

基于组合式开关的三相变压器励磁涌流抑制策略

王 阳,许志红

(福州大学 电气工程与自动化学院,福建 福州 350108)

摘要:针对变压器在空载或者轻载的情况下合闸通电可能引起一次绕组流过励磁涌流等问题,提出一种新颖的组合式开关分相控制思路:通过分析原边采用星形不接地连接方式的三相空载变压器的投切暂态过程,推导了空载变压器在投切瞬间的关联磁链状态,进而反推得到考虑剩磁通时抑制空载变压器合闸涌流的动态最佳投切相角,改变依赖剩磁测量电路、预先设定固定相角的现有相控模式;建立基于 ATP/EMTP 的电力变压器模型以模拟其在接通和分断的瞬态过程,获得投切瞬间的电压、电流、磁通等参数特征,验证了所提分相控制原理,给出了控制规律;为了实现分相控制策略,设计一种具有逻辑通信功能的新型三工作模态单极开关控制拓扑,对单极开关进行动态组合,可实现各极触头在最佳相位协调动作、统一控制;搭建硬件控制平台,验证所提控制策略可有效将励磁涌流限制在随机合闸时涌流大小的 3% 左右。

关键词:三相变压器;励磁涌流;组合式开关;剩磁通;空载变压器;分相控制

中图分类号:TM 41

文献标志码:A

DOI:10.16081/j.issn.1006-6047.2019.07.015

0 引言

开关电器是用于接通、分断电力系统及对各种故障进行保护控制的必备部件,广泛应用于各类电网的供配电系统中。但是,采用传统方式投入或切除电网负载,容易产生涌流及过电压等暂态现象^[1]。采用智能分相控制技术虽然可以通过控制开关分断/闭合时的电角度,与预期控制策略相配合,在最佳相位投切负载,主动消除开关过程所产生的电磁暂态效应^[2],但随着配电网负荷的扩容,负载中元件类型的多元化使得单一的相控思路具有局限性^[3]。因此,有必要制定针对性的投切控制策略。对于变压器类负载而言,空载或轻载时的稳态励磁电流通常为其额定电流的 3%~8%,然而合闸空载变压器可能产生幅值高达 8~10 倍额定电流的励磁涌流^[4]。励磁涌流的存在严重影响电网的电能质量^[5],缩短变压器及相关设备的使用寿命,引发继电保护装置误动作等^[6]。

近年来,为了解决此类问题,国内外学者开展了广泛的研究:文献[7-8]提出采用被动式的补偿设备来削弱励磁涌流的幅值;文献[9]采用一种主动涌流补偿器限制励磁涌流,该方案不依赖变压器参数及剩磁磁通量等信息,易于实现;文献[10-12]从变压器的结构出发,通过改变线圈绕组的分布进而增

加空载变压器投入时一次侧的瞬态电感,减小励磁涌流。总结上述研究,变压器励磁涌流的抑制方法主要集中在励磁涌流的补偿吸收和抑制励磁涌流的出现这 2 个领域。前者的缺点在于容忍涌流的出现,这种方式依然存在对电网和电气设备的损害。而采用适当的投切控制策略可以有效地抑制涌流,本文的主要工作也将基于该方式展开。

合闸角和剩磁通是影响变压器励磁涌流的关键因素。相关文献通过仿真及实验首先探究了单相变压器的相位控制策略,提出利用偏磁与剩磁抵消的方式来避免空载变压器投入时铁芯进入饱和或者深度饱和状态^[13]。随后,文献[14-16]通过进一步的研究将其应用于三相变压器,提出了快速合闸策略、同步合闸策略以及延迟合闸策略,但是某些控制策略需要额外加设剩磁测量电路,给实际应用带来不便。

若要有效地消除涌流,根据变压器绕组不同的连接组制定不同的相控策略不失为一种行之有效的方法。本文针对原边采用星形不接地连接方式的三相变压器展开研究,通过分析变压器投切瞬间的磁链暂态过程,推导得到消除励磁涌流的动态最佳投切相角,提出一种考虑剩磁的新型分相投切控制策略,该方案无需采集变压器的内部参数,不影响其运行状态;采用电磁暂态分析软件 ATP/EMTP,模拟应用控制策略投切空载变压器的瞬态过程,得到相关的电气参量,验证了分相控制策略抑制励磁涌流的理论可行性,并给出了控制规律;设计一种具有逻辑通信功能的三工作模态单极开关控制拓扑,开关可灵活地组成 2 极、3 极或多极组合式开关,满足分相控制策略的动态响应和误差要求。相关实验验证了本文所提控制策略的实际可行性,硬件样机可为开发开关电器的相控技术奠定基础。

收稿日期:2018-09-21;**修回日期:**2019-05-01

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51277031);福建省科技厅产学研合作重大项目(2016H6008);福建省自然科学基金资助项目(2015J01192)

Project supported by the National Natural Science Foundation of China(51277031), the Production Science Cooperation Program of Fujian Provincial Department of Science & Technology(2016H6008) and the Natural Science Foundation of Fujian Province(2015J01192)

1 分相控制原理与励磁涌流

以电流信号和最常用的三相星形连接负载中性点不接地接方式为例,说明组合式开关的分闸分相控制原理,如图 1 所示。 t_0 时刻为外部下电指令,3 极开关进入分闸等待状态,开始实时检测触头电流零点, t_1 时刻检测到 A 相电流首先过零点,并将检测到的第 1 个过零点作为判断电流相位的参考点,同时发出信号至其余两相的开关,经过触发延迟 t_{d1} 后发出分断指令信号,随后首个过零相在电流过零点处分断, 90° 电角度后线电流为 0, 剩余两相同时分断。图 1 中, t_{0a} 、 t_{0b} 、 t_{0c} 为开关的固有动作时间; t_{da} 、 t_{db} 、 t_{dc} 为各极开关的分断触发延迟; 0_a 、 0_{bc} 分别表示 A 相电流、BC 相线电流过零点。

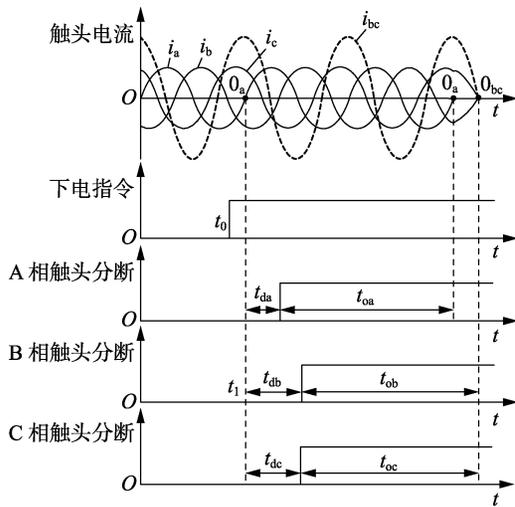


图 1 组合式开关分相控制原理

Fig.1 Individual phase control principle of combined-switches

随着配电网负荷的扩容,变压器空载合闸已经变得越来越频繁。下文将结合单相变压器简要说明交流变压器空载合闸励磁涌流的产生过程及影响因素。令合闸操作点母线处的工频交流电压为 $u_s(t) = U_m \sin(\omega t + \alpha)$, 当关合变压器时,忽略漏磁通,一次侧电压方程为:

$$U_m \sin(\omega t + \alpha) = i_1 r_1 + N_1 \frac{d\Phi_1}{dt} \quad (1)$$

其中, i_1 、 r_1 、 N_1 分别为一次侧励磁电流、电阻和绕组匝数; U_m 、 α 分别为变压器接通时的电压峰值及初相角; Φ_1 为一次侧绕组磁通。通常变压器的内阻压降远小于感应电势, i_1 较小,不考虑铁芯饱和,则有:

$$i_1 = N_1 \frac{\Phi_1}{L_1} \quad (2)$$

其中, L_1 为变压器一次侧的电感。

将式(2)代入式(1)可得:

$$\frac{d\Phi_1}{dt} + \frac{r_1}{L_1} \Phi_1 = \frac{U_m}{N_1} \sin(\omega t + \alpha) \quad (3)$$

在电力变压器的计算过程中,由于绕组电阻很小,因此有 $r_1 \ll \omega L_1$ 。假设磁通的初始值为 0, 求解上述一阶微分方程可得磁通的表达式如下:

$$\Phi_1 = -\Phi_m \cos(\omega t + \alpha) + \Phi_m e^{-r_1 t / L_1} \cos \alpha \quad (4)$$

其中, Φ_m 为磁通峰值。

若在 $\alpha = 0^\circ$ 时投入变压器,磁通表达式为 $\Phi_1 = -\Phi_m \cos(\omega t) + \Phi_m e^{-r_1 t / L_1}$, 经过 $t = \pi / \omega$ 励磁涌流将达到最大值,此时 $\Phi_1 = 2\Phi_m$, 铁芯高度饱和,励磁涌流将达到额定电流的 8~10 倍,此后涌流随着磁通暂态分量的衰减而减小,经过几个周期后达到稳定值,仿真结果如附录中的图 A1(a) 所示;若在 $\alpha = 90^\circ$ 时接通电源,此时 $\Phi_1 = \Phi_m \sin(\omega t)$, 磁通将不存在暂态分量,在投入瞬间直接进入稳态过程,仿真结果如附录中的图 A1(b) 所示。

2 考虑变压器剩磁的分相控制策略

空载变压器投入电网时励磁涌流产生的根本原因为变压器铁芯的饱和现象,而铁芯材料的磁滞效应又导致了铁芯内剩磁的产生。在实际运行中,变压器剩磁的存在严重影响其空载投入运行时励磁涌流的大小。

当考虑变压器合闸时刻的铁芯剩磁时,在合闸角 α 为 90° 、 270° 时,励磁涌流不为 0,但相较于其他情况,此时涌流的幅值会明显减小,过渡到变压器空载正常运行所需要的时间也大幅缩短。这一现象间接地说明了:对应于每一种剩磁情况,都存在令合成直流偏磁为 0 的合闸情况,合闸瞬间不会出现磁通的暂态过程,励磁涌流将不再出现,变压器直接进入稳态运行^[10]。然而目前在实际工程中要实现准确确定变压器铁芯中的剩磁还具有一定的难度,因此空载变压器的选相投切控制仍未完全解决剩磁对涌流的影响这一问题。

2.1 分闸过程暂态分析

原边采用星形不接地连接方式的变压器的电路模型如附录中的图 A2 所示。图中, r_a 、 r_b 、 r_c 和 L_a 、 L_b 、 L_c 分别为三相空载变压器原边的等效电阻和等效电感。在分闸过程中,若首先进行分闸操作的是开关中的两相,则三相电流同时为 0, 等同于三相开关同时分闸;若首先选取其中一相进行分闸操作,则剩余两相变为同一回路,只要其中一相断开,均相当于同时分闸。相比于随机相角分断,零电流分断技术具有短燃弧、短间隙下分断大电流的技术优势,避免了分断电弧引起的暂态过程对电网运行造成影响。因此在变压器退出运行时,选择在下电指令发出后首先检测到触头电流过零点的开关,在其电流过零时首先断开,然后其余两相在它们的电流过零点时同时分断。按照这种分闸顺序,变压器退出运行时的剩磁情况分析如下。

假设 B 相开关在收到下电信号后首先检测到其电流过零点,在其分断瞬间 B 相相电压的相位角为 α ,则 A、C 两相满足:

$$\begin{cases} i_a r_a + N \frac{d\Phi_a}{dt} - i_c r_c - N \frac{d\Phi_c}{dt} = \\ U_m \sin\left(\omega t + \alpha + \frac{2}{3}\pi\right) - U_m \sin\left(\omega t + \alpha - \frac{2}{3}\pi\right) \\ i_c = -i_a \end{cases} \quad (5)$$

其中, Φ_a 、 Φ_c 分别为 A 相、C 相的磁通值; N 为变压器原边绕组匝数。

由式(2)可知, i_a 、 i_c 可表示为:

$$i_a = N \frac{\Phi_a}{L_a}, \quad i_c = N \frac{\Phi_c}{L_c} \quad (6)$$

将式(6)代入式(5),可知此时 A 相磁通的表达式为:

$$\begin{cases} \Phi_a = \frac{L_a}{N} \frac{\sqrt{3} U_m}{\sqrt{(r_a + r_c)^2 + \omega^2 (L_a + L_c)^2}} \times \\ \cos\left(\omega t + \frac{\pi}{2} + \alpha + \beta\right) + c_a e^{-\frac{r_a + r_c}{L_a + L_c} t} \\ \beta = \arctan \frac{r_a + r_c}{\omega (L_a + L_c)} \end{cases} \quad (7)$$

其中,系数 c_a 由 A 相磁通的初值决定,且 $r_a \ll \omega L_a$ 、 $r_b \ll \omega L_b$,则 $\beta \approx 0^\circ$ 。因此 A、C 两相的磁通表达式可进一步写为:

$$\begin{cases} \Phi_a = \frac{L_a}{N} \frac{\sqrt{3} U_m}{\sqrt{(r_a + r_c)^2 + \omega^2 (L_a + L_c)^2}} \times \\ \sin(\omega t + \alpha) + c_a e^{-\frac{r_a + r_c}{L_a + L_c} t} \\ \Phi_c = -\frac{L_c}{N} \frac{\sqrt{3} U_m}{\sqrt{(r_a + r_c)^2 + \omega^2 (L_a + L_c)^2}} \times \\ \sin(\omega t + \alpha) + c_c e^{-\frac{r_a + r_c}{L_a + L_c} t} \end{cases} \quad (8)$$

由式(8)可知,B相开关分断后,变压器 A、C 两相铁芯内的磁通由两部分组成:一部分为磁通的稳态分量,A、C 两相的磁通稳态值大小相等、方向相反;另一部分为磁通的暂态分量,受 B 相开关刚分断时 A、C 两相的磁通值影响。

若在 A、C 两相的磁通暂态分量衰减至 0 后再实现零电流分断,假设 A、C 两相断开时 A 相电压的相角为 γ ,由于三相变压器铁芯内的磁通值满足式(9),则三相铁芯内的剩磁如式(10)所示,此时,B相铁芯内的剩磁为 0,A、C 两相铁芯内的剩磁数值相等、方向相反。

$$\Phi_a + \Phi_b + \Phi_c = 0 \quad (9)$$

$$\begin{cases} \Phi_{ar} = \frac{L_a}{N} \frac{\sqrt{3} U_m}{\sqrt{(r_a + r_c)^2 + \omega^2 (L_a + L_c)^2}} \sin\left(\gamma - \frac{2}{3}\pi\right) \\ \Phi_{br} = 0 \\ \Phi_{cr} = -\frac{L_c}{N} \frac{\sqrt{3} U_m}{\sqrt{(r_a + r_c)^2 + \omega^2 (L_a + L_c)^2}} \sin\left(\gamma - \frac{2}{3}\pi\right) \end{cases} \quad (10)$$

2.2 合闸分相控制策略

根据变压器按照上述分闸顺序退出运行时的剩磁结果,将整个合闸过程分为 2 个阶段进行分析。与分闸过程同理,仅当两相同时合闸时,空载变压器原边才形成通路,现假设 A、C 两相在 A 相电压的相角 θ 处合闸,则仅含 A、C 两相的回路方程为:

$$\begin{cases} i_a r_a + N \frac{d\Phi_a}{dt} - i_c r_c - N \frac{d\Phi_c}{dt} = \\ U_m \sin(\omega t + \theta) - U_m \sin\left(\omega t + \frac{2}{3}\pi + \theta\right) \\ i_a = -i_c \end{cases} \quad (11)$$

同上述分析,将式(6)代入式(11)可得:

$$\begin{cases} \Phi_a = -\frac{L_a}{N} \frac{\sqrt{3} U_m}{\sqrt{(r_a + r_c)^2 + \omega^2 (L_a + L_c)^2}} \times \\ \cos\left(\omega t - \frac{\pi}{6} + \theta\right) + c_{2a} e^{-\frac{r_a + r_c}{L_a + L_c} t} \\ \Phi_c = \frac{L_c}{N} \frac{\sqrt{3} U_m}{\sqrt{(r_a + r_c)^2 + \omega^2 (L_a + L_c)^2}} \times \\ \cos\left(\omega t - \frac{\pi}{6} + \theta\right) + c_{2c} e^{-\frac{r_a + r_c}{L_a + L_c} t} \end{cases} \quad (12)$$

其中, c_{2a} 、 c_{2c} 为合闸磁通的暂态分量系数,由各自磁通的初始条件决定,即上次分闸完成后铁芯内的剩磁(表达式如式(10)所示)。联立式(10)、(12)可得到 c_{2a} 、 c_{2c} 的表达式为:

$$\begin{cases} c_{2a} = \frac{L_a}{N} \frac{\sqrt{3} U_m}{\sqrt{(r_a + r_c)^2 + \omega^2 (L_a + L_c)^2}} \times \\ \left[\sin\left(\gamma - \frac{2}{3}\pi\right) + \cos\left(\theta - \frac{\pi}{6}\right) \right] \\ c_{2c} = -\frac{L_c}{N} \frac{\sqrt{3} U_m}{\sqrt{(r_a + r_c)^2 + \omega^2 (L_a + L_c)^2}} \times \\ \left[\sin\left(\gamma - \frac{2}{3}\pi\right) + \cos\left(\theta - \frac{\pi}{6}\right) \right] \end{cases} \quad (13)$$

从根本上抑制变压器励磁涌流的途径是消除铁芯的饱和现象。而当 c_{2a} 、 c_{2c} 为 0 时,由式(12)可知,A、C 两相空投时的磁通将不存在暂态分量,直接进入稳态过程。根据这一条件求解式(13),可得 $\theta = \gamma$ 。由此得出在采用 2.1 节中分闸策略的基础上,当

A、C 两相的合闸相位角与上次的分闸相位角相等时,可使得 A、C 两相铁芯内的磁通在合闸初始时刻直接进入稳态,从而实现了无需在分闸后测量 A、C 两相剩余磁通的数值即可从根本上抑制励磁涌流的目的。

在 A、C 两相闭合时刻,变压器一次侧的中性点电压 U_n 如附录中的图 A3 所示,其幅值大小为 $(U_a + U_c)/2$,方向与 B 相电源电压 U_b 相反,因此,当 B 相开关合闸时,B 相绕组的电压幅值为 $3U_b/2$,相位与 U_b 相同。又因为变压器 B 相铁芯内的剩磁为 0,于是 B 相的最佳合闸角与第 1 节所述的不计变压器剩磁时的单相变压器合闸类似,均位于电压峰值处。

综合上述分析结果可推理得到,在考虑变压器剩磁的情况下三相空载变压器的最佳分合闸策略为:分闸时,B 相开关首先在其电流过零时分断,然后 A、C 两相在其共同电流过零时断开;合闸时,A、C 两相首先在与上次分断时相同的电压相位角处闭合,然后 B 相在其电压到达峰值时完成闭合动作。控制策略的动作时序如图 2 所示。

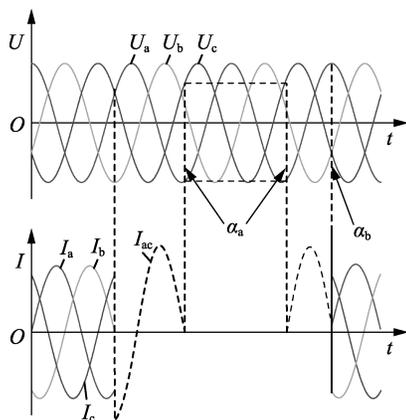


图 2 控制策略动作时序图

Fig.2 Action sequence diagram of control strategy

3 控制策略仿真分析

构建控制策略、变压器本体、投切电路三者的 ATP/EMTP 仿真模型,对所提控制策略进行仿真分析。系统模型主要包含电源、三相开关、原边星型连接中性点不接地的变压器模型以及各相铁芯的磁链检测模块这 4 个部分,如附录中的图 A4 所示。电源线电压为 15 kV,变压器变比为 15:6.9, C_{hg} 、 C_{lg} 、 C_{hl} 分别为变压器对地和匝间的分布电容,采用 3 个非线性电感模拟变压器铁芯的磁滞现象^[15]。根据 $e_2 = -d\psi_1/dt$,对变压器二次侧电压进行积分变换,得出三相铁芯内的磁链。仿真结果如附录中的图 A5 所示。

由图 A5(a)所示仿真结果可以看出,在 B 相开关断开后且 A、C 两相开关吸合时,B 相电压等于中性点电压。当组合式开关完成分断操作时, U_a 、 U_b 、 U_c 的电压值与 A、C 两相开关分断时中性点的电压

相同。由图 A5(b)所示仿真结果可以看出,在分闸过程中,B 相开关首先在其电流过零点分断,此时 B 相铁芯内的剩磁随着时间的推移逐渐减小,经过一段时间后 B 相的剩磁接近 0,此时 $\Phi_a \approx -\Phi_c$,这与式(8)所示的理论分析一致。经过一段延迟时间,A、C 两相开关分别在其电流过零点处分断,此后 A、C 两相铁芯的剩磁值将保持恒定,同式(10)所述。仿真结果表明:相比于空载变压器的稳定励磁磁链,空投后变压器的三相磁链差异较小。由图 A5(c)所示仿真结果可以看出,在开关完成合闸操作后,变压器的暂态电流略高于变压器空载稳定运行时的电流,验证了本文所提控制策略可显著消除变压器空投时的励磁涌流。

由式(8)及图 A5(b)所示仿真结果可知,在 B 相开关分闸后,若要使 A、C 两相的磁链值达到稳定状态,暂态项的衰减需要一段延迟时间。然而实际应用中,在没有外加剩磁测量电路的前提下,很难判断磁链暂态过程的稳定时刻,且在 B 相开关分断后,空载变压器即处于断相运行状态,长时间的断相运行不符合电力操作规程。因此,在变压器退出运行时,控制策略需要缩短 B 相开关分断与 A、C 两相开关分断的间隔时间。

间隔时间的缩短将导致空载变压器退出运行后 A、C 两相之间的剩磁不平衡度相差较大。但由于剩余磁通的数值难以准确获得,因此需要在一定程度上忽略剩余磁通不平衡的差异。本文在仿真模型中对控制策略进行简化,调整组合式开关的退出运行时序,其结果如图 3 所示。

图 3(b)中,三相的剩余磁链分别为 27.5、-9.3、-19.7 Wb,图 3(c)中励磁电流的最大值约为分断操作前稳态电流的 2~3 倍。虽然此时的励磁涌流较附录中图 A5 中的暂态电流略高,但本文所提控制策略仍显著降低了空载变压器的励磁涌流。

4 实验验证

4.1 硬件控制原理

为了验证本文所提控制策略的可行性、有效性,本节设计了硬件控制模块并搭建了实验平台。实验所得波形和数据均由示波器配合高带宽的电流、电压探头采集获取。硬件原理如附录中的图 A6 所示,数字处理芯片采用的是 dsPIC 芯片 33FJ16GS502。电压、电流检测电路分别用于采集主回路电压、电流信号,并将其输至 dsPIC 系统进行数据处理,从而判断主回路电压、电流的过零时刻。同步信号发生电路用于多极开关间的信号传递。线圈驱动回路电源经整流、滤波后,得到较为平滑的直流电压 V^* ,并通过降压得到模块供电电源,为 dsPIC 及开关管驱动电路供电。线圈输入电压采样电路可监测线圈输入

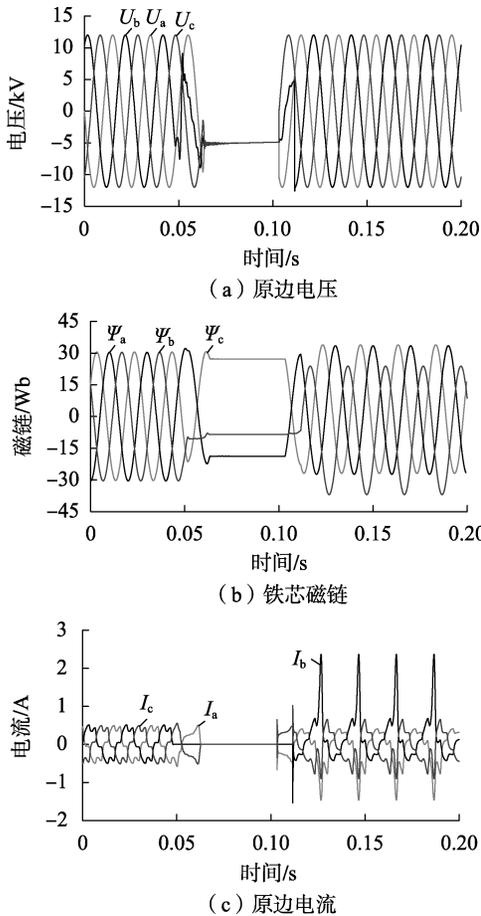


图 3 基于简化控制策略的仿真结果

Fig.3 Simulative results based on simplified control strategy
 电源大小,当符合工作电压要求时,dsPIC 发出相应合闸、分闸控制指令。线圈驱动回路采用改进的 Buck 变换器,对其线圈电流进行闭环控制,每极 Buck 回路主要由斩波开关 S_1 、续流电路、去磁电路和去磁开关组成。根据开关的吸合、吸持以及分断过程,本文设计的 3 种工作模式线圈驱动拓扑结构如图 4 所示。图中, U_{dc} 为整流后电容 C_1 两端的直

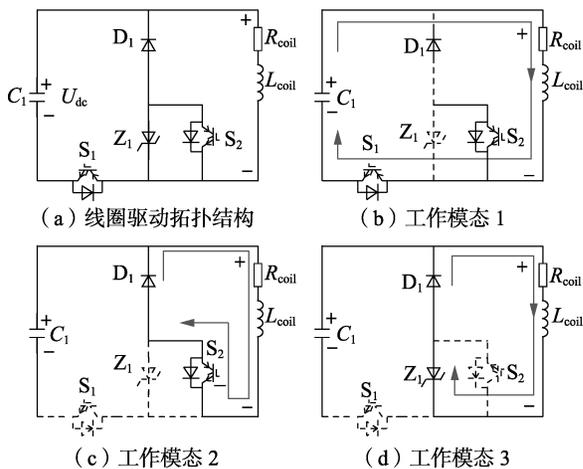


图 4 线圈驱动拓扑结构及其 3 种工作模式

Fig.4 Topological structure of coil driving circuitry and its three operation modes

流母线电压;箭头表示电流轨迹;虚线表示器件处于截止状态; R_{coil} 、 L_{coil} 分别为接触器线圈的等效电阻和电感; S 为带有反并联二极管的开关管, S_1 为斩波开关, S_2 为去磁开关; D_1 为超快恢复二极管,其导通压降低,开关效率高; Z_1 为箝位二极管。

根据电流轨迹,电路具有 3 种工作模式: S_1 、 S_2 同时导通,线圈处于激磁状态,线圈电压 u_{coil} 为正,数值上等于母线直流电压 U_{dc} ,线圈电流快速上升,将该模式定义为工作模式 1; S_1 截止, S_2 导通,线圈处于续流状态,忽略开关管和二极管极小的导通压降,线圈两端电压 u_{coil} 近乎为 0,线圈电流缓慢下降,将该模式定义为工作模式 2; S_1 、 S_2 同时截止,线圈处于快速去磁状态,电流快速衰减,将该模式定义为工作模式 3,此时线圈磁能消耗在 Z_1 ,线圈电流经过 D_1 、 Z_1 形成回路, Z_1 反向导通。单极开关在吸合过程和吸持阶段中,通过线圈电流的反馈信号更新脉宽调制(PWM)的占空比,调整斩波开关 S_1 的导通和关断时间,开关管时序处于工作模式 1 与工作模式 2 的交替切换状态。在分断过程中,线圈电流需要快速衰减,此时控制模块处于工作模式 3,线圈电压被钳位为负值,始终维持高速去磁状态。

图 5 为组合式开关分相操作的软件控制流程图,包括主程序及逻辑通信中断子程序。以合闸过程为例:主程序循环检测输入电压平均值,一旦达到吸合阈值,本极开关立即发出单极上电信号,然后等待其余 2 极开关;收到三相信号后,逻辑中断自动触发运行,输出同步上电信号,电压检测电路即开启对电网电压的实时采样,当参考点检测成功后,进入触发延迟中断子程序,延迟结束后,进行合闸闭环控制。

4.2 控制策略实验

实验所用的组合式开关负载为三相三柱式的空载变压器,其变比为 380 V/220 V,容量为 1.5 kV·A,接线方式为 Yy0,空载稳态励磁电流为 0.5 A。当组合式开关三相同时随机分合操作时,励磁涌流结果如附录中的表 A1 所示。由表中励磁涌流数据可知,随机分合闸时励磁涌流的幅值波动很大,这表明随机分闸使得变压器铁芯内的剩磁状态波动较大,且在空载变压器随机合闸时励磁涌流的大小与剩磁的状态密切相关,与理论分析一致。

在所得的数据中,第 3 组 A 相励磁涌流最大,约为 112 A,已经导致实验台保护装置误动作。实验中的励磁涌流波形如图 6 所示。

选取引言中提及的当前抑制空载变压器励磁涌流主要的一种控制策略——快速合闸策略进行实验。文献[14]已详述其原理,本文不再赘述。该策略的合闸顺序为:A 相开关首先在其电压峰值处合闸,当 A 相开关合闸 1/4 个周期后,即为 B、C 两相

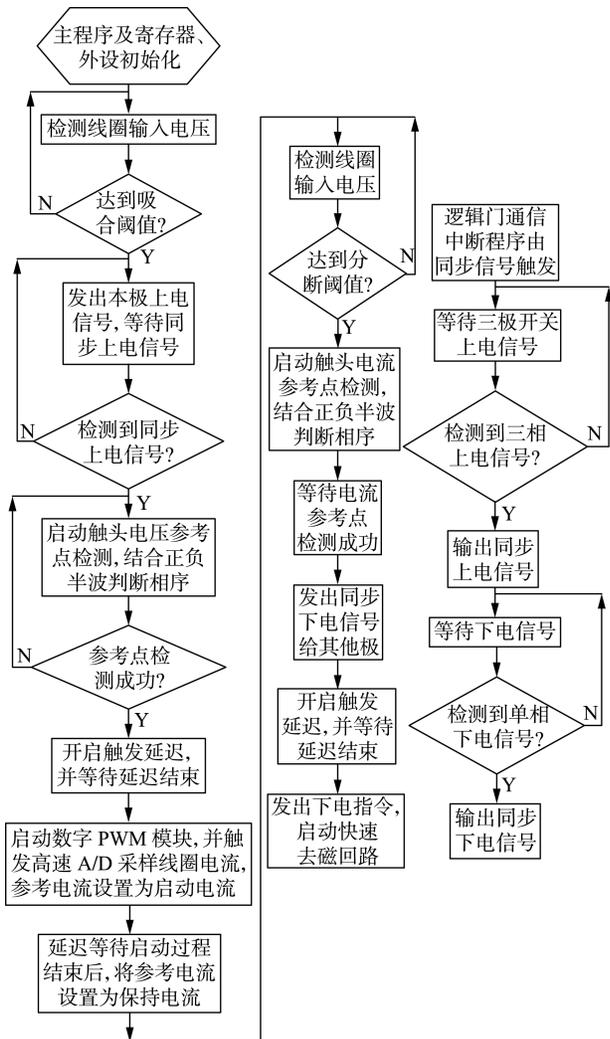


图 5 分相控制软件流程图

Fig.5 Flowchart of phase separation control software

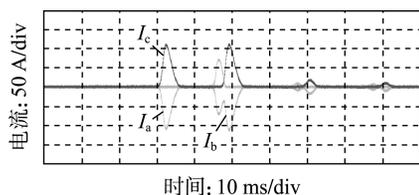


图 6 空载变压器随机合闸时的励磁涌流波形

Fig.6 Inrush current waveforms of random closing of no-load transformer

的最佳合闸位置,实验结果如图 7 所示。由图可知, A、B、C 三相的励磁涌流幅值分别为 16.3、14.6、14.8 A, 约为随机合闸时所测得励磁涌流平均幅值的 29% 左右,结果表明了快速合闸策略能够有效地降低励磁涌流幅值。

采用第 2 节推导得到的考虑变压器剩磁的分相控制策略进行实验分析,分闸过程中, B 相开关首先实现零电流分断,然后 A、C 两相在其共同过零点分断,实验结果如图 8 所示,同时电压采样电路记录此时的电压数据;合闸过程中, A、C 两相开关首先在其电压相位角与上次分闸时对应的相位角处合闸,然

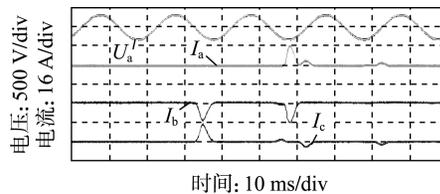


图 7 基于快速合闸策略的空载变压器的励磁涌流波形

Fig.7 Inrush current waveforms of no-load transformer based on fast switching on strategy

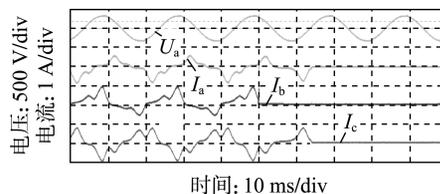


图 8 考虑变压器剩磁的分相控制策略分闸过程的实验结果

Fig.8 Experimental results of opening process of phase separation control strategy considering transformer's remanence

后 B 相开关在 B 相电压达到峰值处合闸,分相合闸的实验结果如图 9 所示。

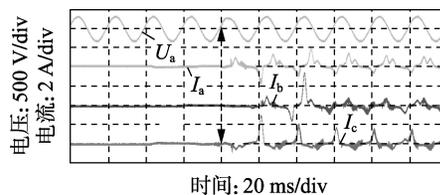


图 9 考虑变压器剩磁的分相控制策略合闸过程的实验结果

Fig.9 Experimental results of closing process of phase separation control strategy considering transformer's remanence

由图 9 可知,当采用本文所提分相控制策略时, A、B、C 三相的励磁涌流幅值分别为 1.3、2.3、2.1 A, 约为随机合闸时所测得平均励磁涌流幅值的 3% 左右。相较于快速合闸策略,本文所提控制策略的涌流抑制效果更加显著,验证了本文所提控制策略在不外加剩磁测量电路的基础上,能够有效抑制三相空载变压器合闸时的励磁涌流,具有较高的工程应用价值。

此外,本文针对原边星形不接地的三相变压器展开分析,相比于原边星形接地的三相变压器,前者在进行分合闸操作时,施加在开关触头及变压器的电压将经历相电压与线电压的转换过程,控制策略的制定更为复杂,要求所设计的硬件样机各相触头具有协调配合、统一动作的功能。因此,以原边星形不接地的三相变压器为研究对象,通过改变控制时序,则其控制策略完全可适用于星形接地方式的三相变压器。

5 结论

(1) 本文阐明了原边采用中性点不接地方式的三相空载变压器投切瞬间的关联磁链状态,在考虑

剩磁的情况下提出一种新颖的组合式开关分相控制策略,能够有效地减小空载或轻载变压器的合闸励磁涌流。

(2)建立基于 ATP/EMTP 的变压器暂态分析模型,分析并验证了分相控制抑制励磁涌流的原理,给出如下控制规律:分闸时,三相开关分别在其电流过零点处断开;合闸时,A、C 两相首先在与上次分断时相同的电压相位角处闭合,然后 B 相在其电压到达峰值处完成闭合动作。

(3)设计了一种具有逻辑通信功能的三工作模式单极开关控制拓扑,实现了各极开关协调配合、统一控制的功能;建立了硬件平台,采用数字控制实现了本文所提分相控制策略,验证了该策略的实际可行性。

附录见本刊网络版(<http://www.epae.cn>)。

参考文献:

- [1] 秦涛涛,董恩源,陈宇硕,等.真空断路器循迹控制[J].中国电机工程学报,2014,34(33):5983-5990.
QIN Taotao,DONG Enyuan,CHEN Yushuo,et al. Path tracking control of vacuum circuit breaker[J]. Proceedings of the CSEE,2014,34(33):5983-5990.
- [2] 段雄英,黄智慧,廖敏夫,等.基于多元线性回归法的相控开关操作时间的补偿与预测[J].电力自动化设备,2009,29(7):72-75.
DUAN Xiongying,HUANG Zhihui,LIAO Minfu,et al. Prediction and compensation of operating time based on multi-element linear regression for controlled switching[J]. Electric Power Automation Equipment,2009,29(7):72-75.
- [3] CUI Y,ABDUSALAM S G,CHEN S,et al. A sequential phase energization technique for transformer inrush current reduction-part I: simulation and experimental results[J]. IEEE Transactions on Power Delivery,2005,20(2):943-949.
- [4] 兀鹏越,余信,李毅,等.变压器励磁涌流抑制器工程应用及探讨[J].电力自动化设备,2012,32(6):145-149.
WU Pengyue,YU Xin,LI Yi,et al. Engineering application of transformer excitation inrush suppressor[J]. Electric Power Automation Equipment,2012,32(6):145-149.
- [5] SRIDEVI T,REDDY K R,SYAMALA N L J. Harmonic analysis of inrush current using fast Fourier transform[C]//International Conference on Power. [S.l.]:IEEE,2013:520-524.
- [6] 郑涛,陆格野,赵彦杰,等.基于虚拟等效电感的特高压调压变压器励磁涌流判别算法[J].电工技术学报,2016,31(7):118-125.
ZHENG Tao,LU Geyue,ZHAO Yanjie,et al. A discriminating algorithm for identifying inrush of UHV voltage-regulating transformer based on virtual equivalent inductance[J]. Transactions of China Electrotechnical Society,2016,31(7):118-125.
- [7] TSENG H T,CHEN J F. Voltage compensation-type inrush current limiter for reducing power transformer inrush current[J]. IET Electric Power Applications,2012,6(2):101.
- [8] TARAFDAR HAGH M,ABAPOUR M. DC reactor type transformer inrush current limiter[J]. IET Electric Power Applications,2007,1(5):808.
- [9] WANI M,KURUNDKAR K,BHAWALKAR M P. Use of power electronic converters to suppress transformer inrush current[C]//2012 IEEE International Conference on Power Electronics, Drives and Energy Systems (PEDES). New York, USA:IEEE,2012:1-5.
- [10] 何越,林湘宁,黄景光.一种直接消除变压器合闸励磁涌流的方法[J].电工技术学报,2011,26(11):141-149.
HE Yue,LIN Xiangning,HUANG Jingguang. A method to eliminate the magnetizing inrush current of energized transformers[J]. Transactions of China Electrotechnical Society,2011,26(11):141-149.
- [11] 黄超,刘斌.双卷变压器平衡绕组回路分析及其对继电保护的影响[J].电力自动化设备,2017,37(12):205-210.
HUANG Chao,LIU Bin. Circuit analysis of two-winding transformer's balancing winding and its influence on relay protection[J]. Electric Power Automation Equipment,2017,37(12):205-210.
- [12] 班连庚,郑彬,周佩朋,等.特高压交流变压器选相合闸技术研究及工程应用[J].电网技术,2018,42(4):1226-1233.
BAN Liangeng,ZHENG Bin,ZHOU Peipeng,et al. Research and engineering application of phase selection closing technology for UHV AC transformers[J]. Power System Technology,2018,42(4):1226-1233.
- [13] 李晓萍,文习山,蓝磊,等.单相变压器直流偏磁试验与仿真[J].中国电机工程学报,2007,27(9):33-40.
LI Xiaoping,WEN Xishan,LAN Lei,et al. Test and simulation for single-phase transformer under DC bias[J]. Proceedings of the CSEE,2007,27(9):33-40.
- [14] 沃建栋,郑涛,万磊,等.基于合闸控制策略的变压器励磁涌流抑制措施研究[J].电力系统保护与控制,2010,38(22):32-36.
WO Jiandong,ZHENG Tao,WAN Lei,et al. Study on inrush current suppression method based on the breaker control strategy[J]. Power System Protection and Control,2010,38(22):32-36.
- [15] 李伟,黄金,方春恩,等.基于相控开关技术的空载变压器励磁涌流抑制研究[J].高压电器,2010,46(5):9-13.
LI Wei,HUANG Jin,FANG Chun'en,et al. Research on elimination of no-load power transformers inrush currents based on controlled switching[J]. High Voltage Apparatus,2010,46(5):9-13.
- [16] 张庆杰,袁海文.配永磁机构的真空断路器同步分合闸控制系统设计与实现[J].电力自动化设备,2010,30(3):98-103.
ZHANG Qingjie,YUAN Haiwen. Design and implementation of synchronous switching control system for vacuum breaker with permanent magnetism actuator[J]. Electric Power Automation Equipment,2010,30(3):98-103.

作者简介:



王 阳

王 阳(1993—),男,黑龙江双鸭山人,硕士研究生,主要研究方向为智能电器及其在线监测(E-mail:1120235642@qq.com);

许志红(1963—),女,山西临汾人,教授,博士研究生导师,通信作者,主要研究方向为智能电器及其在线监测(E-mail:641936593@qq.com)。

Inrush current suppression strategy of three-phase transformer based on combined-switches

WANG Yang, XU Zhihong

(College of Electrical Engineering and Automation, Fuzhou University, Fuzhou 350108, China)

Abstract: Aiming at the problem that the primary windings may flow through the inrush current when the transformer is switched on under the condition of no-load or light-load, a novel individual phase control idea based on combined-switches is proposed. Based on analyzing the transient switching process of three-phase no-load transformer whose primary side adopts the star-shaped ungrounded connection mode, the state of the connected flux linkage at the switching moment of the no-load transformer is deduced, then the optimal dynamic switching angle for suppressing the switching inrush current is obtained considering the residual flux, which changes the existing phase control mode depending on the residual flux measurement circuit and the pre-set fixed phase angle. The power transformer model based on ATP/EMTP is built to simulate the transient switching-on and switching-off process, and the voltage, current and magnetic flux characteristics at the switching moment are obtained. The proposed individual phase control principle is verified and then the control law is given. A novel single-pole switch control topology with three operation modes and logical communication function is designed for performing the individual phase control strategy. The dynamic combination of single-pole switches can realize the coordinated action and unified control of each pole contact in the optimal phase. The hardware control platform is built to verify that the proposed control strategy can effectively limit the inrush current to about 3% of the inrush current in random switching.

Key words: three-phase transformer; inrush current; combined-switches; residual flux; no-load transformer; individual phase control

(上接第 69 页 continued from page 69)

技术、牵引传动系统(**E-mail**: haomingxuan@hnu.edu.cn);

(**E-mail**: 473260354@qq.com);

王涛(1994—),男,湖南双峰人,硕士研究生,主要研究方向为交直流电能变换新技术、储能装置在配网中的应用

刘裕兴(1993—),男,湖南邵阳人,博士,主要研究方向为电力机车的牵引传动技术(**E-mail**: 503821992@qq.com)。

Stability control and improvement strategy for DC side voltage of DC-AC electric locomotives

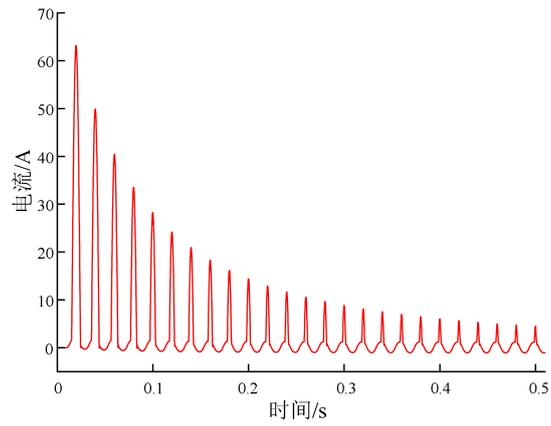
XU Jiazhu, HAO Mingxuan, WANG Tao, LIU Yuxing

(College of Electrical and Information Engineering, Hunan University, Changsha 410082, China)

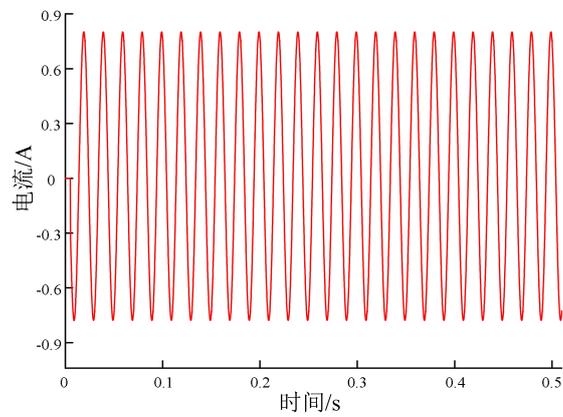
Abstract: Aiming at the problem of DC side voltage instability of DC-AC electric locomotives under constant power condition, a kind of active impedance stability control based on dynamic decoupling of grid-side circuit and traction drive system is proposed, and the improvement strategy of feedback factor is put forward to reduce the influence of the grid-side voltage ripple on traction drive system. The equivalent mathematical model is established, and the active impedance stability control method is proposed according to the system stability criterion. Then the effect of stability control on the traction drive system is analyzed when voltage ripple exists on the grid side, and the proper feedback factor is introduced to improve the control effect. The simulation and experiment prove the feasibility and correctness of the proposed control method and improvement strategy.

Key words: electric locomotive; active impedance; traction drive system; feedback factor; constant power; voltage control

附录



(a) $\alpha=0^\circ$



(b) $\alpha=90^\circ$

图 A1 空载变压器合闸电流波形

Fig.A1 Closing current waveform of no-load transformer

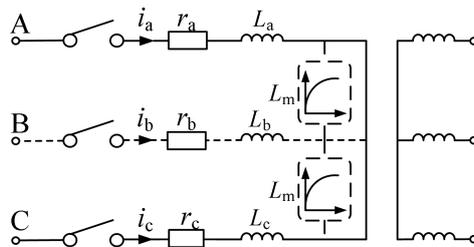


图 A2 空载变压器的电路模型

Fig.A2 Circuit model of no-load transformer

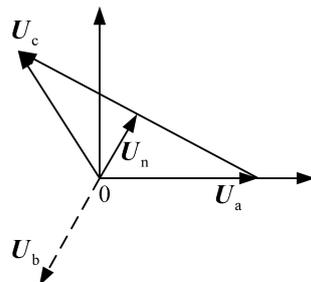


图 A3 B 相电压矢量图

Fig.A3 Vector graph of phase-B voltage

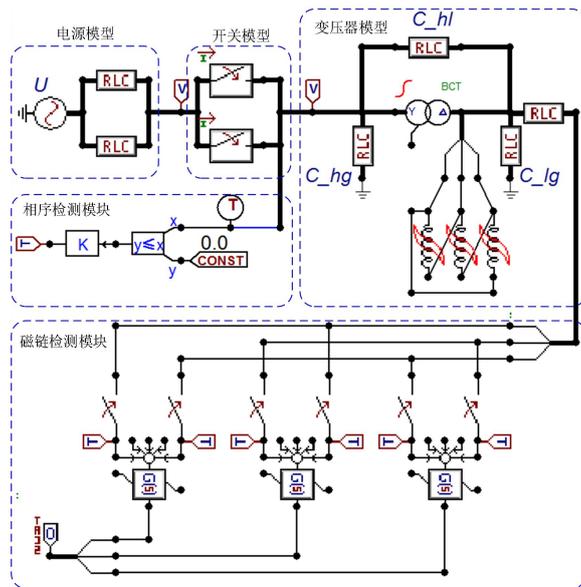
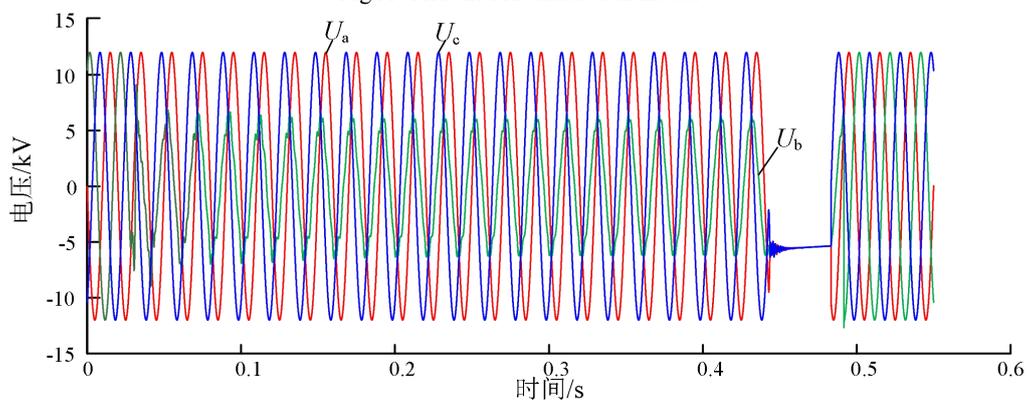
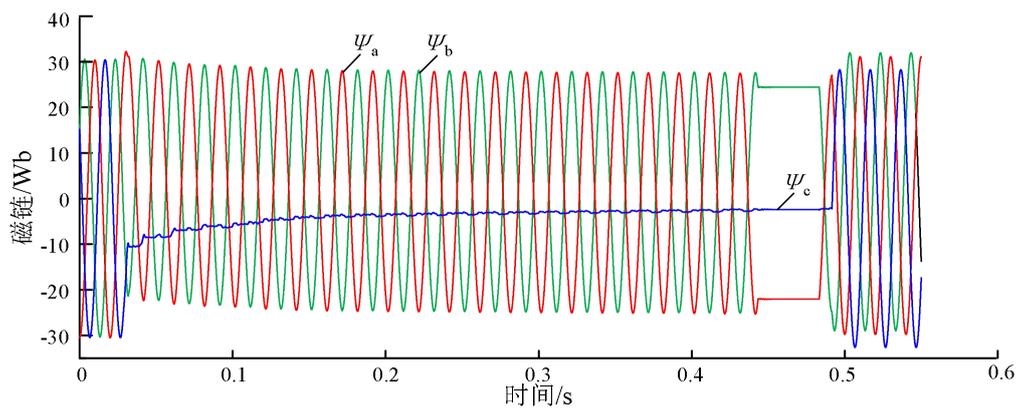


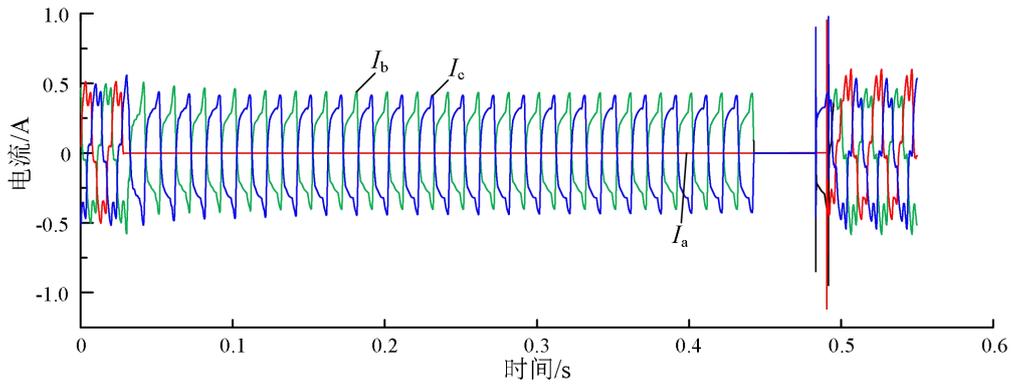
图 A4 ATP/EMTP 仿真模型
Fig.A4 ATP/EMTP simulation model



(a) 原边电压



(b) 铁芯磁链



(c) 原边电流

图 A5 控制策略的仿真结果

Fig.A5 Simulative results of control strategy

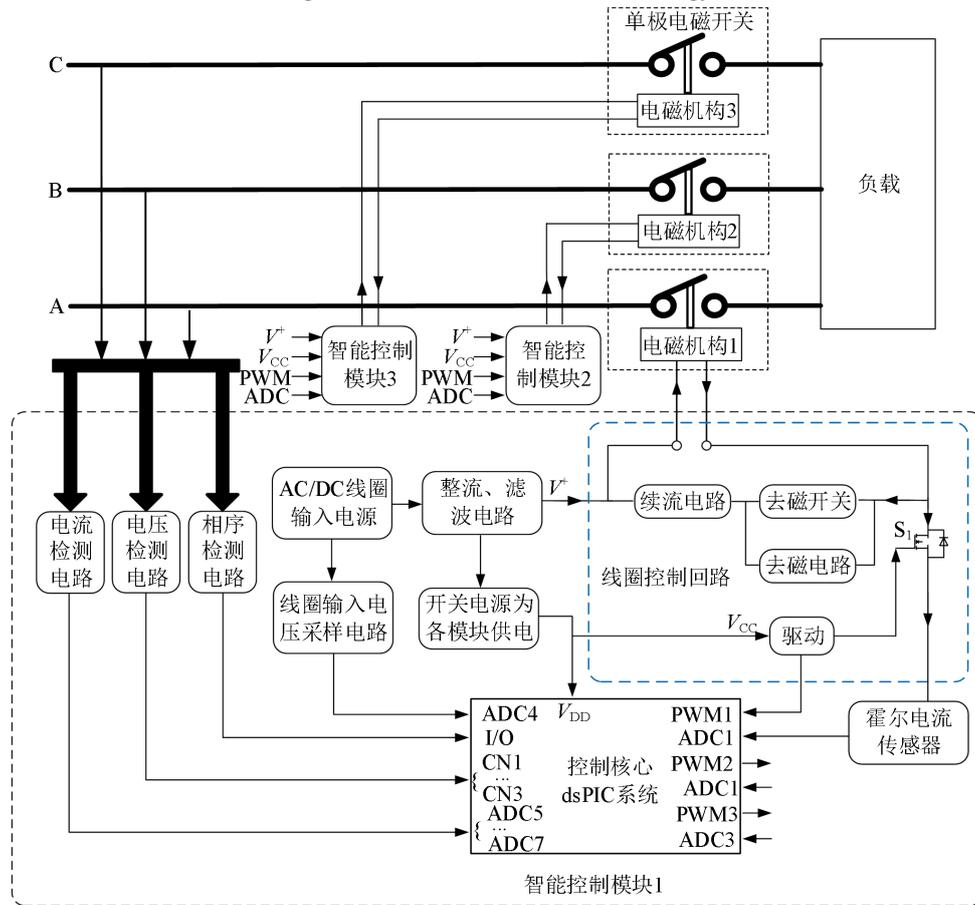


图 A6 硬件模块原理框图

Fig.A6 Schematic diagram of hardware module

表 A1 空载变压器随机合闸时的励磁涌流

Table A1 Inrush current of no-load transformer at random switching

序号	涌流最大值/A	A 相涌流/A	B 相涌流/A	C 相涌流/A
1	68	53	68	58
2	85	85	56	62
3	112	112	79	83
4	81	73	81	65
5	78	51	78	63
6	92	58	42	92