

变压器经济运行理论中时段控制法 节能效益研究

时段控制法是变压器经济运行理论中的重要方法，被学术界广泛采用，但针对其节能效益的研究不多。在此领域进行了一些探讨，包括将变压器的投退成本纳入节能效益分析模型；采用积分算法提高节电利润计算准确度。通过上述研究，进一步扩展了时段控制法的研究深度，并以此为基础定性分析了时段控制法的适用范围，得出以小时作为时域单位的变压器经济运行时段控制法并不适合实际工程应用的结论，最后以算例证明了结论的正确性。

刘若溪/国网北京市电力公司北京电力科学研究院



刘若溪/工程师

近年来随着我国电力系统的不断完善，设备的节能与降耗已成为电力系统经济运行的重要研究内容。变压器作为输配电网中的核心电气设备，其效率虽然很高，但由于其使用数量庞大，持续运行时间长，自身产生的有功和无功损耗相当大，因此深入开展有关变压器经济运行特别是节能效益方面的理论研究，并将研究成果用于指导电网实际运行就成为一项非常有意义的工作。

文献[1-2]提出了变压器经济运行的时段控制方法，此方法依照已知的次日负荷预测值划分次日的负荷变化趋势，设置变压器在各个时段内的动作次数，最终给出变压器经济投退的确切时间点。文献[3]进一步说明变电站如果按照时段控制法进行变压器的投退，将会最大限度地降低变电站的损耗，并有效减少设备动作次数。本文认为此观点存在以下不足：①节能效益的分析中缺少对变压器投退成本的考虑，在变压器投退过程中涉及到多种一次设备的操作，这些设备势必会由于机械或电磁的原因减

少其自身使用寿命，从而增加变压器的运行成本，因此在制定变压器经济运行方式时，不考虑其投退成本显然不妥；②节约电量所带来的经济效益（也称“节电利润”）的计算方法过于简单。目前的计算方法是采用经济运行方式的运行时间、综合功率损耗减少值和单位电价三者的乘积。实际上，由于负荷的波动，综合功率损耗减少值是不断变化的，传统计算方法的计算结果准确度有待进一步提高。

由于上述问题的存在，现有变压器经济运行理论中时段控制法还需要进一步完善，尤其是其节能效益还有待进一步深入研究。因此，本文在节能效益的计算内容方面，将变压器的投退成本纳入其中；在节电利润的计算上采用了积分算法代替原有的乘法。通过上述改进，提高了时段控制法节能效益的分析准确度，得出了可供实际工程应用借鉴的结论，最后以算例证明了本文所提分析方法的可行性。

变压器经济运行的时段控制法

时段控制法的主要思想是人为将负荷曲线进行简化，并划分出固定的运行区间，每个区间对应一种运行方式，而不再因为负荷波动而随意改变区间内变压器的运行方式。由此可见，此方法的重点在于：①需要以负荷预测作为基础，即首先需要绘制出所需时间段内的负荷曲线；②采用切实有效的方法简化负荷曲线，合理划分运行区间。在处理

关键词/Keywords

变压器 ·
经济运行理论 ·
时段控制法 ·
节能效益 ·

上述两个问题上,不同的学者给出的方法不近相同,进而衍生出多种时段控制法的具体表达方式,下面以一种最为典型的方式为例进行简单介绍。

该方式采取线性外推法进行负荷预测,得到1天48点(每隔30 min取1点数据)的负荷预测值。

为了对负荷预测结果所构成的一组数列 $x=\{x(0),x(1),\cdots,x(47)\}$ 进行比较分析,首先定义如下规则:

- 1) 当 $x(i+1)-x(i)>(x_{\max}-x_{\min})/48$ 时, M 为1,表示负荷上升。
- 2) 当 $|x(i+1)-x(i)|\leq(x_{\max}-x_{\min})/48$ 时, M 为0,表示负荷不变。
- 3) 当 $x(i+1)-x(i)\leq-(x_{\max}-x_{\min})/48$ 时, M 为-1,表示负荷下降。

形成由-1, 0, 1构成的一组数列,即 $y=\{y(0),y(1),\cdots,y(47)\}$,用以表征负荷的变化情况。以某220 kV变电所某典型日负荷为例,预测的负荷曲线和负荷第一次划分情况如图1、图2所示。

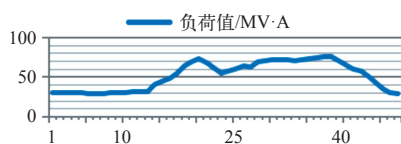


图1 短期预测负荷曲线

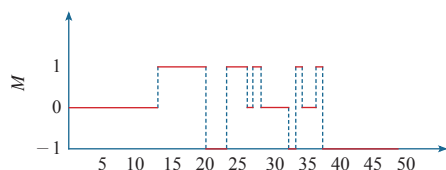


图2 负荷第一次划分情况

观察图2发现负荷第一次划分完后,中间仍然有波动存在。为处理波动,定义另一组规则如下:

- 1) 当 $|y(i)|>0$ 且 $y(i+1)=0$ 时,令 $y(i+1)$ 的值和 $y(i)$ 的值一致。
- 2) 当 $|y(i)-y(i-1)|+|y(i+1)-y(i)|=4$ 时,令 $y(i)$ 的值和 $y(i-1)$ 、 $y(i+1)$ 的值一致。处理波动后,负荷的划分情况如图3所示。

由图3可见,全天负荷可以划分为几个时段:在负荷上升时段内,负荷高于临界负荷值时,允许投入备用变压器1次,此时段内不再退出;在负

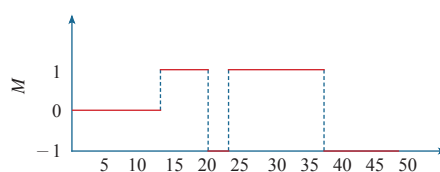


图3 负荷第二次划分情况

荷下降时段内,负荷低于临界负荷值时,允许退出备用变压器1次,此时段内不再投入;在负荷不变时刻内,负荷值等于临界值,变压器依照负荷发展趋势判断是否改变运行状态,若需要改变,此时段内仅允许投入或退出1次。

时段控制法虽然可以通过对预测负荷曲线的简化在一定程度上减少变压器的投退次数,但却并没有进一步分析投退次数与节能效益之间的量化关系,研究显然不够深入。

变压器投退成本

由于变压器的投退操作涉及到变压器、断路器和隔离开关三种设备的动作过程,因此其真正投退成本也应为三种设备投退成本的总和。以下对这三种设备的投退成本进行详细阐述。

1. 变压器本体投退成本^[4]

在实际现场,投退变压器的操作对象均是空载变压器,其寿命损失主要为绕组绝缘结构的寿命损失。

GB 1094.2—1996《电力变压器 第2部分:温升》明确规定变压器绕组平均温升不超过65℃。以油浸式变压器为例,在40℃的环境温度下,其绕组温度最高允许达到105℃,如果绕组温度有继续上升的趋势,则循环冷却系统就会启动^[5],从而迅速降低其温度。即使是大容量的变压器,其经受高温的时间也不会超过几十秒。为了说明问题,在本文的讨论中,无论是投空载变压器还是退空载变压器,均采用最严重的情况,即变压器绕组以105℃的温度持续60 s。

蒙特辛格关系式^[6]为

$$V_c = \frac{e^{\rho\theta_c}}{e^{\rho\theta_{cr}}} = e^{\rho(\theta_c - \theta_{cr})} \quad (1)$$

式中, V_c 为相对寿命损失率,即绕组在最热点温

度 θ_c 时与在温度 θ_{cr} 时的正常寿命损失之比； θ_c 为实际负荷情况下的温度值； θ_{cr} 为额定负荷情况下的温度值； ρ 为常数； $e^{\rho\theta}$ 为由温度和时间引起的变压器绝缘结构的寿命损失。

按照国家标准规定，取额定状况下 $\theta_{cr}=98\text{ }^{\circ}\text{C}$ ， $\rho=0.11$ ，在 $105\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时，相对寿命损失率 $V_c=2.16$ 。由于假定整个暂态过程持续了 60 s ，则实际寿命折损时间 $\Delta T=(2.16\times 60/3\ 600)\text{ h}=0.036\text{ h}$ 。设在 $98\text{ }^{\circ}\text{C}$ 下变压器的典型寿命为 20 a ，则1次投（退）变压器导致的绕组温升会损失其寿命中的 0.036 h ；若1台变压器的价格为150万元，维修及养护成本为10万元，则1次投（退）空载变压器的损失价值 ΔM_1 为

$$\Delta M_1=(1\ 500\ 000+100\ 000)\times\frac{0.036}{20\times 8\ 760}\text{ 元}=0.32\text{ 元}\quad (2)$$

将160万元的成本以天为单位进行分摊，每天的费用约为219元。由此可见，变压器本体一次投退的成本仅占每日所需费用的0.15%，因此基本可以忽略。

2. 断路器投切成本

本文忽略断路器投切的人工成本，仅从断路器本身出发，考虑其电寿命与机械寿命两个方面的投切成本。由于电源侧与负荷侧断路器均参与投退空载变压器的操作，因此分两种情况加以说明。

(1) 退空载变压器操作

现场断路器动作顺序为：先断开负荷侧断路器，后断开电源侧断路器。在这一过程中，负荷侧断路器需切断正常运行状态下的电流 I_N ，电源侧断路器则仅需切断变压器励磁电流 I_0 ，由于励磁电流幅值很小，基本可以忽略，因此前者主要折损电寿命，后者则主要折损机械寿命。

以E2级ZW72-40.5型户外真空断路器为例，额定电压40.5 kV，额定电流1.6 kA，额定短路开断电流25 kA，额定短路电流开断次数30次，机械寿命10 000次。根据国家标准GB 1984—2003《高压交流断路器》对E2级高压断路器的规定：“10%额定短路开断电流下开断不少于130次；30%额定短路开断电流下开断不少于130次；60%额定短路开断电流下开断不少于8次；100%额定短

路开断电流下开断不少于6次。”上述任何一项要求不满足时，该型号产品都将视为不合格。假定负荷侧的开关工作在额定电流状态，动作1次即开断1.6 kA电流1次。由 $I_N=1.6\text{ kA}$ ，小于额定短路开断电流25 kA的10%，则断路器最少可以开断130次。假设真空断路器的价格为10万元，则开断1次损失的电寿命价值 ΔM_2 为

$$\Delta M_2=\frac{100\ 000}{130}\text{ 元}=769.2\text{ 元}\quad (3)$$

电源侧断路器损失机械寿命价值 ΔM_3 为

$$\Delta M_3=\frac{100\ 000}{10\ 000}\text{ 元}=10\text{ 元}\quad (4)$$

(2) 投空载变压器操作

现场断路器动作顺序为：先闭合电源侧断路器，后闭合负荷侧断路器。此时，电源侧断路器需承受变压器励磁涌流，假定情况最严重，励磁涌流达到额定电流的3倍，此时必然超出一次电流保护的整定值，断路器即使闭合也会断开，假定通过3次合闸断路器合闸成功，由 $3I_N=4.8\text{ kA}$ ，小于额定短路开断电流25 kA的30%。则电源侧断路器总计损失电寿命价值 ΔM_4 为

$$\Delta M_4=3\times 769.2\text{ 元}=2\ 307.6\text{ 元}\quad (5)$$

负荷侧断路器损失机械寿命价值 ΔM_5 为

$$\Delta M_5=\frac{100\ 000}{10\ 000}\text{ 元}=10\text{ 元}\quad (6)$$

母联断路器投、退1次损失机械寿命价值 ΔM_6 为

$$\Delta M_6=2\times 10\text{ 元}=20\text{ 元}\quad (7)$$

(3) 隔离开关投切成本

以ZW32+隔离开关为例，其机械寿命为10 000次，价格约为5万元。假设在1次退空载变压器操作中，先后开断6个隔离开关。由于只损失机械寿命（投空载变压器操作损失与其一致），所以隔离开关损失机械寿命价值 ΔM_7 为

$$\Delta M_7=6\times\frac{50\ 000}{10\ 000}\text{ 元}=30\text{ 元}\quad (8)$$

节电利润的计算

在传统变压器经济运行理论中，节电利润一般采用经济运行方式的运行时间、综合功率损耗

减小值和单位电价三者的乘积来表示。但实际上由于负荷的波动,综合功率损耗减少值是不断变化的,因此这种计算方式所得结果并不准确。

本文采用积分算法代替原有的乘法,假设某变电站内有两台并列运行的变压器 T_1 和 T_2 。在 t_1 时刻,变电站的运行方式为 T_1 单独运行, T_2 备用;根据时段控制法,在 t_1 时刻之后变电站的运行方式为 T_2 单独运行, T_1 备用,其节电利润为

$$M = n \int_{t_1}^{t_2} \Delta P_{z1} - \Delta P_{z2} = n \int_{t_1}^{t_2} P_{oz1} - P_{oz2} + \left(\frac{P_{kz1}}{S_{n1}^2} - \frac{P_{kz2}}{S_{n2}^2} \right) S^2 dt \quad (9)$$

式中, M 为此经济运行方式下所获得的节约资金,元; n 为电价,元/ $\text{kW} \cdot \text{h}$; Δp_{z1} 和 Δp_{z2} 分别为 T_1 和 T_2 的综合损耗, kW ; P_{oz1} 和 P_{oz2} 分别为 T_1 和 T_2 的空载综合损耗, kW ; P_{kz1} 和 P_{kz2} 分别为短路综合损耗, kW ; S_{n1} 和 S_{n2} 分别为 T_1 和 T_2 的额定容量, $\text{kV} \cdot \text{A}$; S 为变压器所带负荷值, $\text{kV} \cdot \text{A}$ 。积分变量 t 与 S 的变换关系可通过负荷曲线拟合公式求得。

节能效益的计算

根据前文所述的分析,变压器某一次具体运行方式的改变均伴随着设备投退成本的支出(机械损耗与电损耗)以及变电站综合功率损耗的改变。据此,本文给出时段控制法节能效益的新定义为:在变电站内变压器根据时段控制法的要求做出相应的投退动作时,变电站内设备的节电利润与投退成本之间的差值即为此时段控制法的节能效益。如果投退成本大于节电利润,即差值为负,则认为当前的经济运行方式不合理,不具备节能效益,且不能为资产所有者带来节支收益;如果投退成本小于节电利润,即差值为正,则认为当前的经济运行方式具有一定的经济效益。本文所提节能效益概念的时段控制法的具体操作流程如图4所示。

算例分析

1. 算例1

以文献[3]中的算例为例,某220 kV变电站内有两台变压器,具体参数如表1所示。

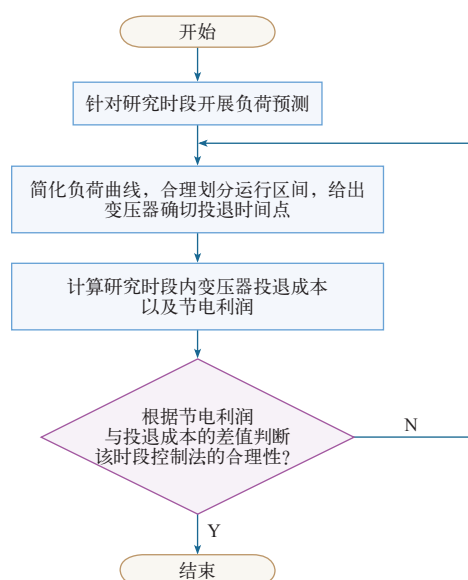


表1 变压器具体参数

序号	型号	P_0/kW	P_k/kW	$I_0(\%)$	$U_k(\%)$
1	SFP9-6 300/220	58	221	0.70	12~14
2	SFP9-9 000/220	76	288	0.63	12~14

利用表1中的参数可计算出变压器经济运行的临界负荷值,根据计算结果可绘出此变电站变压器在不同运行方式下的综合功率损耗与负荷的关系曲线,即变压器的经济运行区间示意图,如图5所示。图中, S_{LZ1} ($19.84 \text{ MV} \cdot \text{A}$)、 S_{LZ2} ($32.48 \text{ MV} \cdot \text{A}$)和 S_{LZ3} ($46.94 \text{ MV} \cdot \text{A}$)为临界负荷值。

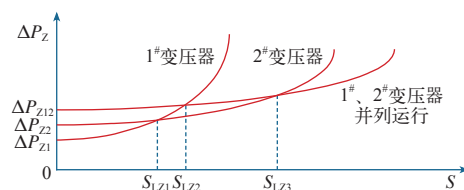


图5 变压器经济运行区间示意图

按变压器经济运行理论可知优化控制策略如下^[7]:

- 1) 当变电站所带负荷值 $S \leq S_{LZ1}$ 时,1#变压器单独运行。
- 2) 当变电站所带负荷值 $S_{LZ1} < S < S_{LZ2}$ 时,2#变压器单独运行。
- 3) 当变电站所带负荷值 $S > S_{LZ2}$ 时,1#、2#变压器并列运行。

算例中将负荷曲线进行了处理,根据上述优化控制策略的要求,在一天内共投退变压器2次,按照本文所提方法计算其节能效益。

当变压器投入时,涉及断路器动作共3次,母联断路器、变压器电源侧和负荷侧断路器动作各1次,涉及隔离开关动作6次;当变压器退出时,开关动作情况与投入时一致。

变压器投退成本 ΔM 为

$$\Delta M = \Delta M_1 + \Delta M_2 + \Delta M_3 + \Delta M_4 + \Delta M_5 + 2\Delta M_6 + 2\Delta M_7 \\ = 3196.8 \text{ 元} \quad (10)$$

该变电站常年采用2[#]单台变压器运行模式,当两台同时运行时,根据经济运行理论可减少变电站的有功损耗(一天内共13.5 h两台变压器同时运行),取销售电价为0.5元/kW·h,负荷曲线拟合采用以小时 t 为自变量的余弦函数,根据经济运行理论,一天内可节电利润 M 约为50元。可见变压器投退成本远远大于变电站节电利润,两者并不在同一数量级,即节能效益为负,此时段控制法不具备节能效益。

2. 算例2

某变电站内有两台变压器,具体参数如表2所示。

表2 变压器具体参数

序号	$S_N/\text{kV}\cdot\text{A}$	P_0/kW	P_k/kW	I_0 (%)	U_k (%)
1	10 000	12	55	0.80	12
2	20 000	19	89	0.19	9

根据负荷数据,采用余弦函数拟合一个季度内的负荷曲线函数为

$$S = f(t) = (9\,000 \cos \frac{t-45}{45} \pi + 11\,000) \text{ kV}\cdot\text{A} \quad (11)$$

计算临界负荷值分别为 $S_{LZ1} = 3\,160 \text{ kV}\cdot\text{A}$; $S_{LZ3} = 12\,819 \text{ kV}\cdot\text{A}$ 。因此,当负荷值介于 S_{LZ1} 和 S_{LZ3} 之间时,应切除1[#]变压器,投入2[#]变压器。涉及断路器动作6次,隔离开关动作12次,计算其投退成本约为3 186元。

根据负荷预测曲线换算积分区间,并计算其节电利润 M 约为30 000元,可见此变压器投退的节能效益约为27 000元,即节能效益大于零,说明此运行策略具有一定的经济性。

综上所述,在考虑变压器投退所带来的成本时,以小时为时域单位的变压器经济运行时段控制法并不适用。在电力系统实际运行中,变压器的投退次数是受到严格限制的,一般一个季度内会有1~2次运行方式的变化。因此以天为单位采用时段控制法开展季度或年范畴内的变压器经济运行策略的研究具有一定的工程实际意义。

结束语

时段控制法在变压器经济运行理论中被广泛应用,但其节能效益研究却不多。本文在此领域进行了一些探讨,包括将变压器的投退成本纳入节能效益分析模型;采用积分算法提高节电利润计算准确度。通过上述研究,进一步扩展了时段控制法的研究广度,并以此为基础定性分析了时段控制法的适用范围,得出以小时作为时域单位的变压器经济运行时段控制法并不适合实际工程应用的结论,为相关领域的研究提供了一定参考。

参考文献

- [1] 罗宜,李咸善. 变电站变压器经济运行的探讨[J]. 华中电力, 2007, 20(2): 21-24.
- [2] 施文幸,曹国民. 提高变压器运行经济性的专家系统[J]. 供用电, 2007, 24(4): 34-36.
- [3] 杨佳,丁晓群. 一种双绕组变压器经济运行的实用方法[J]. 电力自动化设备, 2006, 26(2): 40-42.
- [4] 余楚云,王承民,连鸿波. 计及设备寿命折损的配电变压器经济运行方式效用分析[J]. 电力系统自动化, 2009, 33(15): 47-50.
- [5] 陈慈萱. 电气工程基础[M]. 北京: 中国电力出版社, 2003: 328-329.
- [6] 解绍锋,李群湛,贺建闽. 牵引变压器温升与寿命损失研究[J]. 机车电传动, 2003, 4(3): 15-19.
- [7] 张旭明,张焰,汪宇霆,等. 采用禁忌搜索算法的多时段变压器经济运行方式优化[J]. 电网技术, 2010, 34(7): 109-113.

(收稿日期: 2014-08-26) **EA**