

现役大型电力变压器抗短路电流能力不足的补救措施

李品德¹ 韩俊玉² 罗建勇³ 汪金星³

(1.陕西电力科学研究院,西安;2.山西省电力公司,太原;3.陕西省电力公司,西安)

摘要 本文通过对电力系统大型变压器在短路电流作用下损坏的实例进行研究,剖析了短路电流对电气设备破坏的机理,针对大型电力变压器抗短路能力不足的问题,指出传统补救措施的局限性,提出基于电力新设备的全新补救方案,并阐述了新补救方案的适用性,得出的结论可供电力主管部门作为相关电气设备反事故措施的参考。

关键词 大型电力变压器 短路电流 短路电流限流断路器 电动力 限流器

1 概述

在电力公司和大型企业的变配电系统中,大型电力变压器在短路电流作用下损坏的事故时有发生,而且损坏时的短路电流水平一般都在 20kA 以内,并没有超过变压器相关标准所规定的额定短时耐受电流水平。大型变压器一旦损坏,只有返厂修理,费时费力,给电力企业或用户单位造成巨大经济损失。陕西、甘肃、山西、河北等电力公司都相继不只一次地发生过这类事故。事故分析时厂家的解释是工艺质量不稳定,理论校核显示并无设计问题。笔者认为,纯理论校核并不能说明设计没有问题,因为这涉及到数学模型是否精确可靠,没有适用的等效试验手段是问题的关键,没法对具体设计进行有效验证是个明显的技术漏洞。其实现役大型变压器一次次惨痛的教训已经无可辩驳的说明:大型变压器抗短路能力严重不足,似乎有每逢短路就损坏的趋势。鉴于此,有必要找到补救的措施,本文通过分析短路电流对设备的破坏机理提出限制短路电流的方案,以期达到抛砖引玉的效果。

2 变压器损坏的机理分析

2.1 短路电流的特征

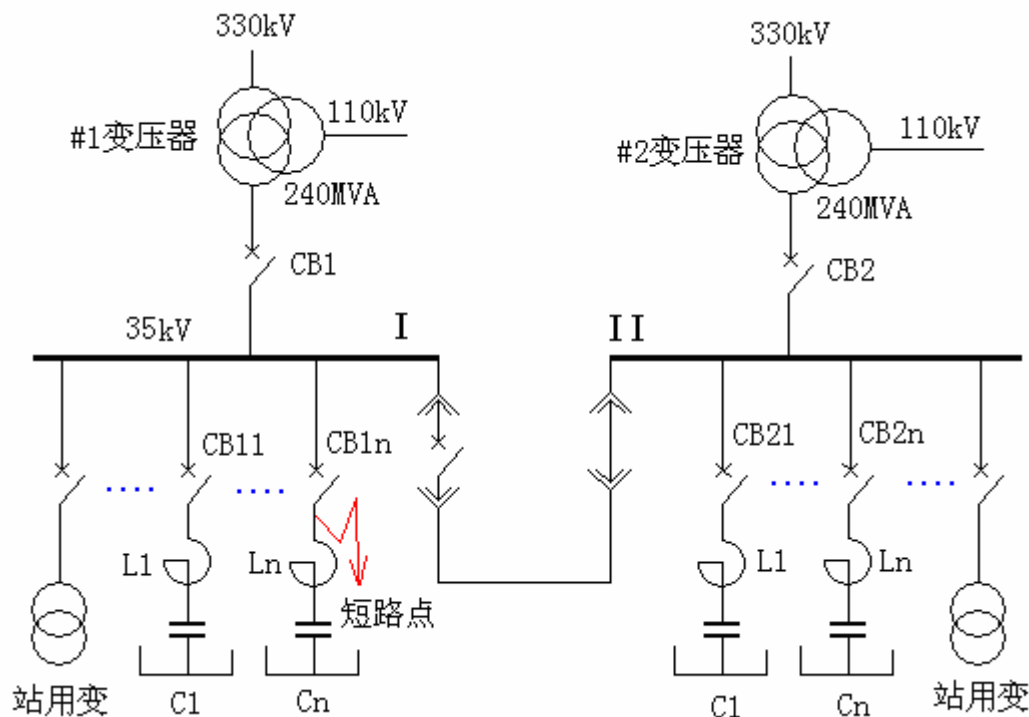


图 1 某 330kV 变电站电气主接线示意图

图 1 是某 330kV 变电站典型的电气主接线图，35kV 侧负载为站用变及并联电容器无功补偿装置，每组电容器组容量 8000kVar，限制涌流的电抗器的电抗率为 6%。2009 年 12 月某日，在第一组无功补偿装置投入运行后几分钟内投入第二组无功补偿装置时导致开关柜内部发生短路事故（故障点在图 1 中示意性标出），断路器 CB1n 将短路电流顺利开断，但主变差动保护依然动作，故障录波显示短路电流约 16kA，总持续时间约 150ms。对变压器返厂解体发现，变压器 35kV 绕组局部损坏，见图 2，下面就此短路电流进行分析。



图 2 变压器绕组损坏的照片

设 $t=0$ 时发生短路， φ 为短路时刻的相角，则系统电压为 $u = U_m \sin(\omega t + \varphi)$ ，其中 U_m 为系统电压的幅值， ω 为角频率。这时短路电流 i_d 的近似表达式为：

$$i_d = I_m \sin(\omega t + \varphi - \theta) - I_m \sin(\varphi - \theta) e^{-t/T}$$

式中，

I_m ---短路电流的周期分量幅值， $I_m = U_m / Z = U_m / \sqrt{R^2 + (\omega L)^2}$ ；

θ ---为功率因数角， $\theta = \arctg(\omega L / R)$ ；

T ---为时间常数， $T = L / R$ ， R 、 L 分别为短路回路的电阻和电感。

通常，在电力系统可以假设时间常数 $T = 0.05s$ ，则当短路相角 $\varphi = 3.640^\circ$ 时，短路电流 i_d 中的非周期分量最大，冲击系数达到 1.8 以上。短路电流（以标幺值为单位）的波形如图 3 所示。

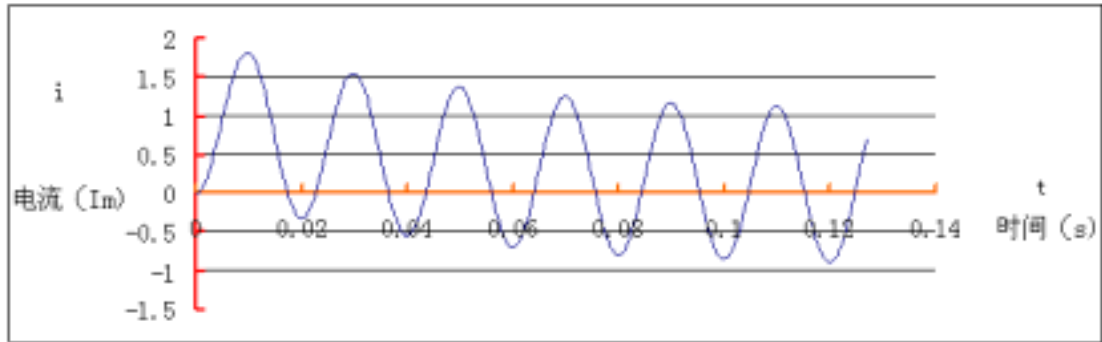


图 3 电力系统典型短路电流的波形

显然短路电流具有如下特征：

- （1） 由周期分量和非周期分量构成，非周期分量的大小与短路发生瞬间电压的相位角紧密相关；
- （2） 非周期分量在暂态过程中占有很大比重，持续约 4 个周波，对电气设备特别是带有绕组的电气设备的动热稳定能力是个严峻的考验。

2.2 短路电流的热效应

短路电流对电气设备热效应的贡献可用 $P_1 = \int_0^{t_1} i^2 dt$ 来表示， t_1 表示短路电流终止的时

刻。由于在短路期间电气设备的散热条件可以认为是绝热的，所以 P_1 的大小直接反映了电气设备热损坏的程度。以 2.1 节的实例来说，短路电流周期分量有效值 16kA，持续时间 150ms，在不考虑非周期分量时 $P_1=38.5 \times 10^6 A^2s$ ，若考虑非周期分量的影响则此值还会有较大幅度的增加。这些能量主要集中在导电回路接触电阻较大的部位，使这些部位熔化甚至气化，熔化的金属导体或金属蒸汽将有可能导致进一步的短路故障从而扩大故障面、导致相关设备更严重的损坏。

2.3 短路电流的电动力

短路电流在相间及本相导体曲折处均会产生强大的电动力 F ，此电动力正比于短路电流峰值的平方，即 $F= \times i_d^2$ ，其中 为与导电回路结构相关的常数。对于变压器，内绕组在径向受到压力，外绕组在径向受到张力，内、外绕组轴向电动力比径向力小很多，而相邻线饼或线匝间存在相互挤压力。尤其在短路条件下，巨大的电动力将使变压器线圈产生变形，其局部或整体受到破坏，最后导致变压器发生故障。对于 2.1 节的实例来说，在最不利的情况下短路电流冲击系数可达 1.8 倍，所以短路电流最大峰值可达 $i_{peak} = 1.8 \times \sqrt{2} \times 16kA = 2.55 \times 16kA = 40.8kA$ 。若能将短路电流最大峰值限制到 20kA 附近，则电动力将减小到原来的 25%，这对带绕组的电气设备在短路电流作用下的安全保障是非常有利的。

2.4 传统的解决方案及适用性分析

要保证电气设备的安全，理想的方案要求：既最大限度的缩短短路电流持续的时间，又尽可能降低短路电流的最大峰值。传统的解决方案是在变压器低压侧出口串联限流电抗器，将短路电流限制在断路器安全开断能力的范围内，这种方案显然不可能对缩短故障持续时间做出贡献。实际情况是，在主变的 35kV 侧不串接限流电抗器断路器也能安全开断，问题是即便是断路器安全开断了，变压器仍然会损坏。要通过加装限流电抗器将短路电流限制在变压器不损坏的电流值内，这个值可能在 10kA 附近，那就要求电抗器的电抗率很高，甚至可能高到无法实现，或即便可以实现，其负作用也不能接受。除此之外，对已建成的变电站进行技术改造加装限抗，空间上几乎不允许，也就是说此解决方案的适用性不强。

3 一种新的解决方案---采用短路电流限制器

3.1 短路电流限制器的结构及原理介绍

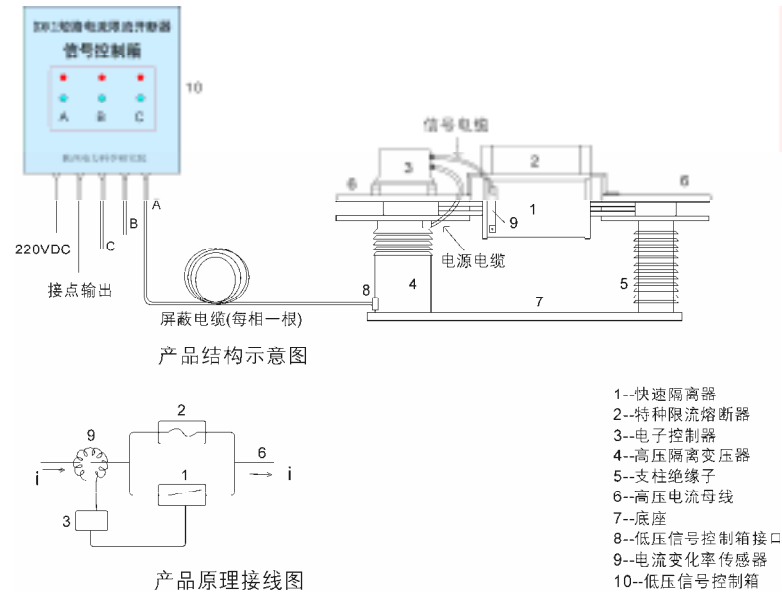
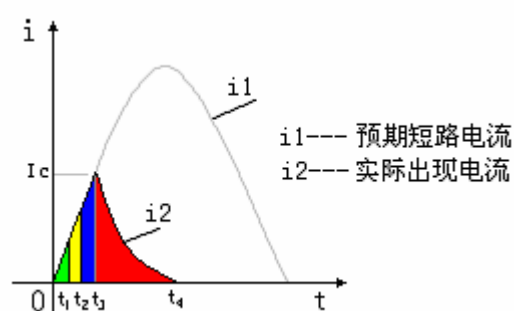
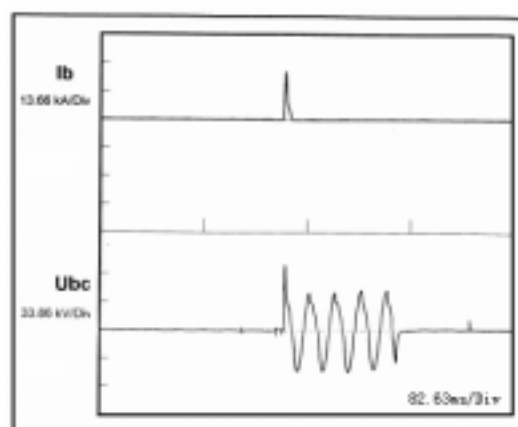


图 4 短路电流限流器单相产品外观结构及电气原理示意图

从图 4 中可以看出：短路电流限制器由快速隔离器 1、特种高压限流熔断器 2、电流传感器 9、电子控制器 3 及 10、高压隔离变压器 4 等部件组成，其中电子控制器由高压侧部分 3 和低压信号控制箱 10 构成。低压信号控制箱 10 通过高压隔离变压器 4 给电子控制器 3 供电，并采用灯光、继电器接点、记数器、专用微机测控装置等手段指示限流器的工作状态。快速隔离器 1 和特种高压限流熔断器 2 在电气上是并联的，由于前者电阻为微欧级，后者电阻为毫欧级，故正常运行情况下母线电流几乎全部流过快速隔离器 1。当系统发生短路事故时，置于快速隔离器 1 内部的电流变化率传感器 7 将母线 6 中的短路电流信号通过信号电缆传递给高压侧电子控制器 3，由 3 进行信号的分析 and 处理。若短路电流信号超过电子控制器 3 的整定值，3 将通过信号电缆输出点火脉冲信号，使快速隔离器 1 中的执行元件---爆破切割系统动作，将隔离器导电回路在几百微秒的时间内高速断开；在隔离器导电回路断开的过程中，故障电流转移到特种高压限流熔断器 2 中，由 2 最后限流并开断短路电流，切除故障。由于快速隔离器的断开采用了军事上的爆破切割技术，所以也称这种限流器为基于爆破切割技术的短路电流限制器，简称限流器或 FCL (Fault Current Limiter)，FCL 开断短路电流的动作时序如图 5 (a) 所示。



(a) FCL 动作时序示意图



(b) FCL 开断 36kA/35kV 试验的录波图

图 5 波形图

- $t=0$ 短路故障发生。
- $t=t_1$ 电子控制器探测到故障并建立点火信号，此时间与预期短路电流的大小、电子控制器动作整定值及短路发生时的相位角均有关系，一般大于 $600\mu s$ 。
- $t=t_2$ 快速隔离器断口打开，电流转移到限流熔断器中， (t_2-t_1) 小于 $200\mu s$ 。
- $t=t_3$ 熔断器开始起弧， (t_3-t_2) 为熔断器的弧前时间，一般为一个毫秒左右，图中的 I_c 即为限流峰值，也称截止电流。
- $t=t_4$ 熔断器内电弧熄灭，故障电流被彻底开断， (t_4-t_3) 为熔断器的燃弧时间，一般小于 $5ms$ 。

图 5 (b) 为 FCL 在国家权威机构发电机回路 36kA/35kV 开断试验的波形图，从图中可以看出，FCL 的全开断时间约 $8ms$ ，截止电流约为 $24kA$ ，远低于预期峰值电流 $51kA\sim 92kA$ （受非周期分量的影响而变化）。

图 6 为电力系统典型短路电流的波形及 FCL 与普通断路器开断性能比较的示意图。可以看出，FCL 在短路故障发生后几毫秒内完成限流开断，普通断路器则由于继电保护和操作机构的固有特性需要经过数个周波、在短路电流自然过零时才能开断。

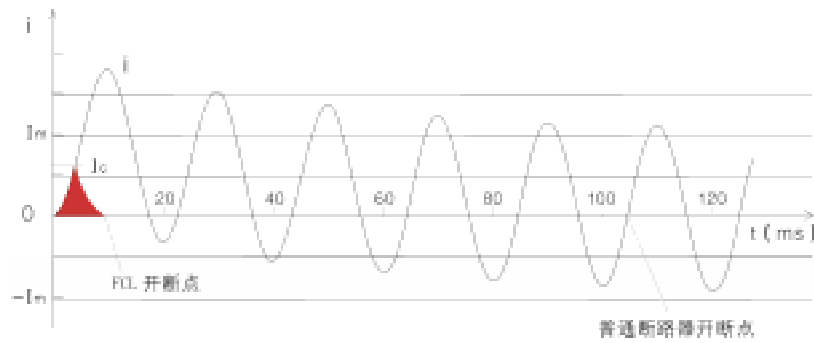


图6 FCL 动作时序示意图

综合图 5 及图 6，可以看出：FCL 可在预期短路电流尚未发展到峰值之前将其高速限流开断，实际通过电气设备的短路电流的峰值 I_c 在第一个半波被限制到预期短路电流峰值的（15~50）%，短路电流的持续时间小于 10 ms，大大降低了故障电流的总能量 $\int i^2 dt$ （约为普通断路器的 1/100），从而更有效地保护了电气主设备的安全。

根据电力系统短路电流的特性，FCL 的电子控制器可设定电流瞬时值 i 及电流瞬时变化率 di/dt 两个启动判据。只有当两者同时大于设定值时才输出动作信号，在增强 FCL 抗干扰（非短路性质的暂态电流，如雷电流及各种涌流）能力的同时保证了 FCL 动作的快速性。

3.2 应用概况

上述基于爆破切割技术的 FCL 在开断短路电流方面具有三个方面的突出特性：其一是大容量，可轻松开断上百千安的短路电流；其二是高速，全开断时间在 10ms 以内；其三是限流，可将短路电流峰值限制在预期峰值的（15~50）%以内。国外的代表性产品有德国 ABB 公司的 Is-Limiter、美国 G&W 公司的 Clip 和法国 FERRAZ 公司的 Pyro-Breaker 等。国内目前也有机构研制出具有自主知识产权的产品并在电力系统和用户工程中得到了成功的应用，产品基本技术指标为额定电流 630A~6300A、额定电压 7.2kV~40.5kV、额定短路开断能力 50kA~120kA，可在户内安装也可在户外安装，设备的价格约为国外产品的 30%，主要应用的方式为：

- （1） 旁路限流电抗器，构成零损耗限流装置，起到节能降耗、消除电磁污染、提高电压质量的作用；
- （2） 应用于大容量变电站的 6kV~35kV 系统的母联位置，使分段母线并列运行，起到提高供电可靠性、优化负荷分配、节约基建投资、提高主变运行合理性、节能等作用。
- （3） 改善电能质量，满足对电压质量要求苛刻用户的要求，保证短路时系统电压降落时间小于 10ms。
- （4） 用作发电机出口、厂用电分支及大容量电力电子设备的快速短路保护。

3.3 解决大型变压器抗短路能力不足的具体技术方案

以图 1 为例，加装 FCL 后的电气主接线方案如图 7 所示，将 FCL 串联到主变 35kV 出口的隔离开关和断路器之间，FCL 的动作整定值为电流 6kA、电流变化率 $3.6A/\mu s$ （对应于 8kA 短路电流），这样可以避开电容器合闸涌流的干扰（单组电容器额定电流约 330A，涌流最大倍数 5，涌流平率约 200Hz），同时最大限度的保护主变。当馈线发生短路故障时，若短路电流低于 FCL 的动作值，则由 CB1 或 CB2 开断，此短路电流不会对电气主设备造成安全威胁；若短路电流超过 FCL 的动作值，则 FCL 快速限流开断，10ms 内消除短路，然后通过二次侧的继电器接点联动断路器 CB1 或 CB2 分闸、避免出现非全相运行。

由于 FCL 开断短路电流时的快速特性和限流特性，完全可将短路电流峰值限制到 20kA 以内，也就是说可以大幅度的减小短路电流造成的电动力，即减小电气设备薄弱环节遭电动

力损坏的可能性。另外 FCL 的全开断时间在 10ms 以内,可将短路电流的热效应能量控制在原来的 1/100 附近,即可成百倍的减小短路电流热效应对电气设备薄弱环节可能造成的伤害。所以,加装 FCL 可以达到保护电气设备安全的理想要求。

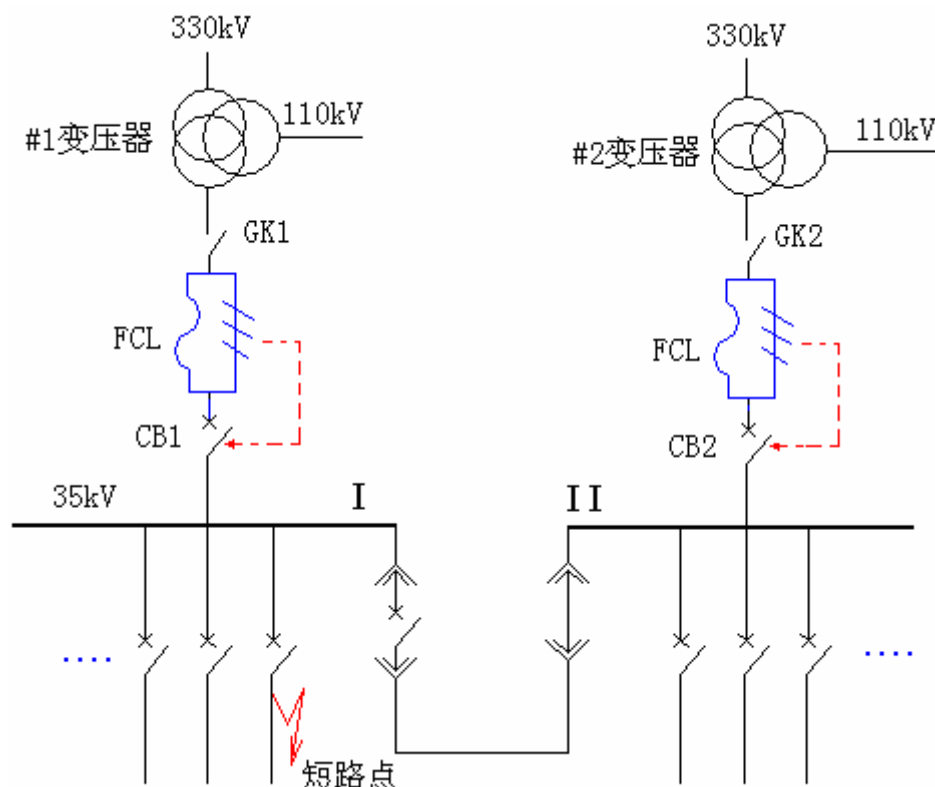


图 7 加装 FCL 后的电气主接线方案

补充一点, FCL 的动作整定值并不是越小越好,在对 FCL 实施整定时应该考虑到:避开电容器负载投入时涌流的影响(在装设 6%限流电抗时涌流约 5 倍额定电流、频率约 200Hz),避开变压器负载空载投入时励磁涌流的影响。也就是说, FCL 的动作整定值应该避开各种设备操作中可能出现的暂态干扰电流的影响,消除因干扰电流造成 FCL 误动的可能性。

3.4 适用性调查

上节中加装 FCL 的技术方案是否具有适用性,主要考虑的因素是:(1) FCL 设备的可靠性;(2) FCL 主设备的价格及备品备件的价格;(3) 在工程实施上是否存在难以克服的困难。

FCL 产品在国内经过 5 年多的运行表明,其可靠性主要取决于电子控制器,经过不断的消缺改进,目前技术上已达到相当完备的程度。其次,由于 FCL 已经能够国产,主设备及备品备件价格已达到可以接受的范围。另外,经过笔者对已建成的陕西电网 330kV 变电站及山西电网 220kV 变电站的考察,在 35kV 侧户内加装 FCL 的难度很大不便实施改造,但在户外加装 FCL 的工程难度则很小,具体实施位置在 35kV 户外隔离开关及 35kV 户外母线进入户内的穿墙套管之间。所以采用 FCL 作为大型变压器抗短路能力不足的补救措施具有明确的适用性。

4 结论及建议

- (1) 大型电力变压器抗短路能力不足是不争的事实,对此进行补救是当务之急;
- (2) 传统加装限流电抗器的补救措施不能从根本上解决问题;
- (3) 采用新型电力设备---FCL 是解决问题的理想方案,可将短路电流造成的电动力降低到

原来的 25% 以内，将短路电流热效应的能量降低到原来的 1% 以内。

(4) 在大型电力变压器低压侧加装 FCL 具有良好的适用性，建议在试用成熟后纳入大型变压器反事故措施。

参考文献：

- 【1】 贺湘琰，电器学，机械工业出版社，2002. 12
- 【2】 王世山，李彦明，电力变压器绕组电动力的分析计算，高压电器，2002，No.4