

一种变压器短路试验供电装置网侧电流平衡控制研究

王康¹, 王国彬¹, 曾静岚¹, 刘冰¹, 赵晓君², 黄孟欣³

(1. 国网福建省电力有限公司电力科学研究院, 福建 福州 350007;

2. 燕山大学 电气工程学院, 河北 秦皇岛 066000; 3. 北京

国网普瑞特高压输电技术有限公司, 北京 102200)

摘要:当利用电网进行变压器短路试验时,较大的短路电流会对电网产生冲击,影响同一电网中其他负荷的安全运行。为此,设计了一种三相四线制变压器短路试验供电装置,通过位于直流母线上的储能装置,额外形成一条能量供给通道,以减轻短路电流对电网的冲击。然而利用该供电装置对单相变压器进行短路试验时,若不加以有效控制,系统输出侧的不平衡电流将导致网侧电流同样出现不平衡现象,从而造成网侧中点电位发生偏移,不仅影响装置控制精度和效果,还会使其三相输出电压不对称,严重时会造成被测变压器的损坏。为此,提出了一种基于基波功率平衡的输入电流补偿算法,用于计算输入电流基准,实现不平衡变压器短路试验条件下的网侧三相电流平衡运行,并通过实验验证了该算法的可行性和有效性。

关键词:变压器短路试验;功率平衡;不平衡电流控制;直流母线电压波动

中图分类号:TM761 **文献标识码:**A **DOI:**10.19457/j.1001-2095.dqed21055

Research on Current Balance Control of Grid Side for a Transformer Short Circuit Test Power Supply Device

WANG Kang¹, WANG Guobin¹, ZENG Jinglan¹, LIU Bing¹, ZHAO Xiaojun², HUANG Mengxin³

(1. State Grid Fujian Electric Power Research Institution, Fuzhou 350007, Fujian, China; 2. School of

Electrical Engineering, Yanshan University, Qinhuangdao 066000, Hebei, China 3. Beijing

SG-EPRI UHV Transmission Technology Co., Ltd., Beijing 102200, China)

Abstract: When the transformer short-circuit test is carried out in the power grid, the larger short-circuit currents will have a significant impact on the power grid and affect the safe operation of other loads in the same power grid. For this reason, a power supply device for the transformer short-circuit test was designed in the three-phase four-wire systems, which could form an additional energy supply path through the energy storage devices located on the DC bus to reduce the impact of short-circuit currents on the power grid. However, when this power supply device was used to perform a short-circuit test for a single-phase transformer, if it was not effectively controlled, the unbalanced currents on the output side of the system would also lead to the unbalance currents on the grid side, resulting in the offset of the midpoint potential on the grid side, which not only could affect the control accuracy and effect of the device, but also make the three-phase output voltage asymmetrical. In serious cases, it might cause damage to the tested transformer. To this end, an input current compensation algorithm based on fundamental power balance was proposed to calculate the input current references, so as to realize the balanced operation of three-phase currents on the grid side under the condition of the short-circuit test for unbalanced transformers. Also, the feasibility and effectiveness of the algorithm were verified by experiments.

Key words: transformer short-circuit test; power balance; unbalanced current control; DC bus voltage fluctuation

电力变压器在电力系统中承担着不可替代的作用,其在保障电力系统的安全可靠、长期稳

定运行方面对整个国家经济建设和发展、社会秩序的稳定均具有重要意义。然而变压器作为电

力系统的一个重要设备,其本身的安全、经济、可靠运行,取决于本身的制造质量和运行环境以及检修质量。由于雷击、继电保护误动或者拒动等原因造成电网出现短时短路状态,所产生的冲击性短路电流可能使变压器受到损害。发生短路故障时变压器绕组将承受巨大且不均匀的轴向和径向电力的作用。如果绕组内部存在薄弱环节,必然会产生绕组扭曲、移位等变形现象,严重时导致突发性毁坏事故。近年来,全国大型电力变压器事故统计表明,变压器短路强度较低引起的事故已经成为变压器事故的首要原因,因此检验电力变压器的短路承受能力成为了亟待解决的重要问题。

当对电力变压器抗短路冲击能力进行试验时,要求供电电源具有较大的容量(如几千kW),以实现瞬间对变压器提供较大的短路电流。变压器短路试验供电电源通常有发电机组和专用电网线路两种形式:1)由发电机组组成的变压器短路冲击试验系统包含电动机、发电机、冲击变压器等设备,整套系统由于含有旋转电机以及需要配套的润滑、保护、盘车等辅助设备,整个系统的造价十分昂贵;2)利用专用电网线路进行短路试验时,容易引起电网保护动作,导致电网大面积停电。因此,对小型化、可移动、大容量变压器短路试验供电装置的研究具有一定的研究价值。

此外,为了降低变压器短路冲击试验时对电网的容量需求,同时提高变压器短路试验供电装置的效率,提出了一种基于统一电能质量调节器(unified power quality conditioner, UPQC)^[1-3]的具有储能系统的变压器短路试验供电装置,其电路拓扑如图1所示,主要由串、并联变换器组成。该装置根据变压器短路试验所需容量,通过串联变换器控制电网输入电流的大小,以灵活分配电网与储能系统之间的能量。具体的,串联变换器控制电网输入电流减小时,电池通过并联变换器为变压器短路试验提供能量,因此该供电装置既可以实现电网或储能系统对短路试验的单独供电,还可以实现电网和储能系统对短路试验的联合供电,有利于降低短路试验对电网容量的要求。

为满足短路试验大功率等级要求,本文所提出的供电装置采用三相四线制^[4-6]系统,其三相之间可以相互独立运行。当对单个变换器进行短路试验时,对供电装置而言表现为系统三相回路处于不平衡负荷状态^[7-9],此时电网侧输入三相电

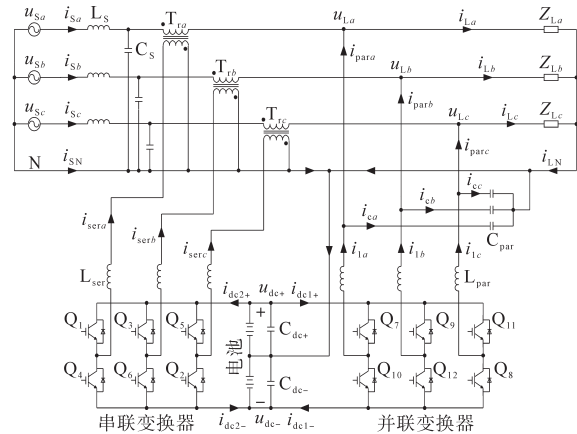


图1 具有储能功能的变压器突发短路试验装置结构图
Fig.1 Structural diagram of transformer with energy storage function sudden short circuit test device

流会出现不对称现象,导致网侧输入中线流过电流。三相四线制系统中,一般选择网侧中线作为整个供电装置与控制回路的参考电位,而当网侧中线流过较大电流时,将引起中线电位不为零^[10](由线路阻抗导致),此时参考电位将发生不同程度偏移,不仅影响供电装置的控制精度,还会使供电装置的三相输出电压产生不平衡现象。在低压配电系统中,为保证中线的安全性和可靠性,规定网侧中线电流不得超过相线电流的25%^[11]。

在三相四线制变压器突发短路试验装置系统中,配电变压器三相短路容量不相同或在试验中某一相发生了短路断路,将出现极为严重的负荷不平衡现象,导致直流母线电压出现较大波动。带有较大波动的直流母线电压将造成变压器突发短路,试验装置网侧三相输入电流产生不平衡状态,使得网侧中线流过较大的电流,从而导致输入中线电位偏移,影响系统的控制精度和效果,如供电装置的输出电压不对称,甚至含有直流分量。此外,由于变压器突发短路试验装置的容量较大,不平衡电流容易增加电网中性线的线路损耗、增加电力电压器损耗,造成变压器发热严重^[12]。

本文聚焦于对变压器短路试验供电装置网侧电流的平衡控制方法研究,当对单个变压器进行短路试验时,保证网侧三相输入电流为平衡状态、减轻电网配电压力的同时,提高供电装置的控制效果,保证变压器短路试验的有效实施。

为有效解决单相变压器短路试验所导致的供电设备网侧中线电位偏移问题,要求该装置必须具备补偿不平衡负荷的能力,并控制三相输入电流在短路试验时保持平衡对称状态。基于

UPQC的变压器电路试验供电装置,其电流平衡控制的一般方法是通过增加不对称电流检测电路实现对电流的平衡控制^[13],但该方法需要额外的硬件电路,且控制效果有限。本文针对变压器突发短路试验装置大概率出现带不平衡负荷的现象,提出了一种基于基波功率平衡的输入网侧电流补偿算法(grid current compensation algorithm, GCCA),用于计算网侧输入电流基波的基准值,提高网侧输入电流的平衡度和正弦度,实现网侧三相输入电流的平衡控制。首先对变压器突发短路试验装置进行数学建模,详细分析了由不平衡负荷引起的直流母线电压波动机理,给出了基于GCCA的变压器突发短路试验装置控制策略。之后,以不平衡最为严重的单相负荷为例,对系统的运行状态进行了量化分析。最后,通过实验验证了变压器突发短路测试装置带不平衡负荷时,控制三相网侧输入电流能够保持平衡状态、网侧中线电流在较小范围内波动,从而证明了理论分析的正确性和所给控制策略的可行性、有效性。

1 直流母线电压波动机理分析

变压器突发短路试验装置主要由背靠背变流器连接构成,其结构如图1所示,电气符号参数如表1所示。

表1 变压器短路试验供电装置电气符号
Tab.1 Electrical symbols of power supply device for transformer short-circuit test

Symbol	Quantity	Symbol	Quantity
$S_1 \sim S_6$	串联变流器功率开关管	T_{abc}	串联变流器
L_s, C_s	网侧滤波器	$S_7 \sim S_{12}$	并联变流器功率开关管
L_{par}, C_{par}	并联变流器滤波器	L_{ser}	串联变流器滤波电感
$C_{dc\pm}$	正负直流母线电容	Z_{Labc}	负荷阻抗
u_{Sabc}	电网电压	N	中线
i_{Sabc}	电网输入电流	u_{Labc}	负荷电压
i_{serabc}	串联变流器输出电流	i_{Labc}	负荷电流
$u_{dc\pm}$	正负直流母线电压	i_{1abc}	流过 L_{par} 电流
i_{SN}	网侧中线电流	i_{parabc}	并联变流器输出电流
$i_{dc\pm}$	正负直流母线电流	i_{LN}	负荷侧中线电流

无论负荷是否平衡,串联变流器都要保证输入电流 i_{Sabc} 为三相平衡对称状态,从而使得输入侧中线电流 i_{SN} 为零。当变压器突发短路试验装置带不平衡负荷时,由于 i_{Sabc} 处于平衡对称状态,因此需要并联变流器为负荷提供不平衡电流,同时不平衡负荷电流 i_{LN} (即负荷侧中线电流)流入

正负直流母线电容 $C_{dc\pm}$ 的中点,造成直流母线电压 u_{dc} 产生较大的波动。根据串联变流器控制原理(详见下文)可知,当直流母线电压波动较大时将会影响网侧输入电流的平衡度,导致流过输入侧中线的电流不为零,有可能造成中线电位(即变压器突发短路试验装置系统的参考地)偏移。因此,有必要分析由不平衡负荷造成的直流母线电压波动机理。

为分析直流母线电压波动机理,将并联变流器从系统中分离出来,其拓扑如图2所示,其中控制变量采样点如虚线所示。

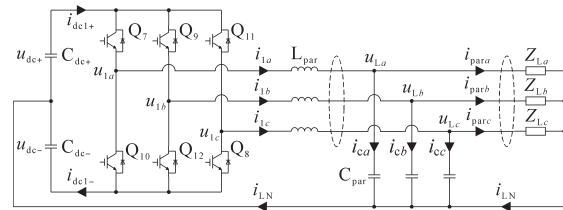


图2 并联变流器电路拓扑

Fig.2 The topology of the parallel converter circuit

图2中, u_{1abc} 为桥臂电压, u_{Labc} 为负荷电压, i_{1abc} 为流过电感 L_{par} 的电流, i_{cabc} 为流过电容 C_{par} 的电流, i_{parabc} 为变流器输出电流, $i_{dc\pm}$ 为正负直流母线电流, i_{LN} 为负荷侧不平衡零序电流。

令 $L_{parabc} = L_{par}, C_{parabc} = C_{par}$,并联变流器状态空间平均模型如下:

$$\begin{cases} u_{1a} = L_{par} \frac{di_{1a}}{dt} + R_{par}i_{1a} + u_{La} \\ u_{1b} = L_{par} \frac{di_{1b}}{dt} + R_{par}i_{1b} + u_{Lb} \\ u_{1c} = L_{par} \frac{di_{1c}}{dt} + R_{par}i_{1c} + u_{Lc} \end{cases} \quad (1)$$

$$\begin{cases} i_{1a} = C_{par} \frac{du_{La}}{dt} + i_{para} \\ i_{1b} = C_{par} \frac{du_{Lb}}{dt} + i_{parb} \\ i_{1c} = C_{par} \frac{du_{Lc}}{dt} + i_{parc} \end{cases} \quad (2)$$

式中: R_{par} 为电感 L_{par} 的等效内阻。

电容电流可表示为

$$\begin{cases} i_{ca} = C_{par} \frac{du_{La}}{dt} \\ i_{cb} = C_{par} \frac{du_{Lb}}{dt} \\ i_{cc} = C_{par} \frac{du_{Lc}}{dt} \end{cases} \quad (3)$$

输入电流 i_{Sabc} 、负荷电流 i_{Labc} 及并联变换器输出电流 i_{parabc} 的关系为

$$\begin{cases} i_{para} = i_{La} - i_{Sa} \\ i_{parb} = i_{Lb} - i_{Sb} \\ i_{parc} = i_{Lc} - i_{Sc} \end{cases} \quad (4)$$

负荷不平衡时,并联变换器需要为其提供不平衡电流,有:

$$i_{para} + i_{parb} + i_{parc} = i_{LN} \quad (5)$$

定义变换器开关函数 $S_{li}(i=a,b,c)$ 为

$$S_{li} = \begin{cases} 1 & i\text{桥壁上管导通、下管关断} \\ -1 & i\text{桥壁下管导通、上管关断} \end{cases} \quad (6)$$

则并联变换器桥臂电压可表示为

$$\begin{cases} u_{1a} = u_{dc+}(S_{1a} + 1)/2 + u_{dc-}(S_{1a} - 1)/2 \\ u_{1b} = u_{dc+}(S_{1b} + 1)/2 + u_{dc-}(S_{1b} - 1)/2 \\ u_{1c} = u_{dc+}(S_{1c} + 1)/2 + u_{dc-}(S_{1c} - 1)/2 \end{cases} \quad (7)$$

正负直流母线电流可表示为

$$\begin{cases} i_{dc1+} = i_{1a}(S_{1a} + 1)/2 + i_{1b}(S_{1b} + 1)/2 + i_{1c}(S_{1c} + 1)/2 \\ i_{dc1-} = i_{1a}(S_{1a} - 1)/2 + i_{1b}(S_{1b} - 1)/2 + i_{1c}(S_{1c} - 1)/2 \\ i_{dc1+} - i_{dc1-} = i_{LN} \end{cases} \quad (8)$$

整理式(1)~式(8),忽略电感内阻 R_{par} 可得:

$$u_{La}i_{para} + u_{Lb}i_{parb} + u_{Lc}i_{parc} = u_{dc+}i_{dc1+} + u_{dc-}i_{dc1-} - \frac{L_{par}}{2} \frac{db_1}{dt} - \frac{C_{par}}{2} \frac{db_2}{dt} \quad (9)$$

其中 $b_1 = i_{1a}^2 + i_{1b}^2 + i_{1c}^2$ $b_2 = u_{1a}^2 + u_{1b}^2 + u_{1c}^2$
由式(9)可以看出,等式左边为并联变换器输出瞬时功率,即

$$p_{par} = u_{La}i_{para} + u_{Lb}i_{parb} + u_{Lc}i_{parc} \quad (10)$$

将式(10)代入式(9)可得:

$$p_{par} = u_{dc+}i_{dc1+} + u_{dc-}i_{dc1-} - \frac{L_{par}}{2} \frac{db_1}{dt} - \frac{C_{par}}{2} \frac{db_2}{dt} \quad (11)$$

直流电容电流可表示为

$$\begin{cases} i_{dc1+} = C_{dc+} \frac{du_{dc+}}{dt} \\ i_{dc1-} = C_{dc-} \frac{du_{dc-}}{dt} \end{cases} \quad (12)$$

令 $C_{dc+} = C_{dc-} = C_{dc}$,将式(12)代入式(11)可得:

$$p_{par} = \frac{C_{dc}}{2} \left(\frac{du_{dc+}^2}{dt} + \frac{du_{dc-}^2}{dt} \right) - \frac{L_{par}}{2} \frac{db_1}{dt} - \frac{C_{par}}{2} \frac{db_2}{dt} \quad (13)$$

由式(12)可得:

$$\begin{cases} u_{dc+} = \frac{1}{C_{dc}} \int_0^t i_{dc1+} dt + U_{dco+} \\ u_{dc-} = \frac{1}{C_{dc}} \int_0^t i_{dc1-} dt + U_{dco-} \end{cases} \quad (14)$$

式中: U_{dco+}, U_{dco-} 分别为电容 C_{dc+} 和 C_{dc-} 的初始电压。
由式(14)可得:

$$u_{dc+} - u_{dc-} = \frac{1}{C_{dc}} \int_0^t i_{LN} dt \quad (15)$$

由式(13)可得:

$$u_{dc+}^2 + u_{dc-}^2 = \frac{2}{C_{dc}} \int_0^t p_{par} dt + \frac{L_{par}b_1}{C_{dc}} + \frac{C_{par}b_2}{C_{dc}} + \frac{W_o}{C_{dc}} \quad (16)$$

式中: W_o 为存储在电容 C_{dc} 上的初始能量。

由式(15)和式(16)可得总的直流母线电压为

$$\begin{aligned} u_{dc} &= u_{dc+} + u_{dc-} \\ &= \sqrt{\frac{2}{C_{dc}} (W_o + 2 \int_0^t p_{par} dt + L_{par}b_1 + C_{par}b_2) - \frac{1}{C_{dc}^2} (\int_0^t i_{LN} dt)^2} \end{aligned} \quad (17)$$

由式(17)可知,直流母线电压 u_{dc} 将受并联变换器输出有功功率 p_{par} 、电感电流 i_{1abc} (即 b_1)、负荷电压 u_{Labc} (即 b_2) 及负荷侧不平衡电流 i_{LN} 的影响而产生波动。
由式(15)和式(17)可得正负直流母线电压为

$$\begin{cases} u_{dc+} = \frac{u_{dc}}{2} + \frac{1}{2C_{dc}} \int_0^t i_{LN} dt \\ u_{dc-} = \frac{u_{dc}}{2} - \frac{1}{2C_{dc}} \int_0^t i_{LN} dt \end{cases} \quad (18)$$

由式(18)可知,正负直流母线电压会受到电流 i_{LN} 的影响而产生波动。

式(17)和式(18)揭示了直流母线电压波动机理:由于并联变换器对不平衡负荷电流 i_{LN} 进行补偿,从而导致 i_{1abc} 和 p_{par} 出现波动,因此不平衡负荷是导致直流母线电压波动的主要原因。

2 变压器突发短路试验装置控制策略

2.1 串联变换器控制策略

串联变换器拓扑如图3所示,其中控制变量采样点如虚线所示。图3中, u_{2abc} 为串联变换器桥臂电压; u_{cnabc} 为变压器端电压; i_{serabc} 为变换器输出电流,控制着输入电流 i_{Sabc} 。因此,需要将 i_{serabc} 控制为纯净的正弦电流。 $i_{dc2\pm}$ 为正负直流母线电流, i_{so} 为串联变换器输出的不平衡零序电流。令 $L_{serabc} = L_{ser}$, 串联变换器状态空间平均模型如下:

$$\begin{cases} u_{2a} = L_{ser} \frac{di_{sera}}{dt} + R_{ser} i_{sera} + u_{cna} \\ u_{2b} = L_{ser} \frac{di_{serb}}{dt} + R_{ser} i_{serb} + u_{cnb} \\ u_{2c} = L_{ser} \frac{di_{serc}}{dt} + R_{ser} i_{serc} + u_{cnc} \end{cases} \quad (19)$$

式中: R_{ser} 为电感 L_{ser} 的等效内阻。

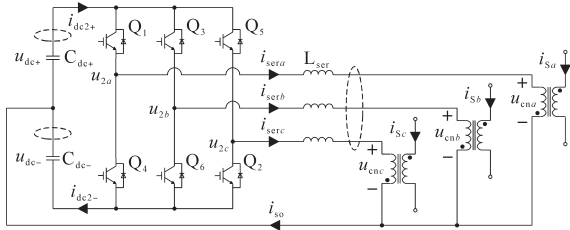


图3 串联变换器电路拓扑

Fig. 3 The circuit topology of the series converter

变压器二次侧电压 u_{cnabc} 与电网电压 u_{Sabc} 及负荷电压 u_{Labc} 的关系为

$$\begin{cases} u_{cna} = (u_{La} - u_{Sa})/n \\ u_{cnb} = (u_{Lb} - u_{Sb})/n \\ u_{cnc} = (u_{Lc} - u_{Sc})/n \end{cases} \quad (20)$$

其中

$$n = N_1 : N_2$$

式中: n 为变压器匝比。

式(20)中,变压器突发短路试验装置输出电压 u_{Labc} 在并联变换器的控制下保持稳定,因此变换器压差 u_{cnabc} 随电网电压 u_{Sabc} 的变化而变化。

为减小直流母线电压波动对输入电流的影响,本文提出GCCA用于计算输入电流基准,以改善输入电流的平衡度,具体如下。

电网电压 u_{Sabc} 、负荷电压 u_{Labc} 及负荷电流 i_{Labc} 经 dq 变换后得:

$$\begin{cases} u_{Sd} = \bar{u}_{Sd} + \tilde{u}_{Sd} \\ u_{Ld} = \bar{u}_{Ld} + \tilde{u}_{Ld} \\ i_{Ld} = \bar{i}_{Ld} + \tilde{i}_{Ld} \end{cases} \quad (21)$$

式中: \bar{u}_{Sd} , \bar{u}_{Ld} 和 \bar{i}_{Ld} 为直流量,代表基波分量; \tilde{u}_{Sd} ,

\tilde{u}_{Ld} 和 \tilde{i}_{Ld} 为交流分量,代表谐波分量。

一般情况下,电网电压含有一定量谐波并带有不平衡现象,经 dq 变换后电网电压含有波动量为 \tilde{u}_{Sd} ;若负荷为非线性负荷,那么负荷电压和电流经 dq 变换后一定含有交流分量 \tilde{u}_{Ld} 和 \tilde{i}_{Ld} 。电网电压和负荷电流的波动与畸变是不可控的,是由电网和负荷本身性质决定的,这就会造成整个试验装置的功率波动,造成网侧输入电流基准的计算产生误差,因此,本文采用LPF(low pass filter)将电压和电流中的交流分量滤除。

由于本装置采用三相四线制供电回路,需要考虑电网电压或负载电流含有最低次谐波为3次,根据文献[14]可设置LPF的截止频率为30 Hz。

式(21)经LPF后,得到 \bar{u}_{Sd} , \bar{u}_{Ld} 和 \bar{i}_{Ld} 分别代表电网电压基波幅值、负荷电压基波幅值和负荷电流基波幅值。

忽略损耗,输入基波有功功率与负荷基波有功功率相等,根据瞬时功率理论可得:

$$\bar{P}_{Sd} = \bar{P}_{Ld} \quad (22)$$

进一步有:

$$\bar{u}_{Sd} \bar{i}_{Sd} = \bar{u}_{Ld} \bar{i}_{Ld} \quad (23)$$

所提出的GCCA为

$$\bar{i}_{Sd} = \frac{\bar{u}_{Ld} \times \bar{i}_{Ld}}{\bar{u}_{Sd}} \quad (24)$$

由式(24)可知, \bar{i}_{Sd} 具有电网电压适应性,可以随电网电压的变化而调节输入电流的大小。

根据数学模型和GCCA,给出了串联变换器在 $A-B-C$ 交流坐标系下的控制策略,如图4所示。

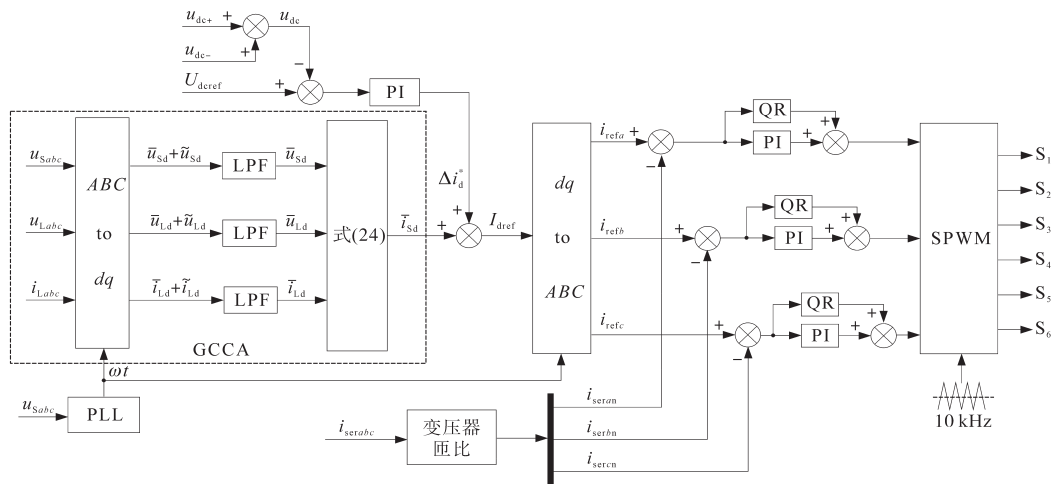


图4 $A-B-C$ 坐标系下串联变换器控制框图

Fig. 4 Control block diagram of series converter in $A-B-C$ coordinate system

为了提高直流母线电压的响应速度,以及减小母线电压的波动,将GCCA计算得到的 \bar{i}_{sd} (虚线框内)与直流母线电压 u_{dc} 经PI调节后得到的结果 Δi_d^* 相叠加,得到了三相输入基准电流幅值:

$$I_{dref} = \bar{i}_{sd} + \Delta i_d^* \quad (25)$$

由式(25)可知,直流母线电压的波动会对输入电流幅值基准造成影响。

作为对比,对式(25)进一步解释,若图4中无GCCA部分(即 $\bar{i}_{sd} = 0$),系统输入电流可以只通过直流母线电压外环来调节(即 $I_{dref} = \Delta i_d^*$),当系统带不平衡负荷时,负载侧不平衡电流会通过中线流入到正负直流母线中点(即 C_{dc+} 和 C_{dc-} 的中点),从而造成直流母线 u_{dc} 出现较大波动。而直流母线电压基准 U_{dref} 与 u_{dc} 的差值经PI控制器调节后使得 Δi_d^* 出现波动,即电网输入电流基准 I_{dref} 在负载有功电流幅值的基础上出现波动,这将导致电网输入电流出现畸变及不平衡现象。而加入GCCA后,电网输入电流的基准值由 \bar{i}_{sd} 和 Δi_d^* 共同承担,同时由式(24)可知, \bar{i}_{sd} (表现为无波动的负载有功电流幅值)承担了基准电流的绝大部分,意味着电流基准的波动更小,从而减小了母线电压波动对输入电流的影响。另外,需要说明的是,加入GCCA后直流母线电压环主要用于补偿供电装置内部损耗。

电网输入电流基准幅值经过反dq变换器后,得到三相输入基准电流分别为

$$\begin{cases} i_{refa} = I_{dref} \sin(\omega t) \\ i_{refb} = I_{dref} \sin(\omega t - 2\pi/3) \\ i_{refc} = I_{dref} \sin(\omega t + 2\pi/3) \end{cases} \quad (26)$$

其中, ωt 根据电网电压锁相获得。

在串联变换器的控制下,可以实现输入中线电流 i_{sn} 为零。同时,为了弥补PI调节器在交流坐标系下存在静差的问题,在电流环中加入了QR调节器。关于PI和QR调节器的设计方法,本文不在此详细描述,具体可见文献[15-16]。

2.2 并联变换器控制策略

并联变换器电路拓扑和数学模型如图2、式(1)和式(2)所示。其在A-B-C交流坐标系下的控制策略如图5所示,其中, K_{pwm} 为变换器的增益。

电压参考值为

$$\begin{cases} u_{refa} = U_{dref} \sin(\omega t) \\ u_{refb} = U_{dref} \sin(\omega t - 2\pi/3) \\ u_{refc} = U_{dref} \sin(\omega t + 2\pi/3) \end{cases} \quad (27)$$

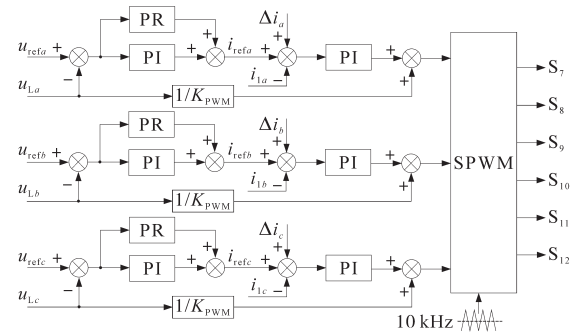


图5 A-B-C坐标系下并联变换器控制框图

Fig. 5 Control block diagram of parallel converter in A-B-C coordinate system

电流 Δi_{abc} 对控制环路来说是一个扰动量,本文采用电流前馈来消除扰动的影响。根据试验装置采样点的位置,电流扰动量 Δi_{abc} 是由负荷电流和串联变换器输出电流得到的:

$$\begin{cases} \Delta i_a = i_{La} - ni_{sera} \\ \Delta i_b = i_{Lb} - ni_{serb} \\ \Delta i_c = i_{Lc} - ni_{serc} \end{cases} \quad (28)$$

在并联变换器的控制下,三相负荷电压保持220 V稳定不变,同时补偿不平衡负荷所需的不平衡电流。

3 被测变压器极端工况举例分析

变压器突发短路试验装置可以对因三相不平衡负荷引起的不平衡负荷电流进行补偿,使输入电流保持平衡状态。以单相变压器突发短路试验时,最为严重的不平衡情况单相负荷为例,假设系统只带A相负荷。

为了更好地说明A相带载时系统对不平衡负荷电流的补偿,图6给出了系统工作原理图和相量示意图。在串联变换器的控制下,A相负荷有功基波电流在输入平均分配给每一相,使输入电流为三相对称电流,从输入看整个系统带三相对称负荷。

输入电流 i_{Subc} 为

$$\begin{cases} i_{sa} = I_{Lam} \sin(\omega t)/3 \\ i_{sb} = I_{Lam} \sin(\omega t - 2\pi/3)/3 \\ i_{sc} = I_{Lam} \sin(\omega t + 2\pi/3)/3 \end{cases} \quad (29)$$

式中: I_{Lam} 为A相负荷基波有功电流幅值。

在串联变换器的控制下,三相输入电流均为1/3的A相负荷电流,相位互差120°;在并联变换器的控制下,输入的B相和C相电流被并联变换器的B相和C相吸收,同时通过并联变换器A相向负荷补足2/3的负荷电流,A相负荷电流由输入和并联变换器共同提供。

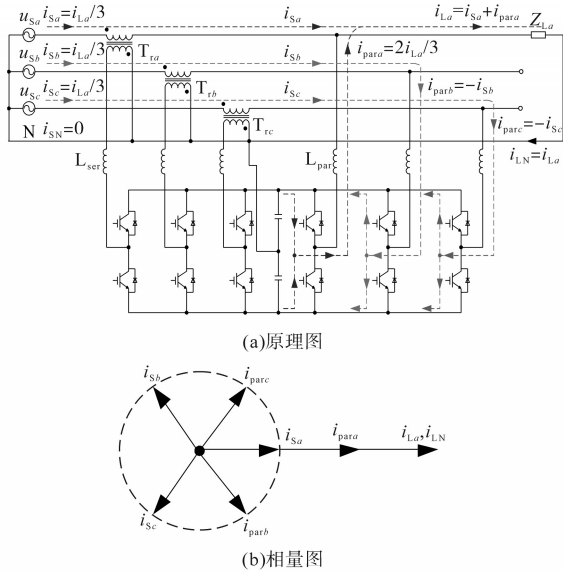


图6 单相负荷时系统工作原理图及相量图
Fig.6 System operation principle and diagrams with a single-phase load

并联变换器输出电流为

$$\begin{cases} i_{para} = 2i_{La}/3 \\ i_{parb} = -i_{Sb} \\ i_{parc} = -i_{Sc} \end{cases} \quad (30)$$

负荷电流为

$$\begin{cases} i_{La} = i_{Sa} + i_{para} \\ i_{Lb} = 0 \\ i_{Lc} = 0 \end{cases} \quad (31)$$

输入和负荷侧中线电流为

$$\begin{cases} i_{SN} = 0 \\ i_{LN} = i_{La} \end{cases} \quad (32)$$

当变压器突发短路试验装置带不平衡负荷时,可得以下结论:1)各相输入电流为负荷基波电流总和的1/3,实现了三相输入电流的平衡控制;2)输入中线电流为零,负荷侧中线电流为不平衡负荷电流;3)并联变换器吸收并转化输入电流,以保证负荷的不平衡特性。

4 实验分析

为验证理论分析的正确性,在220 V系统条件下搭建了小容量的试验平台。本文使用双DSP控制芯片TMS320F28335实现对试验装置的控制,实验参数如下:电网电压有效值为220 V/50 Hz;负荷电压有效值为220 V/50 Hz;两个变换器的开关频率为10 kHz;正负直流母线电压等级为±400 V;变压器突发短路试验装置带A相负荷10 kW。

图7a、图7b分别为变压器突发短路、试验装置只有A相带额定负荷、不平衡负荷度为100%时,电

网电压 u_{Sabc} 、负荷电压 u_{Labc} 实验结果图。此时 u_{Labc} 能够保持良好的平衡度,不受不平衡负荷的影响。

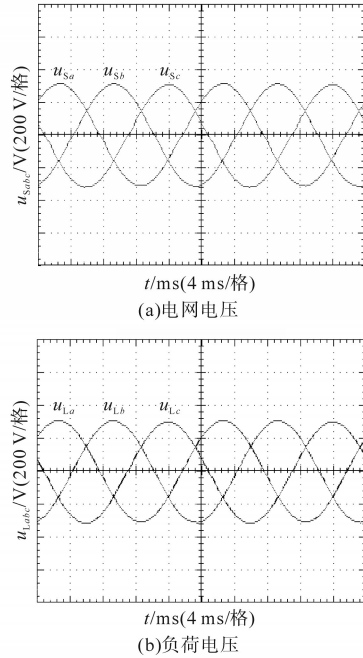


图7 100%不平衡负荷时电网电压和负荷电压
Fig.7 Grid and load voltages with 100% unbalanced load

图8a、图8b分别为当系统带单相负荷时(即100%不平衡负荷),电网输入电流 i_{Sabc} 、负荷电流 i_{Labc} 实验结果图。电网输入电流 i_{Sabc} 在本文所提出的控制方法下依然保持平衡状态,其有效值分别为15.9 A,16.3 A和16.6 A,其大小满足A相负荷电流 i_{La} 的1/3, i_{La} 的有效值为45 A。

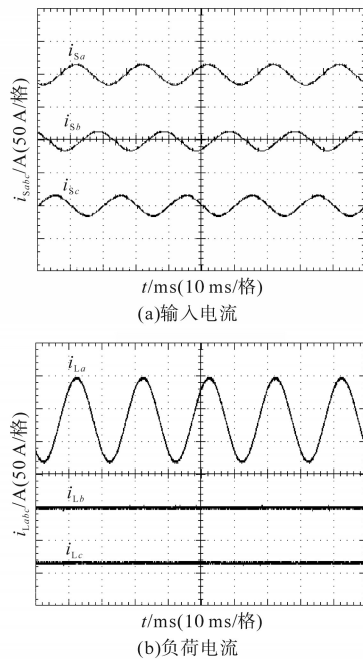


图8 100%不平衡负荷时电网输入电流和负荷电流
Fig.8 Grid and load currents with 100% unbalanced load

图9、图10分别为并联变换器输出电流 i_{parabc} 、输入中线电流 i_{SN} 和负荷侧中线电流 i_{LN} 实验结果图。图9中,并联变换器A相输出的电流 i_{paraA} 与图8a中的A相输入电流 i_{SA} 同相,说明并联变换器A相提供2/3的负荷电流;而并联变换器B相,C相电流方向与图8a中输入B相,C相电流反相,说明并联变换器B相和C相吸收1/3负荷电流。图10中,负荷侧中线电流 i_{LN} 为负荷A相电流 i_{LA} ,有效值为45 A,而在串并联变换器的控制下,输入中线电流 i_{SN} 却很小,有效值为4.75 A。

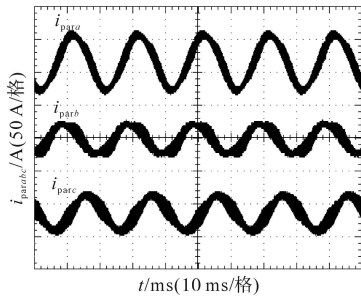


图9 并联变换器输出电流

Fig.9 Output current of parallel converter

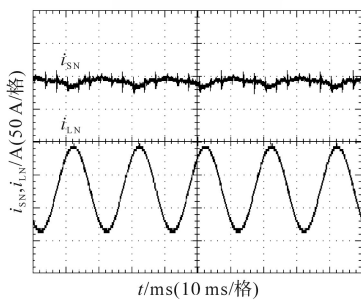


图10 输入与负荷侧中线电流

Fig.10 Neutral current of grid and load side

图11为正负直流母线电压 $u_{\text{dc}\pm}$ 实验波形。

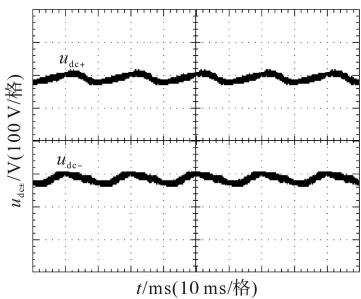


图11 正负直流母线电压

Fig.11 Positive and negative DC bus voltage

图11中, $u_{\text{dc}\pm}$ 产生了一定的波动,这是由于在串并联变换器的控制下输入中线电流很小,而负荷侧中线电流会通过正负母线连接的中线流入

正负母线之间,较大的不平衡负荷电流引起母线电压的波动,但只要该波动在允许的范围内是可以接受的。从图11还看出,正负两组直流母线的波动频率均为50 Hz,与负荷电流频率一致,总体直流母线电压的波动频率为2倍频基波频率。

以上实验验证了100%不平衡负荷时三相输入电流的平衡控制效果,网侧输入中线电流在较小范围内波动,从而证明了所给控制策略的可行性和正确性。

5 结论

针对不平衡负荷导致的输入电流不平衡问题,本文建立了变压器突发短路试验装置的数学建模,详细分析了因不平衡负荷所引起的直流母线电压波动机理,给出了基于GCCA的控制策略,可实现100%不平衡负荷工况下的输入电流的平衡控制,从而使得输入中线电流在很小的范围内波动,大大减小了中性点偏移给系统带来的危害。

在理论分析及实验的基础上,得出了变压器突发短路试验装置带不平衡负荷的3个结论:

- 1) 各相输入电流为负荷基波电流总和的1/3,实现了三相输入电流的平衡控制;
- 2) 输入中线电流为零,负荷侧中线电流为不平衡负荷电流;
- 3) 并联变换器吸收并转化输入电流,以保证负荷的不平衡特性。

以上结论具有一定的指导意义和应用价值,同时实验结果验证了理论分析的正确性以及所提出控制策略的可行性和有效性。

参考文献

- [1] 殷少奇,白树忠. 一种基于空间矢量的恒频滞环UPQC控制策略[J]. 电气传动,2014,44(5):67-71.
- [2] Rodrigo A M, Sergio A O S, Azauri A O, et al. A versatile unified power quality conditioner applied to three-phase four-wire distribution systems using a dual control strategy[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2016, 31(8):5503-5514.
- [3] Saurav R C, Anubrata D, Sandeep A, et al. Adaptive shunt filtering control of UPQC for increased nonlinear loads [J]. IET Power Electronics, 2018, 12(2):330-336.
- [4] 吴佐民,全恒立,陈杰,等. 三相四线制并联型有源电力滤波器研究[J]. 电气传动,2011,41(5):31-35.
- [5] 陈杰,赵冰,陈新,等. 不平衡负荷条件下三相四线制并联逆变器的下垂控制[J]. 电工技术学报,2018,33(20):4790-

(下转第61页)

4 测试结果

变频器板卡测试完成后,会自动生成测试报告,测试报告中Name列为测试项名称,Target Min和Target Max为规定的阈值范围,Actual为测试的实际值。如果实际值在设定的阈值范围内(在Target Min和Target Max之间),则测试结果为Passed(测试通过),否则为Failed(测试不通过)。整个测试中若有测试不通过项,会弹出图5所示故障对话框。本测试报告为txt文件格式,具有占用空间小、文件打开速度快等特点,但每行的内容长度不同,可读性较差,此文件可以通过右键以Excel表格的形式打开,增加可读性,如图9所示为变频器控制板测试报告中第三步(模拟量输入测试)的一部分。

STP	StartTitle	Analog Test					
TAB	HEAD	Name	Min[V]	Max[V]	Actual[V]	Pass/Fail	
TAB	DATA	FPGA_ID	4567	4567	4567	Passed	
TAB	HEAD	Name	Min[V]	Max[V]	Actual[V]	Pass/Fail	
TAB	DATA	IRN/T1	4.5	5.5	4.968	Passed	
TAB	HEAD	Name	Min[V]	Max[V]	Actual[V]	Pass/Fail	
TAB	DATA	IRN/T2	1.5	2.5	1.982	Passed	
TAB	HEAD	Name	Min[V]	Max[V]	Actual[V]	Pass/Fail	
TAB	DATA	IRN/T3	-0.5	0.5	-0.009	Passed	
TAB	HEAD	Name	Min[V]	Max[V]	Actual[V]	Pass/Fail	
TAB	DATA	IRN/T4	-2.5	-1.5	-2.019	Passed	
TAB	HEAD	Name	Min[V]	Max[V]	Actual[V]	Pass/Fail	
TAB	DATA	IRN/T5	-5.5	-4.5	-4.997	Passed	
TAB	HEAD	Name	Min[V]	Max[V]	Actual[V]	Pass/Fail	
TAB	DATA	UZKN/T6	4.5	5.5	4.965	Passed	
TAB	HEAD	Name	Min[V]	Max[V]	Actual[V]	Pass/Fail	
TAB	DATA	UZKN/T7	1.5	2.5	1.969	Passed	
TAB	HEAD	Name	Min[V]	Max[V]	Actual[V]	Pass/Fail	
TAB	DATA	UZKN/T8	-0.5	0.5	-0.028	Passed	

图9 测试报告(局部)

Fig.9 Test report (local)

(上接第37页)

4801.

[6] 张晓,孙传达,刘娟,等.三相四线制有源电力滤波器开路故障诊断[J]. 电网技术,2016,40(2):571-528.

[7] Kesler Metin, Ozdemir Engin. A novel control method for unified power quality conditioner (UPQC) under non-ideal mains voltage and unbalanced load conditions[C]/IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition, California, USA, 2010:374-379.

[8] 毛彦辉,夏明超,李晓亮,等.负荷不平衡下D-STATCOM控制策略的仿真研究[J]. 电力系统保护与控制,2013,41(24):132-139.

[9] 胡应宏,王建曠,任佳佳,等.不平衡负荷的平衡分量分解及补偿方法[J]. 中国电机工程学报,2012,32(34):98-104.

[10] 卓放,陈波,饶云堂,等.改进型TTA在三相四线制SVG中的应用[J]. 电力系统自动化,2007,31(13):72-76.

5 结论

本文较详细地介绍了针对变频器控制板自动测试在硬件、软件方面及整体的设计流程。

本文设计的测试系统在变频器控制板的自动测试中操作方便,跟手动测试相比可使测试时间缩短5倍以上,对变频器控制板的整个自动测试时间约5 min,基本不受人因素为影响,测试结果均是仪器的客观判定,对测试人员专业水平要求不高。

目前此测试系统已正式应用在实际生产测试中,并顺利完成多批次变频器控制板的测试工作。

参考文献

[1] 于洪泽,贺永鹏,袁绍民,等.基于LabVIEW与TestStand的通用板卡自动测试系统[J]. 电气传动,2015,45(9):66-69.

[2] 胡典钢. TestStand工业自动化测试管理[M]. 北京:电子工业出版社,2016.

[3] 吴伟,张宏军,刘康,等.基于TestStand的自动测试系统设计[J]. 计算机测量与控制,2014,22(7):2321-2323.

[4] 甘广辉,王思华,黄文基,等.基于TestStand的医疗仪器产品性能自动测试系统研制[J]. 计算机测量与控制,2015,23(12):3962-3965.

收稿日期:2019-09-25

修改稿日期:2020-01-06

[11] 郑楚韬,陈永杰.三相四线制系统零线断线检测及保护研究[J]. 电气技术,2008,8:83-85.

[12] 徐刚,吴宝祥,钱巍斌,等.三相不平衡对电网的影响及解决方法[J]. 西安工程大学学报,2018,32(3):316-323.

[13] 刘凤君.具有不对称电流补偿功能的三相串并联补偿式UPS[J]. 电源技术应用,2005,8(9):1-10.

[14] 高锋阳,黄聪月,翟建国.低通滤波器观测定子磁链对DTC性能改善研究[J]. 电气传动自动化,2010,32(2):9-12.

[15] Shuai Zhikang, Luo An, John Shen, et al. Double closed-loop control method for injection-type hybrid active power filter[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2011, 26(9): 2939-2403.

[16] 梅继超,廖冬初,蔡华锋.光伏并网逆变器电流控制策略的研究[J]. 电气传动,2017,47(10):48-53
收稿日期:2019-10-19
修改稿日期:2019-12-16