

考虑大规模新能源接入的变压器热寿命损失分析

付豪^{1,3}, 杨星磊², 张斌², 王泉¹, 屈梦然¹

(1. 三峡大学电气与新能源学院, 湖北 宜昌 443002; 2. 国网湖北省电力有限公司宜昌供电公司, 湖北 宜昌 443002;
3. 国网江苏省电力有限公司宿迁供电公司, 江苏 宿迁 223800)

摘要:大规模新能源接入变电站带来过载、谐波、短路等问题,进而导致变压器等重要电力设备使用寿命缩短,研究变压器的热寿命损失对分析电网经济运行意义重大。该文对变压器在谐波电流作用下的功率损耗进行量化分析,引出负载系数,同时在此基础上给出考虑负载系数与谐波畸变率的热点温度计算方法。此外,考虑变压器突发短路这一特殊情况,改进绕组热点温度的计算方法,并基于热点温度建立变压器热寿命损失模型。最后,通过对某35 kV变压器的仿真分析,得出结论:在考虑新能源接入的情况下,过载运行使变压器热寿命损失急剧增大,而谐波与短路对变压器热寿命的影响甚微。

关键词:新能源接入;负载系数;谐波畸变;变压器热寿命损失

DOI:10.19781/j.issn.1673-9140.2020.06.007 中图分类号:TM411 文章编号:1673-9140(2020)06-0053-08

Analysis of transformer thermal life loss considering large-scale new energy resources access

FU Hao^{1,3}, YANG Xinglei², ZHANG Bin², WANG Quan¹, QU Mengran¹

(1. College of Electrical Engineering & New Energy, China Three Gorges University, Yichang 443002, China;
2. Yichang Electric Power Company, State Grid Hubei Electric Power Co., Ltd., Yichang 443002, China;
3. Suqian Electric Power Company, State Grid Jiangsu Electric Power Co., Ltd., Suqian 223800, China)

Abstract: The large-scale new energy accessed into a substation would bring in problems of the overload, harmonic and short circuit and then affects the life of power appliances. Therefore, it is of great significance to study the thermal life loss of transformer for the grid economic operation. Firstly, the power loss of the transformer in harmonic current is analyzed quantitatively and the load factor is derived simultaneously. On this basis, the calculation method of hot spot temperature considering the load factor and harmonic distortion rate is given. Then, considering the special case of sudden short-circuit of transformer, the calculation method for the winding hot spot temperature is improved. Thirdly, the thermal life loss model based on the hot spot temperature of the transformer is established. Finally, the simulation analysis of a 35 kV transformer is included for verification. It is shown that after new energy resources access, the overload operation causes the great increase of the thermal life loss while the harmonic and short-circuit have little effect on the thermal life.

Key words: new energy resources access; load factor; harmonic distortion; transformer thermal life loss

近年来,因环境污染与能源紧缺问题,新能源得以迅速发展。随着新能源大规模地被接入电网,其随机性、波动性等特点使得电网中大量的设备处于经常性的过载运行状态^[1-2]。同时,由于新能源系统中一般都配有电力电子装置,使得并网电流存在较高的谐波畸变率^[3]。

此外,新能源电站选址较为偏僻,恶劣的自然环境容易诱发短路事故的发生^[4]。过载、谐波、短路等问题不仅给电网的安全可靠运行带来了一定的挑战,更会造成电网中的电力设备使用寿命缩短^[5]。变压器是电网中最重要和最昂贵的电力设备之一,研究变压器在新能源接入情况下的热寿命损失,对降低整个电网的运维成本有着十分重要的意义^[6-7]。

绕组热点温度是决定油浸式变压器热寿命的一个重要参数,准确得到变压器的热点温度对变压器的经济运行至关重要^[8-9]。由于在工程中对变压器绕组温度的直接测量有一定的难度,故目前大多采用间接计算热点温度的方法。文献[10]通过建立变压器内温场热传导模型计算热点温度;文献[11]采用热点类比法建立变压器热路模型计算热点温度。而实际上应用最为广泛的是 IEC 354 标准中推荐的热点温度计算的模型^[12],此方法简单易行,但是在有些情况下精度不够。

当变压器处于过载运行状态时,负载电流升高,绕组热点温度会急剧升高,热寿命的损失也随之加快^[13]。而当变压器接入新能源这种非线性负荷时,其产生的谐波电流会使变压器出现谐波附加损耗,从而加大了变压器热寿命的损失。在变压器谐波附加损耗的研究中,文献[14]通过引入交流电阻系数来计算谐波损耗。IEEE Std C57.110 标准通过引入两个谐波损耗因子来计算谐波损耗^[15],该方法计算简单,但是没有考虑高频谐波对绕组电阻损耗的影响,计算所得的值会偏小。当变压器突发短路情况时,其绕组温度会随着短路电流急剧升高,虽然持续时间短,依然会造成变压器一定的热寿命损失,GB 1094.5 导则中给出了变压器突发短路后热稳定平均温度的计算公式^[16]。

该文首先分析新能源接入下的变压器发热机理,然后在 IEEE Std C57.110 标准的基础上定义绕组电阻谐波损耗因子以完善谐波电流作用下的功率损耗公式,并从中引出一个负载系数 $K_{1/R}$,进而对

IEC 354 标准推荐的热点温度经验公式进行改进以获得更为精确的热点温度。同时,提出一种变压器在突发短路下绕组热点温升的改进计算方法^[17]。最后,基于 IEC 354 标准推荐的绝缘等值老化模型计算接入新能源的变压器热寿命损失。

1 新能源接入的变压器发热分析

变压器损耗可以表示为

$$P_{\text{TOTAL}} = \underbrace{\delta_h f B_m^2 + \delta_e f^2 B_m^2}_{P_{\text{NL}}} + \underbrace{P_{I^2R} + \overbrace{P_{\text{EC}} + P_{\text{OSL}}}^{P_{\text{SL}}}}_{P_{\text{LL}}} \quad (1)$$

式中 P_{TOTAL} 为变压器总损耗; P_{NL} 为空载损耗; P_{LL} 为负载损耗; P_{SL} 为附加损耗; $\delta_h f B_m^2$ 为铁心中的磁滞损耗; $\delta_e f^2 B_m^2$ 为铁心中的涡流损耗; f 为电流频率; B_m 为磁通密度的最大值; P_{I^2R} 为绕组电阻损耗; P_{EC} 为绕组中的涡流损耗; P_{OSL} 为杂散损耗。

其中,由于在变压器运行过程中,空载损耗一般变化不大,所以变压器的热点温升主要受负载损耗的影响,负载损耗一般可分为绕组电阻损耗、绕组涡流损耗和杂散损耗,其中绕组的电阻损耗和涡流损耗导致了变压器绕组温度的升高,而由漏磁在铁心、夹件中引起的杂散损耗导致了变压器内部油温度的升高。

大规模新能源接入到变电站,变压器将面临过载运行、谐波畸变以及频繁短路的问题。过载运行下的负载损耗随负载电流迅速升高,其发出的热量导致变压器最热点温度也随之升高。同时,谐波电流作用下的变压器负载损耗较之额定工况下会有额外的增加。变压器在突发短路情况下,绕组热点温度会随短路电流急剧升高,会在短时间内产生高额的热量。所以,新能源接入变电站,变压器的发热量会随负载损耗的升高而升高。

2 考虑负载系数与谐波畸变率的变压器负载损耗分析

2.1 谐波电流作用下的附加损耗

附加损耗 P_{SL} 定义为由于变压器绕组、铁心、铁心夹等中的漏磁通所引起的损耗。可细分为绕组涡

流损耗 P_{EC} 和杂散损耗 P_{OSL} , 计算 2 种损耗的公式为

$$P_{EC} = F_{HL_EC} \cdot P_{EC_O} = \left(\frac{I_1}{I_R}\right)^2 \cdot F_{HL_EC} \cdot P_{EC_R} \quad (2)$$

$$P_{OSL} = F_{HL_OSL} \cdot P_{OSL_O} = \left(\frac{I_1}{I_R}\right)^2 \cdot F_{HL_OSL} \cdot P_{OSL_R} \quad (3)$$

式(2)、(3)中 P_{EC_O} 、 P_{OSL_O} 分别为基波电流作用下的绕组涡流损耗与杂散损耗; P_{EC_R} 、 P_{OSL_R} 分别为额定运行条件下的绕组涡流损耗与杂散损耗; I_1 为基波电流; I_R 为额定电流; F_{HL_EC} 、 F_{HL_OSL} 分别为绕组涡流谐波损耗因子与杂散谐波损耗因子, F_{HL_EC} 、 F_{HL_OSL} 在 IEEE Std C57.110 中的定义分别为

$$F_{HL_EC} = \frac{\sum_{h=1}^{h_{\max}} \left(\frac{I_h}{I_1}\right)^2 h^2}{\sum_{h=1}^{h_{\max}} \left(\frac{I_h}{I_1}\right)^2} \quad (4)$$

$$F_{HL_OSL} = \frac{\sum_{h=1}^{h_{\max}} \left(\frac{I_h}{I_1}\right)^2 h^{0.8}}{\sum_{h=1}^{h_{\max}} \left(\frac{I_h}{I_1}\right)^2} \quad (5)$$

式(4)、(5)中 h 为谐波电流次数; h_{\max} 为最高谐波电流次数; I_h 为 h 次谐波电流。

大量研究表明, 绕组电阻损耗约占负载损耗的 80%, 绕组涡流损耗约占附加损耗的 33%^[18]。所以, 只需要变压器额定负载损耗 P_{LL_R} 以及各次谐波电流 I_h , 就可以利用式(2)~(5)计算出谐波电流作用下的附加损耗。

2.2 谐波电流作用下的绕组电阻损耗

当谐波电流作用于变压器时, 其内部参数在集肤效应的影响下^[19]会发生很大的变化。其中, 单位长度的电阻 r_h 的计算公式为

$$\begin{cases} r_h = \frac{1}{2\pi b \sigma \delta_c} \\ \delta_c = \sqrt{\frac{2}{\omega \mu \sigma}} \end{cases} \Rightarrow r_h = \sqrt{\frac{\omega \mu}{8\pi^2 b^2 \sigma}} \quad (6)$$

式中 ω 为工作频率; μ 为导体的绝对磁导率; b 为导体半径; σ 为电导率; δ_c 为集肤深度。由式(6)可以看出, 以基波频率下的电阻为基准, 各次谐波电

阻值为基准值的 $h^{0.5}$ 倍。因此, 谐波电流作用下的绕组电阻损耗的表达式为

$$P_{I^2R} = 3 \sum_{h=1}^{h_{\max}} (I_{h(1)}^2 R_{h(1)} + I_{h(2)}^2 R_{h(2)} + I_{h(m)}^2 R_{h(m)}) \quad (7)$$

式中 $I_{h(1)}$ 、 $I_{h(2)}$ 分别为变压器一次、二次侧所加的谐波电流; $R_{h(1)}$ 、 $R_{h(2)}$ 分别为第 h 次谐波电流作用下的变压器一次、二次侧绕组的电阻; $I_{h(m)}$ 、 $R_{h(m)}$ 分别为第 h 次谐波电流作用下的激磁电流和激磁电阻。

但是, 该方法所需参数繁多, 计算复杂。因此, 类比绕组涡流谐波损耗因子与杂散谐波损耗因子, 引入一个绕组电阻谐波损耗因子 $F_{HL_I^2R}$ 。由式(6)、(7)可以得到:

$$P_{I^2R} \propto I^2 R \propto I^2 \cdot h^{0.5} \quad (8)$$

根据式(8), 绕组电阻谐波损耗因子 $F_{HL_I^2R}$ 可以定义为

$$F_{HL_I^2R} = \frac{\sum_{h=1}^{h_{\max}} \left(\frac{I_h}{I_1}\right)^2 h^{0.5}}{\sum_{h=1}^{h_{\max}} \left(\frac{I_h}{I_1}\right)^2} \quad (9)$$

从而谐波电流作用下的绕组电阻损耗的计算为

$$P_{I^2R} = F_{HL_I^2R} \cdot P_{I^2R_O} = \left(\frac{I_1}{I_R}\right)^2 \cdot F_{HL_I^2R} \cdot P_{I^2R_R} \quad (10)$$

式中 $P_{I^2R_O}$ 为基波电流作用下的绕组电阻损耗; $P_{I^2R_R}$ 为额定运行条件下的绕组涡流损耗。

2.3 考虑负载系数与谐波畸变率的负载损耗计算

利用式(2)~(5)、(9)、(10), 可以计算出绕组涡流损耗、杂散损耗、绕组电阻损耗, 叠加后可求得谐波电流作用下的变压器负载损耗, 即

$$P_{LL} = P_{I^2R} + P_{EC} + P_{OSL} = \left(\frac{I_1}{I_R}\right)^2 (F_{HL_I^2R} P_{I^2R_R} + F_{HL_EC} P_{EC_R} + F_{HL_OSL} P_{OSL_R}) \quad (11)$$

在以往的研究中, 通常将任意负载的电流与额定电流的比值 I/I_R 近似看作变压器的负载率^[20], 但是复杂的电流成分使负载率的值难以确定。因此, 这里引入了负载系数 $K_{1/R}$, 即基波电流与额定电流的比值 I_1/I_R 。由于高次谐波电流相对于基波

电流来说含量较小,所以负载系数 $K_{1/R}$ 可以很大程度上表示变压器的负载率,更重要的是, $K_{1/R}$ 值容易获取,对变压器热寿命损失的量化分析有很大的帮助。因此,式(11)可以改写为

$$P_{LL} = K_{1/R}^2 (F_{HL_{1^2R}} P_{1^2R,R} + F_{HL_{EC}} P_{EC,R} + F_{HL_{OSL}} P_{OSL,R}) \quad (12)$$

3 考虑新能源接入的变压器热点温度计算

3.1 考虑负载系数与谐波畸变率的热点温度计算

IEC 354 标准中给出了不同冷却方式下的热点温度估算公式,但是这种方法没有考虑到谐波电流的影响,不适用于该文的研究。因此,以自然风冷(ONAN)方式的油浸式变压器为例,对 IEC 354 标准中的热点温度估算公式进行改进:

$$\theta_h = \theta_a + \Delta\theta_{or} + \Delta\theta_{gr} \quad (13)$$

式中 θ_h 为热点温度; θ_a 为环境温度; $\Delta\theta_{or}$ 为顶层油温升; $\Delta\theta_{gr}$ 为热点对顶层油的温度差。

基于变压器发热机理的研究, $\Delta\theta_{or}$ 与 $\Delta\theta_{gr}$ 的计算公式分别为

$$\Delta\theta_{or} = \Delta\theta_{or,R} \cdot \left(\frac{P_{NL} + P_{LL}}{P_{NL} + P_{LL,R}} \right)^{0.8} \quad (14)$$

$$\Delta\theta_{gr} = Hg_r \cdot \left(\frac{P_{1^2R} + P_{EC}}{P_{1^2R,R} + P_{EC,R}} \right)^{0.8} \quad (15)$$

式中 $\Delta\theta_{or,R}$ 为额定运行条件下的顶层油温升; Hg_r 为额定运行条件下热点对顶层油的温度差。由于 $\Delta\theta_{gr}$ 为绕组热点对顶层油的温度差,所以只考虑绕组电阻损耗与绕组涡流损耗的影响,如式(15)所示。利用式(13)~(15)便可以计算出相对 IEC 354 标准给出的估算温度更为精确的热点温度。

3.2 考虑突发短路下的变压器绕组热点温度计算

突发短路下变压器的热寿命损失往往由于短路时间短暂而被忽略。然而,经过变压器发热机理的分析可知,变压器在突发短路情况下的发热量与短路电流的平方成正比,而短路电流的大小由变压器短路阻抗决定。对于中小容量的配电变压器,因其短路阻抗小,突发短路时的短路电流与发热量将非常大,即使时间短暂,变压器绕组热点温度也会随之大幅度升高。所以对变压器突发短路情况下的绕组

热点温度的研究有着一定的意义。

突发短路情况下的绕组热点温度变化可分为 2 个过程:①短路故障持续时间里的绕组温升过程;②短路故障解除后的绕组散热过程。这里引入均匀物体发热冷却方程式:

$$P dt = CG d\tau + K_r F \tau dt \quad (16)$$

式中 P 为产生热量的总损耗; t 为时间, s; G 为质量, kg; C 为比热容, $W \cdot s / (kg \cdot ^\circ C)$; K_r 为散热系数, $W / (m^2 \cdot ^\circ C)$; F 为散热表面积, m^2 ; τ 为超过周围介质的温升, $^\circ C$ 。

1) 绕组温升过程。

由于现代继电保护技术的成熟,变压器外部突发短路的持续时间很短,一般仅有几秒钟。这种情况下,可以认为热量没有向四周散出,且假定该过程中负载恒定,则式(16)可以表示为

$$Pt = CG \Delta\theta_h \quad (17)$$

$$P = I^2 R = (JA)^2 \cdot \rho \frac{l}{A} = J^2 \rho \frac{l}{\gamma} G \times 10^3 \quad (18)$$

$$G = A l \gamma \times 10^{-3} \quad (19)$$

式中 A 为导线截面积, mm^2 ; l 为导线长度, m; γ 为密度, kg/dm^3 。

将式(18)、(19)代入式(17),得:

$$\Delta\theta_h = \frac{\rho}{\gamma C} J^2 t \times 10^3 \quad (20)$$

式中 t 为短路电流持续时间; $\Delta\theta_h$ 为绕组稳定温升; J 为电流密度, A/mm^2 ; ρ 为电阻系数, $\Omega \cdot m \times 10^{-6}$ 。以铜导线为例,相关系数取值为 $\gamma = 8.894$, $C = 398.4$ 。不同温度下的电阻系数为

$$\rho = \rho_{100} \left(\frac{235 + \theta_h}{235 + 100} \right), \rho_{100} = 0.0224$$

鉴于 ρ 为一个变化值,这里假设温度在 $\theta_{h0} \sim \theta_{h1}$ 的区间内电阻系数的变化为线性,取其平均值为

$$\rho = \frac{\rho_{\theta_0} + \rho_{\theta_h}}{2} = \frac{470 + 2\theta_0 + \Delta\theta_h}{29911} \quad (21)$$

式中 θ_0 为绕组初始温度。

将式(21)及相关系数代入式(20),整理得:

$$\Delta\theta_h = \frac{470 + 2\theta_0}{\frac{105984}{J^2 t} - 1} \quad (22)$$

最终,绕组温升过程中的绕组热稳定温度为

$$\theta_h = \theta_0 + \Delta\theta_h \quad (23)$$

2) 绕组散热过程。

该过程中没有产生新的热量,故 $P = 0$, 发热冷却方程式(16)表示为

$$CGd\tau(t) + K_r F\tau(t)dt = 0 \quad (24)$$

给定初始状态为 $\tau(0) = \theta_1 - \theta_a$, θ_1 为式(23)求得的最最终绕组稳定温度, θ_a 为环境温度。求解微分方程(24),得:

$$\tau(t) = (\theta_1 - \theta_a)e^{-\frac{K_r F}{CG}t} \quad (25)$$

从而绕组温升过程中的绕组温度表达式为

$$\theta_h = \theta_a + \tau(t) \quad (26)$$

4 基于热点温度的变压器热寿命损失计算

IEC 60076 标准中推荐绝缘等值老化模型,给出了相对老化速率 V 的定义,即给定热点温度下变压器固体绝缘相对于参考热点温度下的老化速率。参考热点温度为 $98\text{ }^\circ\text{C}$, 相对老化速率:

$$V = 2^{(\theta_h - 98)/6} \quad (27)$$

同时,该标准也给出了基于相对热老化速率下的热寿命损失 L 的计算公式:

$$L = \int_{t_2}^{t_1} V dt \quad (28)$$

式中 V 为对应时间 t 的相对老化速率; t_1 、 t_2 分别为热寿命损失计算的起始、结束时间。在一定时间范围内的热寿命相对损失:

$$L(\%) = \frac{\int_{t_2}^{t_1} V dt}{t_2 - t_1} \times 100\% \quad (29)$$

5 算例分析

某三相双绕组油浸式变压器的具体参数如表 1 所示。

表 1 变压器参数

Table 1 Transformer parameters

型号	额定空载损耗/W	额定短路损耗/W	短路阻抗/%	高压绕组电流密度/(A/mm ²)	低压绕组电流密度/(A/mm ²)
S9-1600/35	2 100	17 550	6.5	4.5	3.4

5.1 负载系数及谐波畸变率对热寿命损失的影响分析

给定谐波电流含量如表 2 所示。在谐波畸变率固定的情况下,变压器热寿命的相对损失随负载系数变化的曲线如图 1 所示。在负载系数及谐波畸变率的共同影响下,由图 1 进一步得到变压器热寿命相对损失的变化曲线,如图 2 所示。

从图 1 可以看出,在不同的谐波畸变率下,变压器热寿命损失均随负载系数的增加而增加。而当负载系数达到 0.9 时,热寿命损失出现了显著的增加。同时,当谐波畸变率较高时,热寿命损失增加的速度也较快。结合图 2 可以看出,变压器热寿命损失受负载系数影响较大,受谐波畸变率的影响较小。

表 2 变压器的谐波电流含量

Table 2 Harmonic current contents of the transformer

h	$(I_h/I_1)/\%$	h	$(I_h/I_1)/\%$
1	1.00	13	1.33
5	8.28	17	0.69
7	5.06	19	0.46
11	2.07		

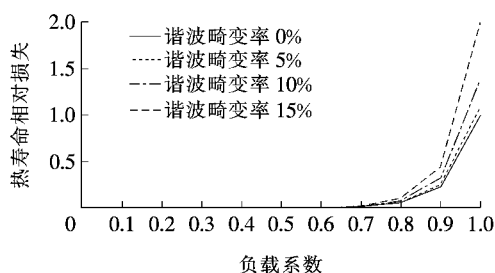


图 1 不同谐波畸变率下热寿命相对损失与负载系数的关系

Figure 1 Relationship between the transformer thermal life relative loss and the load factor under different harmonic distortions

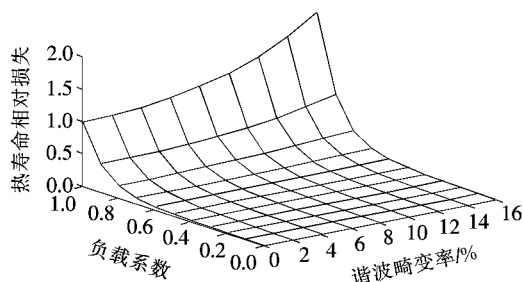


图 2 热寿命相对损失与负载系数及谐波畸变率的关系

Figure 2 Relationship of the transformer thermal life relative loss, load factor, and the harmonic distortion

5.2 变压器接入光伏电站前、后的热寿命损失比较

在接入光伏电站后,该变压器的日负载系数和环境温度变化曲线近似为

$$K_{1/R} = \begin{cases} -0.0168t^2 + 0.4034t - 1.3151, & 6 \leq t \leq 18 \\ 0.5, & \text{其他} \end{cases}$$

在接入光伏电站前,变压器的负载系数曲线较为平稳,未出现过载运行状态。在接入光伏电站后,负载系数会随着光照强度的变化而变化,并在正午时分出现持续的过载状态,如图 3 所示。为了便于分析,假设日负载系数为恒定值,在保证接入前、后日输出功率不变的前提下,取 $K_{1/R} = 0.71$ 。同时,中国能源行业标准规定,注入电网的电流谐波总畸变率限值为 5%。

利用该文提出的热寿命计算模型,分别计算接入光伏电站前、后变压器运行一天的热寿命损失值,如表 3 所示,可以看出,接入光伏电站后热寿命损失值因过载运行状态的出现而大大地提高了,而热寿命损失在谐波电流的影响下只出现了小幅度的增加。这进一步验证了接入光伏电站后的变压器热寿命损失受过载运行影响较大,受谐波影响较小。

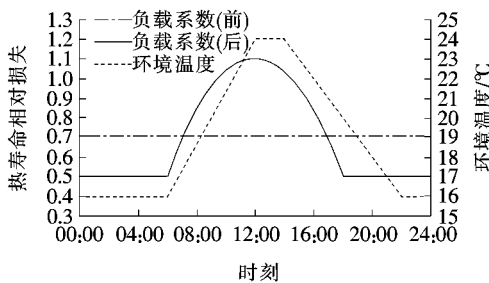


图 3 日负载系数和环境温度变化曲线

Figure 3 Curves of day load factor and ambient temperature

表 3 接入光伏电站前、后变压器运行一天的热寿命损失比较

Table 3 Comparison of the thermal life loss of the transformer running one day before and after the access to new energy

接入光伏电站	负载状态	谐波畸变率/%	热寿命损失/h
接入前	负荷平稳	0	0.50
	无过载	5	0.51
接入后	负荷波动	0	21.62
	含过载	5	23.58

5.3 变压器突发短路的热寿命损失计算

根据给定的变压器参数,利用式(22)、(23)可以得到变压器在突发短路下的绕组温度变化曲线,如图 4 所示。

基于绕组温度,根据式(27)、(28)计算该变压器在突发短路情况下的热寿命损失值。当给变压器串联电抗器以限制短路电流时,计算此时变压器在突发短路情况下的热寿命损失值。结果如表 4 所示。假定短路电流持续时间为 2 s,初始绕组稳定温度为 105 °C,环境温度为 20 °C,将绕组热稳定温度降至 98 °C 的过程认为是绕组降温过程。

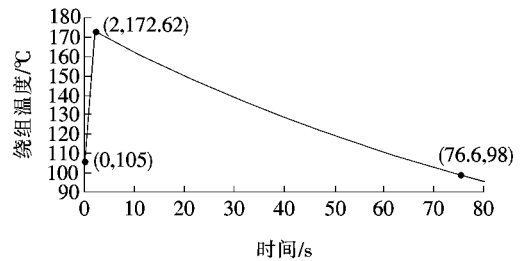


图 4 突发短路下的绕组温度变化曲线

Figure 4 The temperature variation curve of the winding under sudden short circuit

表 4 串联电抗器前、后变压器突发短路下的热寿命损失比较

Table 4 Comparison of thermal life loss of transformer burst short circuit with and without reactor in series

接入电抗器	短路阻抗/%	热稳定温度/°C	热寿命损失/h
串联前	6.5	172.62	10.70
串联后	8.0	148.18	0.77

如表 4 所示,未串联电抗器的变压器在单次短路下的热寿命损失为 10.70 h,在接入新能源后,短路故障发生的频率有了明显的增高,变压器的热寿命损失也随之增加。而给变压器串联电抗器限制其短路电流之后,单次短路下的变压器热寿命损失几乎可以忽略不计。因此,接入新能源的变压器在突发短路下的热寿命损失的多少取决于该变压器短路阻抗的大小。

6 结语

该文研究了接入新能源情况下的谐波、过载运

行、短路对变压器热寿命损失的影响。改进了考虑绕组电阻谐波损耗的变压器谐波损耗计算方法,同时引入了负载系数的概念,修正了经典热点温度估算公式以获得更为精确的热点温度。基于均匀发热冷却方程式,改进了变压器在突发短路情况下的绕组温度计算方法。最后,基于等值老化模型对变压器热寿命损失进行有效计算。

在考虑接入新能源的情况下,通过算例分析,发现过载运行对变压器热寿命的影响最大,谐波电流对变压器热寿命的影响比较小。单次短路对变压器热寿命的威胁不大,但多次短路仍会对变压器的热寿命造成一定的损失。

参考文献:

- [1] 肖安南,张蔚翔,张超,等.含光伏发电与储能的配电网基于源—网—荷互动模式下电压安全最优控制策略[J].电力科学与技术学报,2020,35(2):120-127.
XIAO Annan,ZHANG Weixiang,ZHANG Chao,et al. Voltage security optimal control strategy of distribution network with PVs and ESs under "Source-Grid-Load" interaction[J]. Journal of Electric Power Science and Technology,2020,35(2):120-127.
- [2] 张迪,苗世洪,赵健,等.分布式发电市场化环境下扶贫光伏布点定容双层优化模型研究[J].电工技术学报,2019,34(10):1999-2010.
ZHANG Di,MIAO Shihong,ZHAO Jian,et al. A bi-level locating and sizing optimal model for poverty alleviation PVs considering the marketization environment of distributed generation [J]. Transactions of China Electrotechnical Society,2019,34(10):1999-2010.
- [3] 郑涛,黄予园,宗伟,等.光伏并网系统故障二次谐波产生机理及其对变压器保护的影响[J].电力系统保护与控制,2020,48(12):13-22.
ZHENG Tao,HUANG Yuyuan,ZONG Wei,et al. Second harmonic generation mechanism of a photovoltaic grid-connected system fault and its influence on transformer protection [J]. Power System Protection and Control,2020,48(12):13-22.
- [4] 李典阳,张育杰,王善渊,等.基于多预测模型融合的电
- 力变压器安全预判[J].中国电力,2020,53(1):72-80.
LI Dianyong,ZHANG Yujie,WANG Shanyuan,et al. Safetyprejudging method for power transformer based on multi-prediction model fusion[J]. Electric Power,2020,53(1):72-80.
- [5] 康兵,杨勇,李振兴,等.基于实际运行数据的配电变压器故障原因多维度分析[J].智慧电力,2019,47(3):66-70+116.
KANG Bing,YANG Yong,LI Zhenxing,et al. Multidimensional analysis of causes of distribution transformer fault based on actual operation data[J]. Smart Power,2019,47(3):66-70+116.
- [6] 曾元静.大型光伏电站发电功率预测及其接入对电网影响的分析[D].南京:东南大学,2016.
- [7] 马瑞,熊龙珠.综合考虑风电及负荷不确定性影响的电力系统经济调度[J].电力科学与技术学报,2012,27(3):41-46.
MA Rui,XIONG Longzhu. Power system economic dispatching considering the impact of wind powers and loads uncertainty[J]. Journal of Electric Power Science and Technology,2012,27(3):41-46.
- [8] 闵英杰,吴广宁,周利军,等.变压器热点温度和等值老化热特征参数的研究[J].高压电器,2012,48(2):50-54.
MIN Yingjie,WU Guangning,ZHOU Lijun,et al. Influences of thermal characteristic parameters on power transformer's hot-spot temperature and equivalent aging[J]. High Voltage Apparatus,2012,48(2):50-54.
- [9] 廖才波,阮江军,蔚超,等.基于改进支持向量机的变压器实时热点温度预测方法研究[J].高压电器,2018,54(12):174-179.
LIAO Caibo,RUAN Jiangjun,WEI Chao,et al. Research onreal-time hot-spot temperature prediction method for transformer based on improved support vector machine[J]. High Voltage Apparatus,2018,54(12):174-179.
- [10] Tang P H. Coupled thermal and flow analysis for oil-immersed transformers in electromagnetic field computation[C]//The 12th Biennial IEEE Conference on Electromagnetic Field Computation, Florida, USA, 2006.

- [11] Dejan Susa, Matti Lehtonen, Hasse Nordman. Dynamic thermal modelling of power transformers [J]. IEEE Trans on Power Delivery, 2005, 20(1): 197-204.
- [12] IEC 60354—1991. Guide to loading of oil-immersed power transformers[S].
- [13] 张重远, 贺鹏, 刘云鹏, 等. 基于 ROTDR 的变压器绕组温度测量方法研究 [J]. 高压电器, 2018, 54(11): 200-205+212.
ZHANG Zhongyuan, HE Peng, LIU Yunpeng, et al. Method for measuring transformer winding temperature based on ROTDR [J]. High Voltage Apparatus, 2018, 54(11): 200-205+212.
- [14] 李琼林, 邹磊, 刘会金, 等. 电力变压器谐波损耗仿真计算与实验研究 [J]. 电网技术, 2013, 37(12): 3521-3527.
LI Qionglin, ZOU Lei, LIU Huijin, et al. Simulation calculation and experimental research on harmonic losses in power transformers [J]. Power System Technology, 2013, 37(12): 3521-3527.
- [15] IEEE Std C57. 110—2008. IEEE recommended practice for establishing liquid-filled and distribution transformer capability when supplying nonsinusoidal load currents[S].
- [16] GB 1094. 5—2016. 电力变压器 第 5 部分 承受短路能力[S].
- [17] 路长柏, 朱英浩. 电力变压器理论与计算[M]. 沈阳: 辽宁科学技术出版社, 2007.
- [18] 刘书铭, 施红, 冯蕾. 考虑集肤效应与邻近效应的变压器谐波损耗模型 [J]. 电力自动化设备, 2015, 35(3): 133-139.
LIU Shuming, SHI Hong, FENG Lei. Transformer harmonic loss model considering skin effect and proximity effect [J]. Electric Power Automation Equipment, 2015, 35(3): 133-139.
- [19] 张占龙, 王科, 李德文, 等. 变压器谐波损耗计算及影响因素分析 [J]. 电力系统保护与控制, 2011, 3(4): 68-72+78.
ZHANG Zhanlong, WANG Ke, LI Dewen, et al. Transformer harmonic loss calculation and influence factor analysis [J]. Power System Protection and Control, 2011, 3(4): 68-72+78.
- [20] 温惠, 王同勋, 毛涛, 等. 基于谐波畸变率和负载率的变压器损耗及寿命损失分析 [J]. 电测与仪表, 2015, 52(22): 42-48.
WEN Hui, WANG Tongxun, MAO Tao, et al. Analysis of the active power and life loss of transformers based on harmonic current distortion and loading rate [J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2015, 52(22): 42-48.