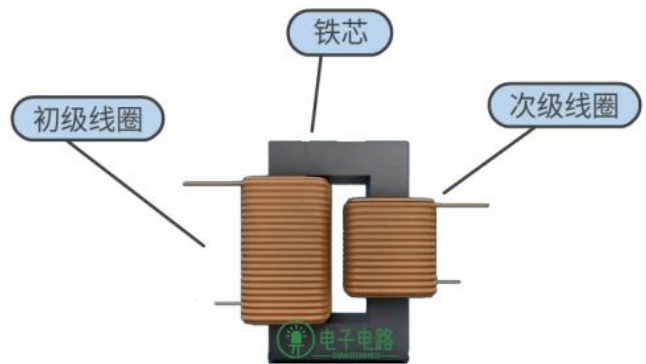


图 1 变压器线圈材质

(一) 耦合关系

变压器电流通过高低压线圈时会产生磁场，该磁场不仅在铁芯中形成主磁通，还会在线圈周围产生漏磁通。漏磁通会在线圈及附近金属结构件中引发附加损耗，且其大小与通过线圈的电流紧密相关。而直流电阻损耗也取决于电流，二者在与电流的关系上具有一定耦合性，为按直流电阻损耗占比计算附加损耗提供了基础。

(二) 相似的影响因素

线圈的直流电阻损耗与附加损耗都受线圈材质、结构尺寸等因素影响。例如，材质相同时，导线截面积越大，直流电阻越小，直流电阻损耗降低，同时因导线加粗，漏磁通在导线内产生的涡流损耗等附加损耗也会减小，这种相似的影响因素使得二者存在一定比例关系。

(三) 能量守恒定律

根据能量守恒，输入变压器的电能一部分转化为输出电能，其余则以各种损耗形式消耗，包括负载损耗中的直流电阻损耗和附加损耗。在一定条件下，若已知直流电阻损耗及总损耗与直流电阻损耗的大致比例关系，可据此估算附加损耗，且大量试验和实际运行数据表明，这种按占比计算的方法在工程应用中具有合理性和可靠性。

(四) 经验数据与统计规律

长期的变压器设计、制造和运行维护中，积累了丰富的试验数据和运行经验，经分析总结发现，对于特定

类型和规格的电力变压器，其高低压线圈的附加损耗与直流电阻损耗间存在相对稳定的比例范围，这为按直流电阻损耗占比计算附加损耗提供了有力的数据支撑和实践依据。

四、高压铝材质、低压为铜材质机舱内置变压器负载损耗折算到参考温度下的方法

出于以上原因考虑，我们在计算高低压线圈不同材质的变压器负载损耗时，假设在规定的流 I 下测得损耗为 P_2 ，此损耗由电阻损耗 I^2R_2 组成和“附加损耗” P_{a2} 构成。

当变压器高低压线圈为不同材质时，电阻损耗与附加损耗的分解如下：

$$R_{高} = R_1 \times (225 + \theta_2) / (225 + \theta_1) \quad (\text{铝})$$

$$R_{低} = R_1 \times (235 + \theta_2) / (235 + \theta_1) \quad (\text{铜})$$

$$I^2R_2 = I_{高}^2R_{高} + I_{低}^2R_{低}$$

$$P_{a2} = P_2 - I^2R_2, \text{ 同时 } P_{a2} = P_{a高} + P_{a低}$$

$$\text{则 } P_{a高} = P_{a2} \times I_{高}^2R_{高} / I^2R_2, P_{a低} = P_{a2} \times I_{低}^2R_{低} / I^2R_2$$

将高低压电阻损耗和高低压附加损耗分别折算到参考温度下的公式如下

$$\Sigma I^2R_r = I_{高}^2R_{r高}(\text{铝}) + I_{低}^2R_{r低}(\text{铜})$$

$$P_{ar} = P_{a高} \times (225 + \theta_1) / (225 + \theta_2) (\text{铝}) + P_{a低} \times (235 + \theta_1) / (235 + \theta_2) (\text{铜})$$

最后 P_R 为总电阻损耗与总附加损耗之和

$$P_R = \Sigma I^2R_r + P_{ar}$$

五、举例说明



图 2 电力变压器

已知一台型号为 SRBSPTL-8400/33 的机舱内置变压器，高压线圈为铝材质线圈，低压线圈为铜材质线圈，电压比 33/0.72kV，电流 146.96/6735.8A，联结组别 Dyn11，现场测试油温 20.1° C。高压线圈电阻平均值为 0.6890Ω，低压电阻平均值 0.0003473Ω，常温条件下测试负载损耗 P_2 为 72929.59W。求参考温度 95° C 下的负载损耗值。

(1) t° C 下的负载损耗计算

$$I_{高}^2R_{高} = 146.96^2 \times 0.6890 = 14880.50W$$

$$I_{低}^2R_{低} = 6735.80^2 \times 0.0003473 = 1575.35W$$

$$\Sigma I^2R_2 = 1.5 \times (I_{高}^2R_{高} + I_{低}^2R_{低}) = 45956.76W$$

$$P_{a2} = P_2 - I^2R_2 = 72929.59 - 45956.76 = 26973.13 W$$

对 P_{a2} 按照高低压线圈电阻损耗占比进行分量计算可得：

$$P_{a高} = P_{a2} \times I_{高}^2R_{高} / (I_{高}^2R_{高} + I_{低}^2R_{低}) = 14880.5 / (14880.5 + 1575.35) \times 26973.13 = 13100.58W$$

$$P_{a低} = P_{a2} \times I_{低}^2R_{低} / (I_{高}^2R_{高} + I_{低}^2R_{低}) = 1575.35 / (14880.5 + 1575.35) \times 26973.13 = 13872.55W$$

(2) 折算到参考温度 (95° C) 下的电阻损耗和附加损耗计算

$$\begin{aligned} \Sigma I^2R_r &= 1.5 \times (I_{高}^2R_{r高}(\text{铝}) + I_{低}^2R_{r低}(\text{铜})) \\ &= 1.5 \times (14880.5 \times (225 + 95) / (225 + 20.1) \\ &\quad + 1575.35 \times (235 + 95) / (235 + 20.1)) \\ &= 59717.84W \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} P_{ar} &= P_{a高} \times (225 + \theta_1) / (225 + \theta_2) (\text{铝}) + P_{a低} \times \\ &\quad (235 + \theta_1) / (235 + \theta_2) (\text{铜}) \\ &= 13100.58 \times (225 + 20.1) / (225 + 95) + 13872.55 \times \\ &\quad (235 + 20.1) / (235 + 95) \\ &= 20758.13 W \end{aligned}$$

(3) 在参考温度 95° C 的最终负载损耗

$$P_R = \Sigma I^2R_r + P_{ar} = 59717.84 + 20758.13 = 80475.97W$$

结语

近年风力发电机舱内置变压器在国内的发展迅猛，电压等级和单台产品容量也在不断的创出新高。不可忽视的是机舱内置变压器的质量风险同样巨大，其采用 APQP4 的质量管控手段对产品质量从源头进行控制，但随着产品数量的不断增多，各类质量问题将会展现。作为测试人员，对机舱变的测试一定要严肃态度，对于国标或 IEC 标准中没有明确规定的测试项目，严格按照客户协议和要求进行测试，出现问题要及时通知技术人员和客户，不能一概而过，以避免质量问题流出工厂。

参考文献

- [1] 孙文辉. Dyn11 型配电变压器负载损耗计算方法研究. 上海置信电气有限公司, 2024.
- [2] 王忠波. 风力发电机组机舱内置干式变压器应用研究. 海南金盘智能科技股份有限公司, 2024.
- [3] 张林通. 风机机舱内置升压变压器电损及经济性分析 [D]. 昆明理工大学信息工程与自动化学院, 2022.