

不间断电源 UPS 中逆变变压器的寿命评估

周 蓉¹, 姚志慧¹, 杨海涛²

(1. 广东省东莞市质量计量监督检测所, 广东 东莞 523120;
2. 立德电子股份有限公司, 广东 东莞 523100)

摘要: 针对大型 UPS 中低频逆变变压器的负载特性, 结合目前应用最广泛的 NOMEK 绝缘系统的结构特点, 对影响 UPS 中变压器内在寿命的一些因素, 从材料老化机制上做出分析, 并且以实际案例计算和比较了不同负载状态对绝缘老化和机械老化的显著影响, 指出混合绝缘设计、提高耐温等级、控制制造稳定性以及合理选型与使用是提高 UPS 中变压器产品寿命的重要手段。对目前行业中看似不合乎理论的设计选择基准作出尝试性的理解说明。

关键词: 不间断电源; 老化机制; 阿伦纽斯曲线; 介电强度; 机械强度; 电晕效应; 负载状态

中图分类号: TM464; TM402

文献标识码: A

Life research of inverter transformer in UPS

ZHOU Rong¹, YAO Zhi Hui¹, YANG Hai Tao²

(1. Guangdong Dongguan Institute of Metrology and Quality Supervision Testing, Dongguan 523120, China;
2. Leader Electronics Inc., Dongguan 523100, China)

Abstract: Based on working situations of UPS inverter transformers and life deterioration mechanism of Class H Nomex insulation system, this paper lists out the inherent and outside elements those influence much of transformers working life. Through calculating of one transformer sample, gives out theory analysis methods and calculation formulas. The strategy to improve life performance come out as Hybrid insulation, thermal running margin, continuous manufacture level and proper application occasions.

Key words: UPS; deterioration; Arrhenius curve; dielectric strength; mechanical strength; corona effect; loading situation

随着经济的飞速发展和跨入世贸的巨大推动力, 我国已进入信息化社会, 金融、电信、能源等所有企事业单位及国家政府机关几乎无一例外地转入电子化办公和信息化管理。整个社会乃至全世界已形成了一个无所不在的国际网络。同时, 工业化程度的提高和经济的飞速发展也形成并日益加重了电力消耗的负担, 即便三峡供电对此有一定程度的缓和, 但东南沿海, 包括内地部分大中城市还是要不同程度地面对“电荒”时代。频繁的限电和紧急断电使信息网络遭受巨额损失。在这种潜在的巨大危机下, 用于数据中心、大型设备、金融、电信等信息系统的大型 UPS 近几年风头压过原来的家用小型 UPS, 创造了电源管理行业的一块巨大市场。

据赛迪中国调查, 2006 年中国 UPS 市场总销售 127.9 万台, 销售额 26.1 亿元, 销量比 2005 年增长 12.1%, 销售额增长 8.3%。主要销售对象为金融、电信等行业。2007 到 2008 年, 中国机房一体化总体市场为

257.07 亿元。

而 UPS 产品的质量要求已不再停留在原来低端消费产品的等级, 而需进行工业等级的可靠性设计, 寿命则从原来的 5 年左右提升到 15~30 年的普遍要求(原小型 UPS 寿命以电池及电容等电子部件寿命终结为止, 而目前大型 UPS 则是提供了终身维护, 短寿命电子部件及电池将由厂家实时更换)。而 INVERTER 变压器作为大型 UPS 中成本较大的一个终身使用部件, 无疑决定了 UPS 的产品寿命。目前铜、铁等变压器原材料飞涨, 合理地设计产品寿命, 使其控制在足够但不过份浪费的尺度是技术工作者的责任。

1 NOMEK 绝缘系统应用在变压器中的优点

NOMEK 做为绝缘材料具有如下一系列优点^[1], 故而几乎垄断高温度等级的变压器市场, 所有 H 级以上的干式变压器都是以 NOMEK 为主要绝缘材料^[2]。

(1) 耐热, 长期耐温 220 °C, 短期工作耐温 350 °C;

- (2) 阻燃, 具有自熄性、防伪等级 UL94V-0;
- (3) 耐湿, 受潮后介电性能和机械强度无显著下降;
- (4) 介电性能好, 耐压和电阻高, 介电系数接近空气, 介质损耗低;
- (5) 机械强度好, 柔韧、抗撕、耐压、耐磨;
- (6) 环保, 无毒, 无污染, 不释放有害物质。

2 UPS 中变压器的使用特点

2.1 小型家用 UPS(300 W~500 W)的使用特点

(1) 家用及 SOHO 族的 PC 应用, 利用率相对较低, 且负载通常较小, 一般为间歇性短时使用状态。

(2) 针对以上特征, 多数小型 UPS 做为 BACK-UP 设计, 只针对突发断电异常而设计, 提供 5 min 以内后备电力, 以便做数据存贮和备份, 平时仅在电池电量不足时充电, 消耗功率不足 20%。

(3) 应用环境良好, 通常是在环境优雅的家庭及 OFFICE 中, 环境温度不高(20℃~30℃), 湿度不大(40%~65%), 而且无灰尘、雨水及化学污染的侵蚀。

(4) 寿命要求不高, 同一般家庭消费和办公产品, 5 年以下寿命即满足需要。目前以广东省夏季限电作业标准, 约每隔 2 天市电调休 1 天(此处暂将 UPS 加载前后升降温的温度变化细节等效为工作时间, 即对应为相应温度持续时间)。假设家庭未留意通知导致停电时需启用后备电源机率为 1/5; 同时估算家用小型 UPS 在使用中与停电相撞机率为 1/3; 则实际 UPS 长期带载形态如图 1 所示, 每 $3 \times 5 \times 3 = 45$ 天中有 5 min 是满载工作, 其余时间做为 BACK-UP UPS 只是偶而启动 20% 以下的功率为电池补充电量而已。

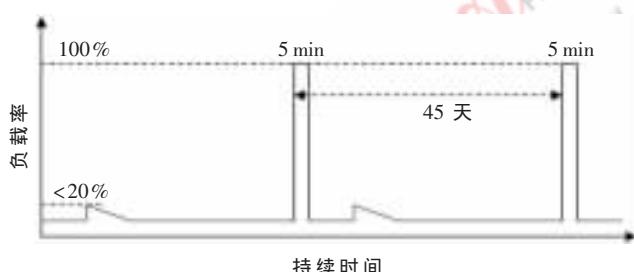


图 1 小型 UPS 长期带载形态

2.2 数据中心大型 UPS(3 kVA~500 kVA) 使用特点

(1) 用电连续性高。因多用于银行、电信、税务、钢厂等重要场所, 绝大多数是除年检、维护时才短时间停用, 基本上是 24h 全天候不间断运行。

(2) 因以上原因, 故而均采用 ON-CINE 设计, 紧急状况下做后备电源, 只是其中的一项功能在平时市电正常供应时, 一直都在负载工作, 对电力质量及下游电力调配做管理。据专业厂家称: 负载率为 40% 左右, 并且由于网络系统庞大, 数据处理和备份较慢, 要求断电时能持续运行至少 45 min, 一般是 1~2h, 军工、冶金等甚至需要满载效率能持续工作数小时。

(3) 工业应用中, 使用环境恶劣, 经常面临高温、高湿、化学污染和露天作业的状况, 这都对产品的防护和寿命造成严重的冲击和挑战。

(4) 做为工业产品和基础设备, 大型 UPS 的寿命要求达到 10~30 年, 其中的一些主要部件, 包括 INVERTER TRANSFORMER 是 UPS 的终身配件, 寿命同样要达到 30 年, 理论上要长于 UPS 保障寿命。

仍以约每隔 2 天, 市电调休 1 天来计算, 对数据中心 UPS 而言, 依停电通知进行发电机供电转换, 约需 45 min 完成繁杂的系统切换, 如果准备不及时则需 90 min 完成大型系统的切换; 又估算突发电率为 1/10; 则预估负载曲线如图 2 所示。40 天中有 $(45 \times 9 + 90)/60 = 8.25$ h 的满载工作机率。

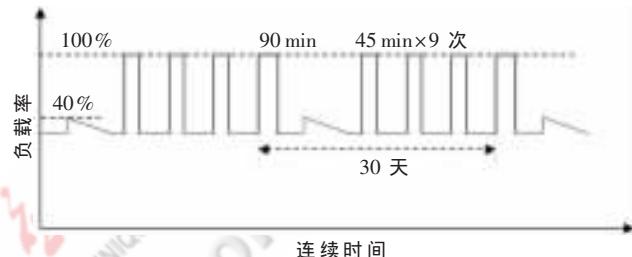


图 2 大型 UPS 预估负载曲线

3 UPS 中变压器的寿命影响因素

3.1 综合因素

如前所述, 目前行业中基本都应用 CLASS H、NOMEX 绝缘变压器^[2]做 UPS INVERTER 部件。针对此类产品的结构, 影响其寿命的关键因素如下:

- (1) 事故发生机率及严重度(短路, 过载, 过压等);
- (2) 变压器的设计水平和制造水平;
- (3) 变压器运行中受到的冷热温度冲击情况;
- (4) 变压器本身绝缘系统的老化规律。

3.2 内在因素

此处着重分析 NOMEX 变压器产品的绝缘系统老化, 即 NOMEX 做为绝缘主体应用在变压器中, 在特定的温度、湿度、电场条件下的老化趋势。

3.2.1 机械性能

- (1) 温度对机械性能的影响, 如图 3 所示^[1]。
- (2) 湿度对机械性能的影响, 如图 4 所示^[1]。

3.2.2 电气性能

- (1) 温度对电气性能的影响, 如图 5 所示^[1]。
- (2) 湿度对电气性能的影响, 如表 1 所示^[1]。
- (3) 不同温度时的电气寿命, 如图 6 所示^[1]。

3.3 电晕作用 (Corona Effect) 的影响

以往, 各国的安规判定均是以耐压测试标准作为基准。如今新的研究证明耐压测试和感应电压测试因为瞬时测试, 在产品寿命的考虑上是不完整的。产品长期工作中, 局部薄弱点会发生微弱电晕效应, 如图 7 所示。这种轻微放电会轰击绝缘材料, 加速其分解和老化, 使其

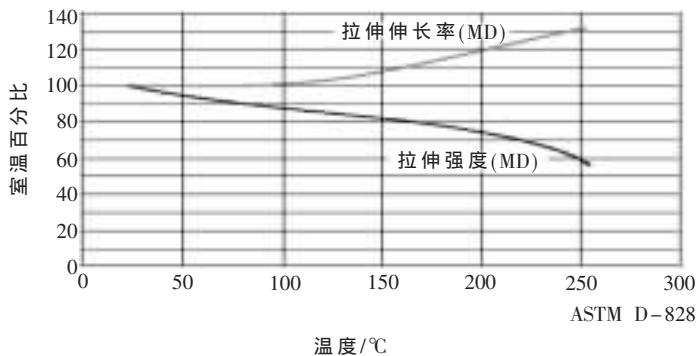


图3 温度对机械性能的影响

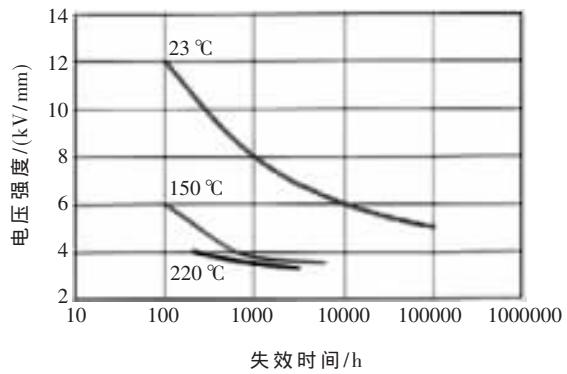
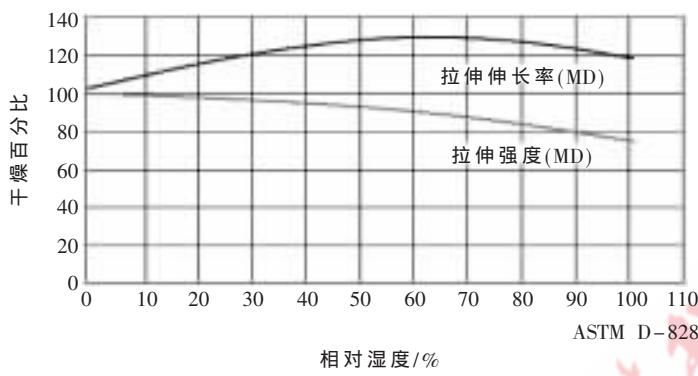
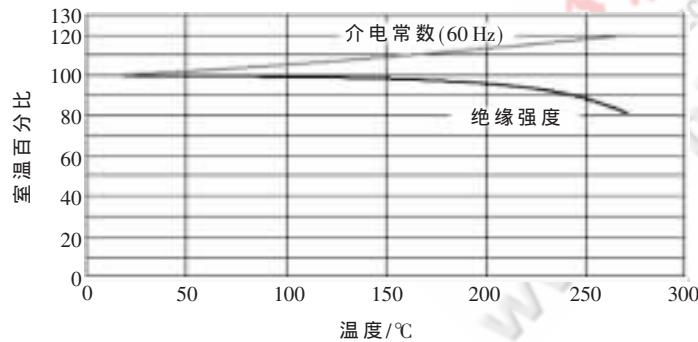
图6 单层NOMEX® 410型0.25mm(10MIL)
在60Hz下的耐电压强度

图4 湿度对机械性能的影响



介电常数-ASTM D-150 绝缘强度-ASTM D-149

图5 温度对电气性能的影响

表1 湿度对电气性能的影响

相对湿度/%		绝干	50	96
绝缘强度	V/mil	850	815	780
	kV/mm	33.5	32.1	30.7
介电常数	60 Hz	2.5	2.7	3.2
	1 kHz	2.3	2.6	3.1
损耗因子	60 Hz×10 ⁷	6	6	11
	1 Hz×10 ⁷	13	14	25
体积电阻率(Ohm.cm)		6×10 ¹²	2×10 ¹⁴	2×10 ¹⁴

寿命以指数级加速下降,但电晕强度与绝缘材料及寿命间的量化关系尚未有权威性公式,故而业界只能在设计上增加绝缘强度让电晕不发生或控制在极弱放电量(2PC)的限度以下。

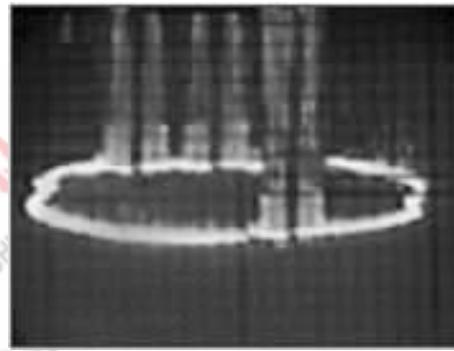


图7 电晕效应

4 Class H(180°)Nomex 绝缘 Inverter 变压器的寿命的试算

针对前述关键因素,即一定温度条件下的电气寿命如何衰减、机械寿命如何衰减做机制性运算。限于篇幅,仅计算对寿命要求较严的数据中心大型UPS中的变压器的寿命情况。

例如以下规格的三相干式变压器:输入电压为交流380 V,50 Hz;Class H 绝缘系统;耐压(Dielectric)要求3 000 V/1 min^[3]。

依 IEC 标准^[4]温升条件如下:最高环境温度40 ℃,热点温差20 ℃,则最高允许温升180 ℃-40 ℃(最高环境温度)-20 ℃(热点温差)=120 ℃。现以温升与绝缘等级恰好相当条件设计,即变压器热点温度180 ℃。

从长期绝缘强度考虑,Dupont 公司对 Nomex 410 无电晕设计建议为绝缘承受的长期耐压应小于1.6 kV/mm,即0.25 mm厚的Nomex 410 长期电压不应高于交流400 V;又 IEC 有定义当绝缘为双层时,每层独立耐压应达到可能承受的强度;故对于交流380 V 的应用中两层0.25 mm 的NX410 恰可符合设计要求,可作为主绝缘。

4.1 绝缘耐压寿命计算

从介电强度(Dielectric)要求,此产品依安全规范要求耐压3 000 V,即每层0.25 NX 失效前需满足耐压3 kV(换算后即为12 kV/mm);当低于此值时即告知此产品

使用寿命终止。

参考 Nomex 410 12 kV/mm 条件的温度老化曲线如图 8 所示, 可知此时的 Arrhenius 公式为:

$$\log Time = \frac{8262}{C+273} - 11.44 \quad (1)$$

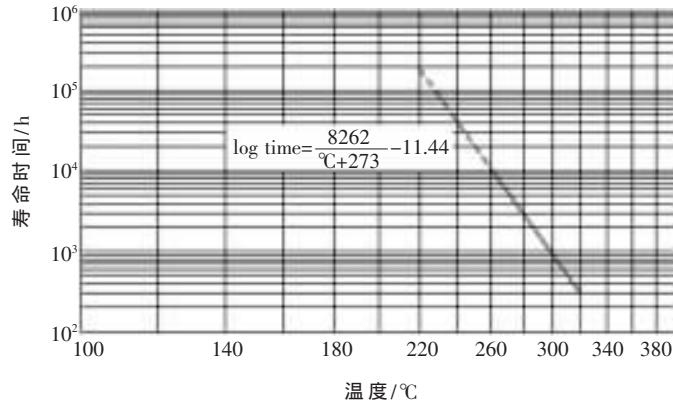


图 8 Nomex 410 12 kV/mm 条件的温度老化曲线

4.1.1 目前设计温升的耐压寿命计算

满载时热点温度 180 ℃。

轻载时变压器带载约 40%, 如图 2。依图 9^[1]所示曲线, 此时温升为满载温升的 25%, 热点温度则为:

$$120 \times 25\% + 40 + 20 = 90 \text{ }^\circ\text{C} \quad (2)$$

将 180 ℃ & 90 ℃ 分别代入公式(1), 计算得出:

$$180 \text{ }^\circ\text{C 时, } Life = 6.286 \times 10^6 \text{ h} \quad (3)$$

$$90 \text{ }^\circ\text{C 时, } Life = 2.091 \times 10^{11} \text{ h} \quad (4)$$

考虑到负载状态(图 2), 每 30 天中, 寿命消耗为:

$$180 \text{ }^\circ\text{C 时, } 8.25 \text{ h} / (6.286 \times 10^6) \text{ h} = 1.312 \times 10^{-6} \quad (5)$$

$$90 \text{ }^\circ\text{C 时, } (720 - 8.25) \text{ h} / (2.091 \times 10^{11}) \text{ h} = 3.404 \times 10^{-9} \quad (6)$$

30 天合计寿命消耗:

$$1.312 \times 10^{-6} + 3.404 \times 10^{-9} = 1.312 \times 10^{-6} \quad (7)$$

产品寿命:

$$Life = 1 / (1.312 \times 10^{-6}) \times 30 \text{ d} = 63 498 \text{ 年} \quad (8)$$

4.1.2 调整设计温升后的耐压寿命对比

如果产品耐温等级和绝缘材料不变的前提下, 把热点温度设计分别减少和增加 20 ℃, 即设计在 140 ℃ 和 220 ℃。此时:

额定负载温升分别为:

$$140 - 40 - 20 = 80 \text{ }^\circ\text{C} \quad (9)$$

$$220 - 40 - 20 = 160 \text{ }^\circ\text{C} \quad (10)$$

它们在 40% 负载时温升分别为:

$$80 \times 25\% = 20 \text{ }^\circ\text{C} \quad (11)$$

$$160 \times 25\% = 40 \text{ }^\circ\text{C} \quad (12)$$

它们在 40% 负载时热点温度分别为:

$$20 + 40 + 20 = 80 \text{ }^\circ\text{C} \quad (13)$$

$$40 + 40 + 20 = 100 \text{ }^\circ\text{C} \quad (14)$$

将 80 ℃ 和 100 ℃ 分别代入 Arrhenius 公式(1), 再以式(2)~(6)算法计算垒加损耗和寿命, 得出:

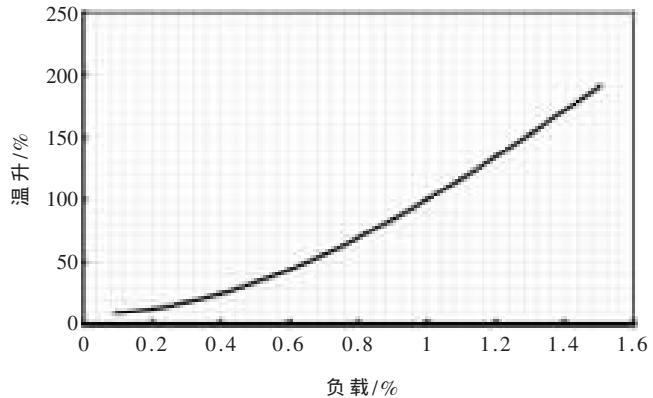


图 9 负载条件下温升曲线

$$\text{热点温度 } 180 \text{ }^\circ\text{C 时, 寿命 } Life = 3.707 \times 10^{-6} \text{ 年} \quad (15)$$

$$\text{热点温度 } 220 \text{ }^\circ\text{C 时, 寿命 } Life = 2101 \text{ 年} \quad (16)$$

4.1.3 超负荷工作试算

假设此 UPS 长期超负荷工作达到绝缘材料的认定耐温极限即 220 ℃。代入公式(1)则其寿命:

$$Life = 23.77 \text{ 年} \quad (17)$$

4.2 机械强度老化计算

因变压器内部绝缘所承受应力非常复杂, 还无法定量对其进行描述。故此处参考 Dupont 公司的建议方案, 以机械强度衰减至一半时认定为失效和寿命终结。如图 10 所示, 0.25 mm 厚的 Nomex 410 的纵剪力老化曲线。

此时的 Arrhenius 公式为:

$$\log Time = \frac{7461}{C+273} - 10.40 \quad (18)$$

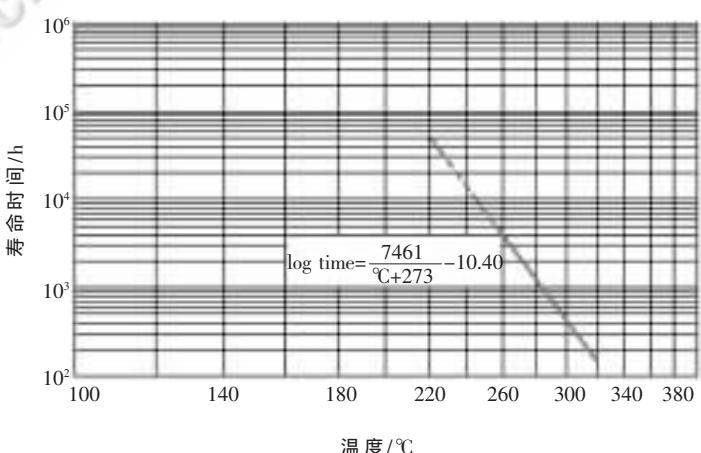


图 10 Nomex 410 的纵剪力老化曲线

4.2.1 目前设计温升的机械寿命计算

满载时热点温度 180 ℃。将最初设计状态的热点温升之满载温升 180 ℃、40% 负载温升 90 ℃ 代入公式(18), 再以算式(2)~(6)算法计算累加损耗和寿命, 计算得到: 热点温度 180 ℃ 时, 寿命 Life=11 872 年。

4.2.2 调整设计温升后的耐压寿命对比

同样产品耐温等级和绝缘材料不变的前提下, 再把

热点温度分别减少和增加 20 ℃, 即设计在 140 ℃ 和 220 ℃。与 4.1.2 中算式(7)~(10)方法相同, 此处不再赘述, 最终将得到: 热点温度 180 ℃ 时, 寿命 $Life=4.671 \times 10^{-5}$ 年; 热点温度 220 ℃ 时, 寿命 $Life=547$ 年。

4.2.3 超负荷工作仿真

假设此 UPS 长期超负荷工作达到绝缘材料的认定耐温极限即 220 ℃。代入公式(18)则其寿命:

$$Life=6.18 \text{ 年} \quad (19)$$

变压器的内在寿命取决于绝缘材料的寿命。绝缘的寿命是一种在热效应、电场效应、应力效应等共同作用下, 随着绝缘强度、机械强度等物理特性老化失效, 而逐渐走向终结的过程。

无论从电气绝缘耐压寿命还是机械强度寿命的对比, 都可以看出, 变压器的工作状态(负载强度), 即产品温升相对于绝缘材料耐温等级的高低关系, 是决定变压器内在寿命的决定因素, 而且影响甚巨。

同时必须注意到, 整个绝缘中的绝缘薄弱点和温度最热点在很大程度上制约了整体寿命。这就要求一方面考虑到不同部位的电压等级和散热特点, 尽可能在电磁学结构设计上做到电场和热量分布相对均匀, 避免奇异点的出现; 另一方面要依据各部位的不同耐压级别和不同温度分布, 选取适当的不同绝缘材料和方案, 也就是所谓的混合绝缘设计(HYBRID INSULATION)。

考虑到电晕效应, 严格的设计(例如前面引用的 Dupont 提供的参考数据)与一般耐压性能相比有相当大的裕量。设计中应考虑电晕的要求做到完美绝缘, 还是依据耐压的要求节约成本, 主要是看应用的电压等级。笔者以为, 在 220 V 电压以下时, 电晕效应的机率较低, 无特别状况的话, 可以依据耐压要求的基准做设计; 而在 380 V

以上时, Corona 效应机率较高, 则应该依据电晕的要求判定做更高强度的绝缘设计。

前述计算结果中发现, 同样的工作条件下, 机械强度寿命要比绝缘强度寿命低很多, 约 3~8 倍的关系。笔者认为主要原因是, Dupont 的 Nomex 更大量地应用于中高压大型电力变压器市场。这些电力变压器都需要有很高的短路力承受能力, 而短路力目前的研究还不太能量化得很准确, Nomex 做为变压器内部主要绝缘材料, 必然要能承受此短路力的冲击而不能损坏, 故而机械强度评估基准相对保守, 是一种明智的选择。

虽然以上试算只是计算了产品内在寿命的极限, 实际运行中, 其他工艺因素和外在因素对寿命的冲击没有考虑在内。但还是明显可看出, 在使用中对 UPS 的合理选配, 尽可能避免过载工作或连续工作, 也是延长变压器及 UPS 寿命的重要方面。

参考文献

- [1] Nomex® Technical Information[P].Dupont.
- [2] UL1446-2007, Standard for Systems of Insulating Materials-General[S].USA : Underwriter Laboratories INC , 2007.
- [3] UL 1778-2005, Uninterruptible Power Systems[S].USA : Underwriter Laboratories INC , 2005.
- [4] IEC 60076-3-2000. Power transformers—Part 3: Insulation levels, dielectric tests and external clearances in air[S]. [IEC] 国际电工委员会标准, 2000.
- [5] GB 1094.3-2003, 电力变压器 第 3 部分: 绝缘水平、绝缘试验和外绝缘空气间隙[S].北京: 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局, 2003.

(收稿日期: 2009-03-20)