

发电厂大容量升压变压器的选择

巨争号

(神华国神集团公司技术研究院, 西安 710065)

摘要:介绍了大容量升压变压器容量的选择依据。在选用三相一体变压器与 3 个单相变压器上,分别从负序电流、运行可靠性、运行损耗、价格及运输方面进行了分析。选择变压器短路阻抗时,既要考虑对短路电流的限制,也要考虑对机组运行稳定性及变压器电压调整率的影响。

关键词:大容量升压变压器;容量;负序电流;可靠性;损耗;短路阻抗

中图分类号:TM 423

文献标志码:B

文章编号:1674-1951(2017)02-0035-03

0 引言

大容量升压变压器是发电厂主要电气元件之一,其容量及结构形式的选择要考虑投资概算,而且由于其体积较大需考虑运输问题,参数(如损耗、短路阻抗)的选择既要考虑运行的经济性,也要考虑对电网短路水平及变压器电压调整率的影响。

1 大容量升压变压器容量的选择

大容量发电机一般采用发电机-变压器组单元接线方式,变压器额定容量应与发电机额定容量配套。一般宜按发电机最大连续容量扣除不能被高压厂用启动/备用变压器替代的高压厂用工作变压器计算负荷进行选择,变压器在正常使用条件下连续输送额定容量时,绕组的平均温升不应超过 65 K^[1],按上述计算厂用负荷后,选择变压器容量应留有一定的裕度。裕度取值并不是越大越好,一般为 10% 左右,因为变压器容量与变压器的尺寸、消耗的有效材料质量、损耗及成本有关,应综合考虑。如某额定功率为 660 MW 的发电机组,其视在功率为 776 MV·A,厂用 6 kV I A 段计算负荷^[2]为 39 235 kW,厂用 6 kV I B 段计算负荷为 37 773 kW,两段备用重复计算负荷为 13 199 kW,该机组总计算负荷为 39 235 + 37 773 - 13 199 = 63 809 (kW),如功率因数取 0.85,则机组总计算负荷为 75.07 MV·A,升压变压器容量可选择为 (776 - 75.07) + (776 - 75.07) × 10% = 771 (MV·A),按变压器标准系列产品,变压器额定容量实际选择为 750 MV·A(反算其裕度为 6.7%)。

2 三相一体变压器与 3 个单相变压器的选择

按 DL 5000—2000《火力发电厂设计技术规程》的相关要求,容量为 300 MW 及以下机组单元接线的主变压器,若不受运输条件的限制,应采用三相变压器,容量为 600 MW 机组单元接线的主变压器应综合运输和制造条件,经技术、经济比较可采用单相或三相变压器^[3],具体分析如下。

2.1 负序电流问题

三相一体变压器无论是三相三柱式铁芯结构还是三相五柱式铁芯结构,3 相磁路不完全对称,而 3 个单相变压器 3 相磁路则完全对称。三相一体式变压器 3 相磁路不对称,使得 3 相空载电流及负载电流数值有差别(相位基本无变化),引起发电机侧有一个不大的负序电流,该负序电流相对于同步转速有 100 Hz 频差,其在发电机转子上感应 100 Hz 电流并引起转子发热,如某 660 MW 机组在发电机带有功率为 578 MW,无功功率为 141 MV·A 时,发电机电流 $I_A = 16\ 013\text{ A}$, $I_B = 16\ 380\text{ A}$, $I_C = 16\ 052\text{ A}$,则负序电流 I 为^[4]

$$I = (I_A + a^2 I_B + a I_C) / 3, \quad (1)$$

式中: $a = e^{j120}$, $a^2 = e^{j240}$ 。

由计算可知,负序电流是复数,复数模值也就是负序电流有效值为 116 A,远小于发电机长期允许的 10% I_e (I_e 为额定电流),引起的转子发热为发电机所允许。3 个单相变压器磁路完全对称,无此问题。

2.2 可靠性问题

由于变压器结构的特殊性,任何变压器故障后就地难以快速修复,需返厂修复,修复工期较长。三相变压器要考虑相间绝缘等问题,结构较单相变压器复杂,故障率相对较高,其可靠性较单相变压器略差;同时,任何一相发生故障,则整个变压器必退出运行。3 个单相变压器组中某相变压器发生故障,

只换故障相即可,只要配置 1 台参数符合要求的备用单相变压器(也可按区域配置 1 台),当故障时经必要试验换上备用相变压器,短时间内可恢复供电。如发电厂距变压器生产厂家较远且运输条件不好或无维修大型三相变压器能力的地区,应尽可能优先选用单相结构的大型变压器。

2.3 损耗问题

变压器的损耗主要由空载损耗和负载损耗等构成^[5]。空载损耗主要是铁芯损耗,由磁滞损耗和涡流损耗构成。磁滞损耗与硅钢片的质量成正比,与磁通密度的平方成正比;涡流损耗与磁通密度的平方、硅钢片厚度的平方、频率的平方及硅钢片的质量成正比。不难看出,在磁通密度及硅钢片厚度相同的情况下,硅钢片质量增加必将导致空载损耗增加。由于三相一体变压器硅钢片质量小于 3 个单相变压器,其空载损耗较 3 个单相变压器小。

负载损耗包括绕组直流电阻损耗、导线中涡流损耗、并联导线间环流损耗和结构件(夹件、钢压板箱壁、铁芯拉板等)的杂质损耗等。在同容量下,三相一体变压器与 3 个单相变压器的直流电阻损耗相同,导线的涡流损耗和导线间环流损耗基本相同,3 个单相变压器结构件杂质损耗比三相一体变压器大。表 1 为三相一体变压器及 3 个单相变压器损耗数据(统计平均值)。

表 1 三相一体变压器及 3 个单相变压器损耗 kW

变压器	空载损耗	负载损耗	总损耗
三相一体 (750 MV·A)	235	1 350	1 585
单相式 (3×250 MV·A)	3×104	3×445	1 647

2.4 损耗投资

选用变压器应对损耗进行评价,即对损耗投资进行评估。负载损耗主要是线圈铜损,变压器容量、电压等参数确定后,其线圈电阻即确定,铜损随负荷的变化而变化。空载损耗与变压器铁芯参数及用量有关,也就是与制造成本有关;空载损耗还与铁芯磁通密度有关,磁通密度越高损耗越大,但不能为降低变压器成本将铁芯磁通密度选得过大,特别是发电厂处于电源首端,变压器运行电压比额定电压高 10% 左右。变压器壳体磁屏蔽结构对变压器损耗也有直接影响,效果良好的磁屏蔽结构可减少变压器损耗,但变压器成本会增加。

将选用合理的磁通密度、良好的磁屏蔽结构所减少的变压器损耗值乘以变压器使用的小时数,得到变压器消耗的总功,按电价计算总功对应的费用,将其值与所增加的变压器制造成本进行比较后评估

损耗投资。

2.5 变压器的运输尺寸及价格

三相一体变压器及 3 个单相变压器运输尺寸及价格(统计平均数据)见表 2。

表 2 三相一体变压器及 3 个单相变压器
运输尺寸及价格

变压器	价格/万元	尺寸(长×宽×高)/m
三相一体(750 MV·A)	2 200	15.0×5.5×5.0
单相式(3×250 MV·A)	3 100	7.0×4.0×4.0

根据铁路运输要求,变压器的外形尺寸一般要求长度小于 7.0 m,宽度小于 3.6 m,高度小于 4.1 m,因此,无论是单相式还是三相一体式的 600~660 MW 发电机组配套用变压器均不能用铁路运输,而只能用公路或水路运输。

价格方面,导线、绝缘件(材)、分接开关及其附件的品牌不会直接影响变压器运行参数,不同品牌会对变压器总报价产生较小的影响,但由于 3 个单相变压器本体用材高于三相一体式变压器,其价格较三相一体式高 800 万元左右。

2.6 三相三柱式与三相五柱式变压器的选择

三相一体变压器铁芯叠片结构有三相三柱铁芯式与三相五柱铁芯式。三相三柱式叠装工艺简单,损耗小。三相五柱式在运输高度受限时往往被优先采用,即在三相三柱式不能满足公路运输高度要求而不得不降低铁轭高度的情况下采用。三相五柱式铁芯磁通分布与相量图如图 1 所示^[5]。

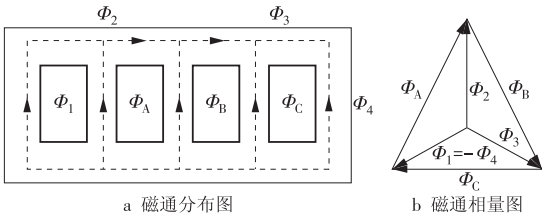


图 1 三相五柱式铁芯磁通分布与相量图

不考虑漏磁通,假定磁通都在铁芯内并用等效正弦波分析,各铁芯柱磁通可表示为

$$\Phi_1 + \Phi_A + \Phi_B + \Phi_C + \Phi_4 = 0, \tag{2}$$

式中: Φ_A, Φ_B, Φ_C 为中心柱主磁通; Φ_1, Φ_4 为边柱磁通。

因为是三相对称正弦波,三相磁通相量为 $\Phi_A + \Phi_B + \Phi_C = 0$, 则 $\Phi_1 = -\Phi_4$, 即 2 个边柱磁通大小相等,方向相反。

分析相量图可知, $\Phi_A = \Phi_2 - \Phi_1, \Phi_B = \Phi_3 - \Phi_2, \Phi_C = \Phi_3 - \Phi_4 = \Phi_1 - \Phi_3$, 即 Φ_A, Φ_B, Φ_C 与 $\Phi_1(\Phi_4), \Phi_2, \Phi_3$ 之间有 $\sqrt{3}$ 倍关系,也就是三相五柱式铁芯变压器铁轭高度为三相三柱式铁芯变压器铁轭高度的 57.7%。由于铁轭和旁柱内磁通降低,

变压器制造高度降低,这在运输高度受限时往往是选择三相五柱式铁芯变压器的原因。

3 短路阻抗的选择

变压器阻抗为变压器带负载运行后,负载电流在变压器一、二次绕组内部及其周围区域产生的漏磁通与一、二次绕组铰链形成的漏电抗,对限制发电厂母线短路电流及电网侧短路电流有作用,但会带来变压器电压调整率增大、变压器损耗增加等问题。

3.1 短路阻抗对限制短路电流的影响

现代电网要求电网发生三相短路时其短路电流不超过 50 kA,新投电源点选择主要电气设备时应考虑电网中、长期规划对上述短路电流的限制(机组增多,短路电流增加)。发电厂主变压器短路阻抗增大除了可以限制本电厂高压母线短路电流外,对系统其他点短路电流也有限制,限制程度还与电厂和系统电气距离、系统容量等因素有关。发电厂高压母线及系统短路电流限制数值,可由发电机、主变压器及系统等效电抗精确计算得到^[4]。如某 600 MW 机组选用短路阻抗为 20% 的变压器较选用短路阻抗为 14% 的变压器,可使电厂高压母线短路电流减少 0.5 kA 左右。

3.2 短路阻抗对机组稳定性的影响

短路阻抗增加相当于增大了机组与系统间电气距离,由于发电机静态稳定性和发电机与系统间的阻抗成反比,短路阻抗增加,会导致机组静态稳定性降低。

3.3 短路阻抗对变压器电压调整率的影响

变压器带负载后,内部漏抗产生电压降,二次电压 U_2 与空载电压 U_{2N} 不相等,电压调整率可以反映二次电压变化程度,其值与变压器短路阻抗的电阻分量、电抗分量及负载电流性质有关,电压调整率 Δu 可表示为^[5]

$$\Delta u = \frac{U_{2N} - U_2}{U_{2N}} \times 100\% = [U_{KR} \cos \varphi + U_{KX} \sin \varphi + \frac{1}{200}(U_{KX} \cos \varphi - U_{KR} \sin \varphi)^2] \times 100\% , \quad (3)$$

式中: Δu 为电压调整率; U_{KR} 为短路阻抗电阻分量;

(上接第 34 页)结垢,提高机组的安全经济性能是一个非常大的课题,今后我们将继续努力,加强研究,防止热力设备因腐蚀而损坏,为确保机组的安全、经济、稳定运行做出应有的贡献。

参考文献:

[1] 工业循环冷却水处理设计规范:GB 50050—2007[S].

U_{KX} 为短路阻抗电抗分量; $\cos \varphi$ 为负载功率因数; U_{2N} 为二次空载电压; U_2 为额定功率因数及额定负载电流下的二次负载电压,从运行角度考虑,希望其越小越好,这就要求短路阻抗不宜过大。

3.4 短路阻抗与变压器损耗的关系

调整变压器短路阻抗,通常通过调整变压器铁芯直径和绕组参数等来实现。提高变压器短路阻抗,必然有较多的绕组漏磁通与高、低压绕组铰链,漏磁通的增加所带来的突出问题是绕组和结构件内的杂散损耗增加。某容量为 750 MV·A 的变压器,短路阻抗为 14% 及 20% 时,变压器损耗值差为 60 kW 左右,每年损耗电量 30 MW·h(年利用小时数按 5000 计算)。

4 结束语

发电厂大容量升压变压器容量选择应与发电机额定容量配套并考虑厂用计算负荷,同时还要留有裕度。在三相一体与 3 个单相变压器组选择上,提出了在运输条件许可时,综合考虑损耗、可靠性及投资概算等,应优先选用三相一体式变压器。变压器短路阻抗选择在满足电网短路水平前提下,应考虑其对变压器损耗及运行电压调整率的影响。

参考文献:

[1] 大中型火力发电厂设计规范:GB 506620—2011[S].
[2] 火力发电厂厂用电设计技术规程:DL/T 5153—2014[S].
[3] 火力发电厂设计技术规程:DL 5000—2000[S].
[4] 傅知兰. 电力系统电气设备选择与实用计算[M]. 北京:中国电力出版社,2004.
[5] 谢毓城. 电力变压器手册[M]. 北京:机械工业出版社,2003.

(本文责编:刘芳)

作者简介:

巨争号(1963—),男,陕西扶风人,高级工程师(教授级),从事电气及自动化专业运行与管理工作(E-mail:sd005616@163.com)。

[2] 李本高. 现代工业水处理技术与应用[M]. 北京:中国石化出版社,2004.

(本文责编:刘芳)

作者简介:

潘丽娜(1975—),女,山东威海人,工程师,从事大型火力发电厂化学监督工作(E-mail:panrena@163.com)。