

DOI: 10.13234/j.issn.2095-2805.2025.2.152

中图分类号: TM28

文献标志码: A

用于智能电网含电力电子变换器的混合型 变压器设计

万家伟^{1,2}, 陈汉超^{1,2}, 廖承^{1,2}, 曹毅³

(1. 国网电力科学研究院, 南京 211106; 2. 国网电力科学研究院武汉南瑞有限责任公司, 武汉 430074; 3. 国网上海市电力公司, 上海 210000)

摘要: 针对现有变压器无法应对高渗透率可再生能源出力强波动性引起的电压骤降/骤升等问题, 提出 1 种基于三桥臂功率变换器的新型混合配电变压器 HDT(hybrid distribution transformer)。该方法通过在现有配电变压器的一次侧增加 1 个串联三桥臂功率变换器来实现。所提新型混合配电变压器具有可降低功率变换器额定功率和增加 1 个额外电流回路以提升变压器自由度的优点。此外, 为进一步提升变压器的电能质量, 所提方法综合了电压矢量, 可补偿电压骤降/骤升和电网电压谐波对变压器的不利影响, 提高了电网的功率因数, 提升了配电网的输电效率。最后, 讨论了所提混合配电变压器的配置和控制策略等, 并通过仿真实验分析, 验证了所提方法的有效性和优越性。

关键词: 配电网; 混合变压器; 功率因数; 智能电网; 电压骤降

Hybrid Transformer Design with Power Electronic Converter for Smart Grid

WAN Jiawei^{1,2}, CHEN Hanchao^{1,2}, LIAO Cheng^{1,2}, CAO Yi³

(1. State Grid Electric Power Research Institute, Nanjing 211106, China; 2. Wuhan NARI Limited Liability Company, State Grid Electric Power Research Institute, Wuhan 430074, China; 3. State Grid Shanghai Municipal Electric Power Company, Shanghai 210000, China)

Abstract: Aimed at the problems such as voltage sag/surge resulting from strong fluctuations of high-permeability renewable energy, which cannot be dealt with by using the existing transformers, a novel hybrid distribution transformer (HDT) based on a three-bridge arm power converter is proposed. This method is realized by adding a series three-bridge arm power converter to the primary side of the existing distribution transformer. The proposed novel HDT has two advantages, i.e., it can reduce the rated power of the power converter, and it can improve the transformer's degree of freedom by adding an additional current loop. In addition, to further improve the power quality of the transformer, the proposed method integrates the voltage vector, which can compensate the adverse effects of voltage sag/surge and grid voltage harmonics on the transformer. Therefore, it improves the power factor of power grid, as well as the transmission efficiency of the distribution network. Finally, the configuration and control strategy for the proposed HDT are discussed, and the effectiveness and superiority of the proposed method are verified by simulation analysis.

Keywords: Distribution network; hybrid transformer; power factor; smart grid; voltage sag

随着工业和经济的发展, 电力需求不断增加,

发电厂产生的电能一般通过配电网输送给终端用户^[1]。配电变压器是配电网中的重要设备, 负责将电压从中压 MV(medium voltage)降至低压 LV(low voltage)。现有的配电变压器相对成本低、效率高且可靠性高, 然而, 现有变压器无法应对高渗透率可再生能源出力强波动性引起的电压骤降/骤升^[2]。

收稿日期: 2022-04-15; 修回日期: 2022-07-22; 录用日期:

2022-08-15; 网络首发日期: 2022-11-22

基金项目: 国网上海市电力公司科技项目(SGJ001819)

This work is supported by Science and Technology Project of State Grid Shanghai Municipal Electric Power Company under the grant SGJ001819

常用的配电变压器为调压配电变压器 VRDT(voltage regulation distribution transformer)^[3], 其中带自动有载分接开关的配电变压器 OLTC (on-load tap changer) 使用最多, 该类变压器有多个抽头, 如-10%, -5%, 0%, 5%, 10%标么值, 可以低成本补偿电压骤降和骤升, 但它存在动态特性差、电压阶跃补偿等缺点。

为了解决这些问题, 国内外学者已提出采用电力电子 PE(power electronics)技术的解决方案, 包括动态凹陷校正器 DYSC(dynamic sag corrector)^[4-6]、穿越电压补偿器^[7-9]、动态电压恢复器 DVR(dynamic voltage restorer)^[10-13]和混合配电变压器 HDT(hybrid distribution transformer)^[14-17]。其中, DYSC 和穿越电压补偿器是配电网中的串并联 PEs, 采用脉宽调制 PWM(pulse width modulation)的变换器可有效改善配电网的电能质量。低电压动态特性可补偿低电压跌落, 然而文献[4-6]提出的方法有一定局限性, 即它们无法补偿电压骤升。为了补偿电压骤降和骤升, 文献[7-9]提出了将电压注入负载电压的 DVR, 它们能以良好的动态特性补偿电压骤降和骤升, 其中一些方法无需直流端口电容, 即可直接转换功率^[10-13], 但它们需要 1 个额外且笨重的低频 LF(low frequency)变压器或电容器组, 这会提高设备成本; 另一种方法为 HDTs^[14-17], 由于混合配电变压器 HDT 由低频变压器 LFT(low-frequency transformer)和功率变换器构成, 与其他 PE 解决方案相比, HDT 具有较好的可靠性、高效性和经济性, 此外 HDT 还具备三相电压和电流平衡、有源滤波和浪涌电流缓解的能力, 然而, 由于需要在变压器铁心上缠绕额外绕组, 需要更换现有配电变压器, 从而产生额外成本。

基于此, 本文提出 1 种基于传统配电变压器和串联功率变换器的新型 HDT。该方法仅需要在变压器的电网侧添加 1 个三桥臂功率变换器。其中, 三桥臂功率变换器的输出端一端连接到 OLTC 的变压器 s 抽头, 另一端连接到电网电源。其不需要额外的变压器或电容器组, 该结构使得变换器的额定功率显著降低。本文还增加了 1 个额外的电流回路, 使 HDT 具有一定的自由度。本文的主要创新

点为: ①该方法利用现有配电变压器, 且功率变换器的额定功率较低, 这是因为大部分功率由变压器输送, 功率变换器只补偿部分功率; ②由于所提方法在正常电压条件或故障情况下可保障 HDT 与现有电网一样运行, 提升了电网的稳定性, 此外, 电网的电压骤降和骤升可通过功率变换器快速动态响应进行补偿; ③该方法可提高电网的功率因数, 从而提高电能传输效率, 且电网谐波得到了补偿。

1 所提 HDT 系统的设计

图 1 为所提 HDT 系统的结构, 由现有配电变压器、PEs、接口和输出滤波器以及旁路电路组成。由于滤波器串联连接, 因此在功率传输期间降低滤波器的压降是有利的。图中的 PEs 由 1 个全桥变换器和 1 个半桥逆变器组成, 它们共享直流端口电容。变流器输出通过接口滤波器连接至变压器 2 个抽头。2 个抽头之间的电压决定了直流端口电容器和半导体器件的额定电压。逆变器输出通过输出滤波器连接到电网电源。当 PEs 启用时, 旁路电路停用。

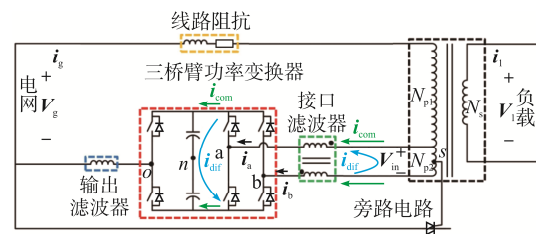


图 1 所提混合配电变压器的结构

Fig. 1 Configuration of proposed hybrid distribution transformer

图 1 中, i_g 为电网电流, 它是变流器输出电流 i_a 和 i_b 的和, 即 $i_g = i_a + i_b$ 。变换器的每个输出电流 (i_a 或 i_b) 可分为 2 个分量: 一个是共模电流 i_{com} , 它从电网电源流向负载输送功率; 另一个是差模电流 i_{dif} , 它是流经直流端口电容器的电流。因此, 变流器输出电流、共模电流和差模电流可建模为

$$\begin{cases} i_a = i_{com} + i_{dif} \\ i_b = i_{com} - i_{dif} \end{cases} \quad (1)$$

式中: $i_{com} = 0.5(i_a + i_b) = 0.5i_g$; $i_{dif} = 0.5(i_a - i_b)$ 。功率变换器连接到低频变压器 LFT 后, 将一次绕组分为匝

数比 N_{p2} 和 N_{p1} ；二次绕组的匝数比为 N_s 。标称抽头(节点 s)位于 2 个抽头的中心，因此，一次绕组的标称匝数比 N_p 可表示为

$$N_p = N_{p1} + 0.5N_{p2} \quad (2)$$

不同匝数比与不同电流之间的关系可表示为

$$N_p i_g - N_{p2} i_{dif} - N_s i_1 = 0 \quad (3)$$

式中， i_1 为负载电流。在相同的负载电压 V_1 和负载条件下，负载电流 i_1 是恒定的，因此电网电流增量 Δi_g 和差模电流增量 Δi_{dif} 之间的关系可表示为

$$N_p \Delta i_g = N_{p2} \Delta i_{dif} \quad (4)$$

由式(4)可知，可通过调节差模电流来提高电网的功率因数。本文将接口滤波器用作差模电流的负载，且使用耦合电感结构。通过这种设计，可将其压降降至最低，并保持负载的大小。与逆变器输出相连的输出滤波器需要满足配电电压谐波标准，且可设计为合适的滤波器结构。

2 所提系统的控制策略

2.1 电压骤降和骤升的影响建模

所提系统中现有配电变压器可提供电流隔离，并将电压水平从中压降至低压，PEs 积极补偿电压骤降/骤升，提高电网功率因数，此外，还可以补偿电网电压谐波。图 2 为电压骤升和骤降情况下所提系统的相量。图中： V_g 为电网电压矢量； V_c 为补偿电压矢量； i_g 为电网电流矢量。图中“ $'$ ”表示对应变量的补偿量，虚线表示标称电网电压幅值 V_g^* 和补偿电压矢量的范围，即直流端口电压的 1/2。本文将差模电流用基于电网电压矢量的 $d-q$ 分量表示，并通过在与电网电压相同的相位注入补偿电压来补偿电压骤降/骤升。此外，还可通过调节差模电流以提高功率因数。如图 2(a)所示的电压骤降条件下($V_g < V_g^*$)，逆变器合成正补偿电压，使 $V_g' = V_g^*$ ，变换器调节差模电流以减小电网角度(即 $\theta_g > \theta_g'$)。如果电压升高($V_g > V_g^*$)，如图 2(b)所示，逆变器合成负补偿电压以维持电网电压，变流器补偿无功功率以提高功率因数。

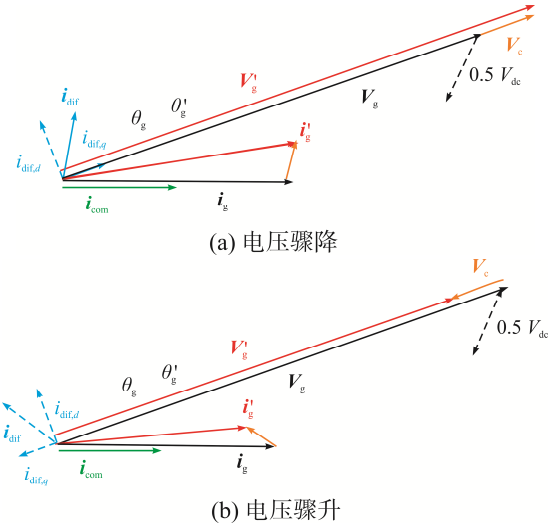


图 2 电压骤降和骤升情况下所提系统的相量
Fig. 2 Phasors of proposed system in the cases of voltage sag and voltage surge

2.2 控制策略

所提 HDT 系统的控制目标是利用逆变器合成补偿电压矢量，以补偿电压骤降/骤升和谐波，利用变换器调节差模电流，以调节直流端口电压，并补偿电网功率因数校正器 PFC(power factor correction) 的无功功率。然而，由于所提系统使用现有变压器和 PEs，其额定功率决定其性能。图 3 为全桥变换器和二阶广义积分器锁相环 SOGI PLL(second-order generalized integrator phase-locked loop)的控制框图。可知，全桥变换器调节直流端口电压控制和 PFC 的差分模式电流。差分模式电流矢量可分为 2 个分量，即电网电压矢量的 q 轴分量 $i_{dif,q}$ 和 d 轴分量 $i_{dif,d}$ 。直流端口电压根据存储能量 E_{dc} 变化，这意味着可以通过调节净功率来控制直流端口电压，以控制 $i_{dif,q}$ 来实现。SOGI 锁相环用于估计电网电压矢量、电网电流矢量和电网电压谐波。输入电压和电网电流矢量为 SOGI PLL 的输入量。

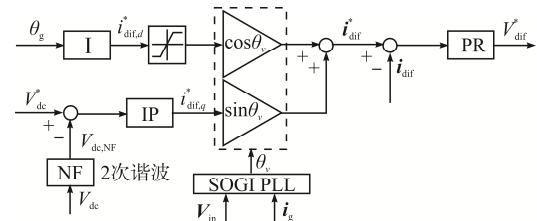


图 3 全桥变换器和 SOGI 锁相环控制框图
Fig. 3 Control block diagram of full-bridge converter and SOGI PLL

电网电压幅值为

$$v_g = \frac{N_p}{N_{p2}} V_{in} \quad (5)$$

式中, V_{in} 为输入电压。

电网相角为

$$\theta_g = \theta_v - \theta_i \quad (6)$$

式中, θ_v 和 θ_i 分别为电网电压相角和电网电流相角。

积分比例 IP(integral-proportional) 控制器可用于防止超调现象, 则电网电压矢量的 q 轴分量参考值 $i_{dif,q}^*$ 和直流电压 V_{dc} 的数学关系为

$$i_{dif,q}^* = -k_{p,dc} V_{dc} + \frac{k_{i,dc}}{s} (V_{dc}^* - V_{dc}) \quad (7)$$

式中: $k_{p,dc}$ 和 $k_{i,dc}$ 分别为比例增益和积分增益; V_{dc}^* 为直流电压参考值。

直流端口电容器中的储能为

$$E_{dc} = C_{dc} V_{dc}^2 / 2 \quad (8)$$

式中, C_{dc} 为直流端电容。

其能量变化量为

$$\frac{C_{dc}}{2} \frac{dV_{dc}^2}{dt} = \frac{V_{in}}{2} \left[-k_{p,dc} V_{dc} + \frac{k_{i,dc}}{s} (V_{dc}^* - V_{dc}) \right] \quad (9)$$

直流端口电压的平方可近似为

$$V_{dc}^2 \approx V_{dc,0}^2 + 2V_{dc,0} (V_{dc} - V_{dc,0}) \quad (10)$$

式中, $V_{dc,0}$ 为直流标准电压。

其传递函数可表示为

$$\frac{V_{dc}(s)}{V_{dc}^*(s)} = \frac{V_{in} k_{i,dc}}{2C_{dc} V_{dc,0}} \left/ \left(s^2 + \frac{V_{in} k_{p,dc}}{2C_{dc} V_{dc,0}} s + \frac{V_{in} k_{i,dc}}{2C_{dc} V_{dc,0}} \right) \right. = \frac{\omega_{n,dc}^2}{s^2 + 2\xi_{dc} \omega_{n,dc} s + \omega_{n,dc}^2} \quad (11)$$

式中, $\omega_{n,dc}$ 为角频率; ξ_{dc} 为直流侧效率; $k_{p,dc}$ 和 $k_{i,dc}$ 可分别表示为

$$\begin{cases} k_{p,dc} = 4\xi_{dc} \omega_{n,dc} C_{dc} V_{dc}^* / V_{in} \\ k_{i,dc} = \omega_{n,dc}^2 C_{dc} V_{dc}^* / V_{in} \end{cases} \quad (12)$$

若使用积分控制器 I, 调节器的传递函数可表示为

$$\frac{i_{dif,q}^*(s)}{\theta_g(s)} = \frac{k_{i,PFC}}{s} \quad (13)$$

式中, $k_{i,PFC}$ 为控制参数增益。

差模电流调节器设计为比例谐振 PR(proportional-resonant) 控制器, 用于跟踪交流参考电压, 其传递函数为

$$C_{dif}(s) = k_{p,dif} + \frac{2k_{r,dif}s}{s^2 + 2\omega_c s + \omega_0^2} \quad (14)$$

式中: $k_{p,dif}$ 和 $k_{r,dif}$ 为 PR 控制器的增益; ω_c 为差模电流控制器的带宽; ω_0 为 PR 控制器的工作频率。如果使用正弦 PWM 即 SPWM(sinusoidal pulse width modulation) 来保持直流端口(n)中性点的电势等于变压器标称抽头的电势, 则输出电压参考 V_{an}^* 和 V_{bn}^* 分别为

$$\begin{cases} V_{an}^* = 0.5V_{dif}^* \\ V_{bn}^* = -0.5V_{dif}^* \end{cases} \quad (15)$$

式中, V_{dif}^* 为差模参考电压。

本文将差模电感视为差模电流的负载, 功率因数校正的开环传递函数为

$$G_{PFC}(s) = \left(\frac{k_{i,PFC}}{s} \right) \left(k_{p,dif} + \frac{2k_{r,dif}s}{s^2 + 2\omega_c s + \omega_0^2} \right) \left(\frac{1}{L_{dif}s} \right) \quad (16)$$

式中, L_{dif} 为差模电感。

图 4 为半桥逆变器的控制框图。半桥逆变器合成与电网电压矢量具有相同轴向的注入电压矢量, 以补偿电压骤降或骤升。

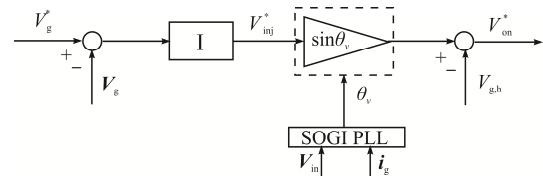


图 4 半桥式逆变器控制框图

Fig. 4 Control block diagram of half-bridge inverter

本文采用 SOGI PLL 估计的电网电压幅值作为反馈, 并将调节器设计为积分控制器 I, 以消除其稳态误差。根据其输出 V_{inj}^* 和电网电压相位角, 通过 SPWM 产生逆变器参考电压 V_{on}^* 。如果合成不包括电网电压谐波 $V_{g,h}$ 的电压, 则可以补偿电网电压谐波, 即

$$V_{on}^* = V_{inj}^* \sin \theta_v - V_{g,h} \quad (17)$$

在每个谐波频率下运行的 SOGI PLL 可用于检

测电压谐波。电网电压谐波可计算为

$$V_{g,h} = V_{g,5h} + V_{g,7h} + \dots \quad (18)$$

式中, $V_{g,5h}$ 和 $V_{g,7h}$ 分别为第 5 次和第 7 次谐波分量。

2.3 补偿范围

由于所提系统是基于现有变压器和变流器组成, 其额定功率决定了系统的补偿范围。本节研究 100 kVA 所提系统的补偿范围, 其标称参数^[18]见表 1。假设电网电压和负载电压分别为 13.2 kV 和 220 V, 一次绕组的匝数比为 9:2, 这意味着变换器连接到变压器的 10%抽头。假设负载阻抗为 $0.4+j0.2 \Omega$ 。考虑到电网功率因数为 0.9, 所需的控制范围为 10%, 直流端口电压为 4 kV。如使用 $\pm 10\%$ 抽头, 输入电压为电网电压的 20%, 其中标称电流为 7.6 A, 直流端口参考电压为 4 kV。因此, 可使用 IGBT(3.3 kV/50 kHz)为三电平逆变器拓扑配置 PEs^[19]。同样, 如果考虑到预期补偿范围为 $\pm 5\%$, 使用 5%抽头, 直流端口电压为 2 kV, 输入电压降低至 10%。因此, IGBT(3.3 kV/50 kHz)可用于两电平逆变器。此外, IGBT(1.7 kV/50 kHz)或 SiC MOSFET(1.7 kV/50 kHz)可用于三电平拓扑。使用多电平逆变器时, 每个开关的额定电压都会降低。

表 1 100 kVA 所提系统的标称参数^[18]

Tab. 1 Nominal parameters of proposed 100 kVA system^[18]

参数	数值
系统额定功率/kVA	100
电网电压/kV	13.2
负载电压/V	220
一次绕组匝数比	9:2
直流端口参考电压/kV	4
接口滤波器阻抗/ Ω	$0.2+j3.4$
负载阻抗/ Ω	$0.4+j0.2$

变换器调节直流端口电压控制的差模电流, 然而, 由于变压器的热额定值存在电流限制, 使得变换器具有有限的可补偿视在功率范围 S_{comp} , 即

$$S_{comp} = V_{in,rated} i_{g,rated} \quad (19)$$

式中, $V_{in,rated}$ 和 $i_{g,rated}$ 分别为输入电压和电网电流的额定值。变换器的额定功率仅为变压器的 0.2 p.u.。由于逆变器根据变换器输出的功率合成注入电压, 因此, 逆变器的补偿功率应小于该范围。此外, 由

于逆变器采用 SPWM, 注入电压基准小于直流端口电压的 1/2。因此, 注入参考电压范围可表示为

$$V_{inj}^* \leq \min(S_{comp}/i_g, 0.5V_{dc}) \quad (20)$$

如果变换器的输出功率小于变换器的视在功率范围, 剩余功率将用于 PFC。由于变压器的热额定值, 补偿范围随着负载的增加而减小。因此, 在相同的注入电压条件下, 可补偿无功功率随着负载的增加而降低^[20]。

2.4 激活/停用顺序

当电网出现过载等问题时, 应停用所提系统以保护 PEs。同时, 配电网应供电以避免停电。此外, 一旦问题得到解决, 所提系统应该被激活。由于其结构简单, 所提系统很容易激活/停用。激活顺序: 首先, 旁路电路激活, 断路器 CB(circuit breaker)断开 PEs, 包括变换器和逆变器, 在此阶段, 变换器作为整流器工作, 直流端口电容器根据输入电压水平充电; 然后, 在软启动过程后, 变换器开始其导通和直流端口电压控制, 以提升直流端口电压到其参考值; 接着, 逆变器开始导通并连接到电网; 最后, 旁路电路停用, PEs 补偿电压降/升, 并校正电网的功率因数。停用顺序: 首先, PEs 停止控制; 然后, 旁路电路被激活, 以避免直流端口电压的浪涌, 电网按常规运行; 最后, PEs 停止。

3 仿真分析与实验验证

3.1 仿真分析

仿真相关参数如下: 系统额定功率为 100 kVA; 标称电网电压和负载电压分别为 13.2 kV 和 220 V; 负载阻抗考虑为 $0.4+j0.2 \Omega$, 电网的功率因数为 0.9。

图 5 为所提系统的直流端口电压控制性能, 图中, $V_{dc,NF}$ 为陷波滤波器的输出。从 0 s 开始, 直流端口电容开始充电, 变换器作为整流器运行; 1 s 时, 所提控制策略开始激活, 将变换器导通和直流端口电压调节至其参考电压 4 kV, 其中注入电压限制为 2 kV。该仿真结果表明, 在电网电压或负载电流突然变化的情况下, 系统只会出现较小的脉动, 可维持直流端口电压到参考值。

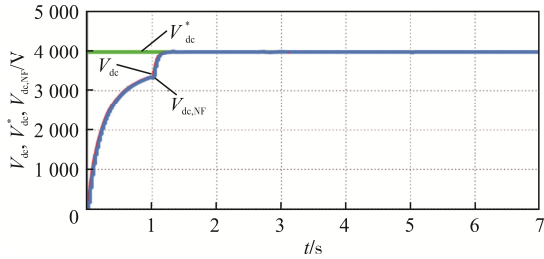


图 5 所提系统的直流端口电压控制性能

Fig. 5 Performance of proposed system under DC-link voltage control

图 6 为所提系统的差模电流控制效果。可知, PFC 在 1.5 s 时激活, 为了补偿无功功率, 差模电流基准从 0 变化, 并将电流调节到基准值, 这验证了所提 PFC 的有效性。

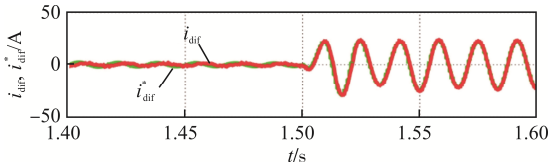


图 6 所提系统的差模电流控制效果

Fig. 6 Differential-mode current control effect of proposed system

图 7 为所提系统的电网电压谐波补偿性能。可知, 由于电网电压的第 5 次和第 7 次谐波分别为 3% 和 2%, 电网电流波形失真, 总谐波失真率为 5%, 由于所提系统补偿了谐波, 负载电流中的谐波显著减少, 负载电流的总谐波失真仅为 0.8%。

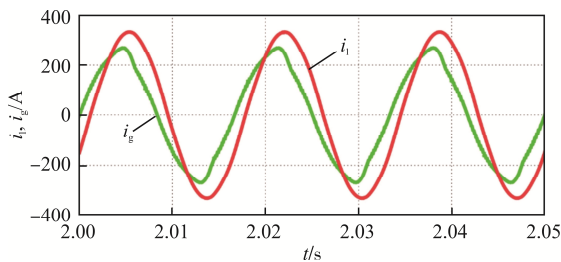
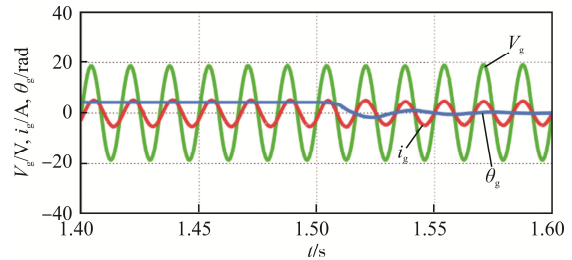


图 7 所提系统的电网电压谐波补偿性能

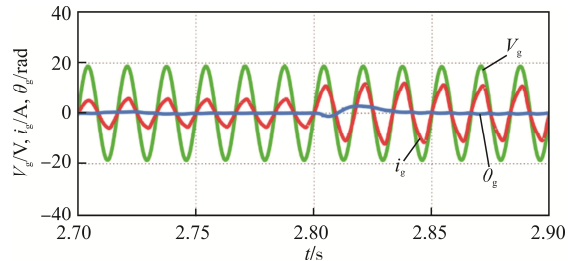
Fig. 7 Grid voltage harmonic compensation performance of proposed system

图 8 为电网电压、电网电流和电网相角的变化。如图 8(a)所示, 在 PFC 激活之前, 电网相角约为 0.45 rad(25.8°)。然而, 由于 PFC 在 1.5 s 激活, 电网相角减小到 0, 电网功率因数变为 1; 如图 8(b)所示, 即使在负载电流突然变化的情况下, 也只会

出现较小的脉动, 电网角度保持在接近 0 的位置。以上结果验证了所提方法的有效性。



(a) 功率因数校正激活



(b) 负载条件改变

图 8 电网电压、电网电流和电网相角的变化

Fig. 8 Variations of grid voltage, grid current and grid phase angle

3.2 实验验证

为进一步验证所提系统的有效性, 进行了实验验证。图 9 为实验装置, 其实验原理如图 1 所示, 实验的相关参数见表 2。本文使用 2 个负载模拟负载变化, 每个负载阻抗为 40+j13.6 Ω。

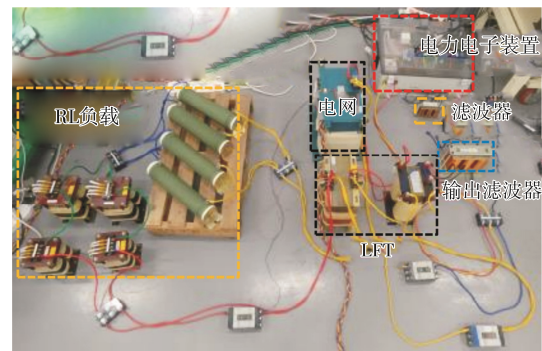


图 9 实验装置

Fig. 9 Experimental devices

图 10 为直流端口电压控制和差模电流控制的实验效果。可知, 在直流端口电容初始充电期间, 由于变换器充当整流器, 直流端口电压保持为 107 V。当变换器导通和直流端口电压控制激活时, 差模电流基

准从 0 开始增加。将电流调节到基准值,使电压调节到 150 V。

表 2 实验相关参数

Tab. 2 Experimental parameters

参数	数值
系统额定功率/kVA	100
电网电压/V	380
负载电压/V	220
一次绕组匝数比	9:2
直流端口参考电压/V	150
接口滤波器阻抗/ Ω	$0.04+j1.5$
负载阻抗/ Ω	$40+j13.6$
开关频率/kHz	5

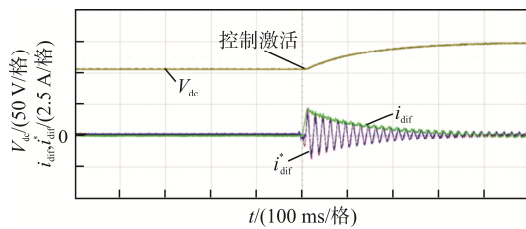
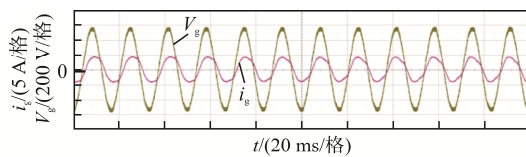


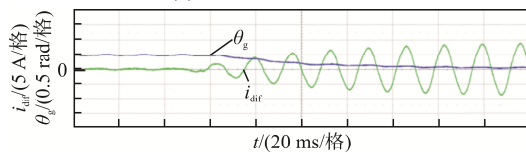
图 10 直流端口电压控制和差模电流控制的实验效果

Fig. 10 Experimental results under DC-link voltage control and differential-mode current control

图 11 为 PFC 激活时的电网电压、电网电流、电网角度和差模电流的实验效果。可知,在 PFC 激活之前,电网相角接近 0.5 rad,这意味着电网的功率因数为 0.88。考虑到负载阻抗,由于线路阻抗和变压器的磁化因素,实际电网功率因数较小。当 PFC 激活时,差模电流增加,电网电流相角改变。因此,



(a) 电网电压与电流



(b) 电网相角和差模电流

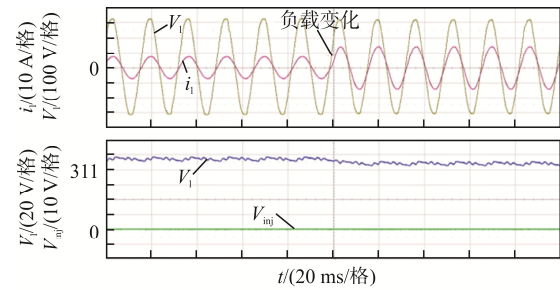
图 11 PFC 激活时的电网电压、电网电流、电网相角和差模电流的实验效果

Fig. 11 Experimental results of grid voltage, grid current, grid phase angle and differential-mode current when PFC is activated

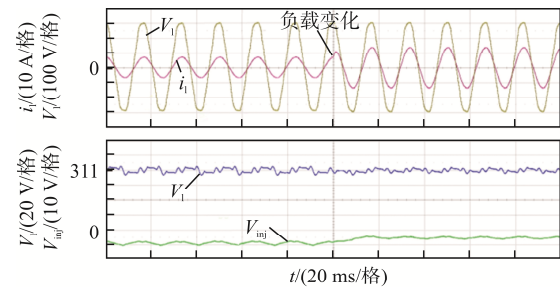
PFC 激活时,差模电流增加,电网电流相角改变。因此,

电网角减小到 0,这意味着功率因数的提升较好。

图 12 为负载条件改变时的负载电压和负载电流。可知,由于负载从 $40+j13.6 \Omega$ 改变为 $20+j6.8 \Omega$,电网电流增加,在没有所提系统的情况下,由于线路阻抗压降,负载电压幅值从 $325V_{peak}$ 降至 $316V_{peak}$ 。此外,由于电压骤升,在 2 种负载条件下,负载电压都高于其参考电压。然而,对于所提系统,负载电压保持为 $311V_{peak}$,因为逆变器在电压骤升条件下合成了负注入电压,即使在负载变化情况下,负载电压仍然作为其参考。最终验证了所提方法的有效性。



(a) 未使用所提方法



(b) 使用所提方法

图 12 负载条件改变时的负载电压和负载电流的实验效果

Fig. 12 Experimental results of load voltage and load current under changes in load conditions

4 结语

本文在现有带抽头的配电变压器和串联功率变换器的基础上,提出了 1 种新型混合配电变压器拓扑。所提单相系统具有简单的拓扑结构,其中功率变换器与变压器的 2 个抽头串联,所提出三相系统由 3 个单相系统组成,其具有功率变换器的额定功率较低和附加电流回路允许电网功率因数校正的优势。该系统综合了一个补偿电压矢量,以补偿

电压骤降/骤升和电网电压谐波。此外,还可提高电网的功率因数。仿真和实验结果表明,该系统具有以下优点:①即使在负载波动条件下也能保持负载电压;②电网电压谐波得到补偿,从而实现高电能质量;③电网功率因数得到改善,从而提高了功率传输效率。

参考文献:

- [1] 王玉梅,王露露.基于多类需求响应的配电网优化调度[J].电源学报,2024,22(2):273-282.
Wang Yumei, Wang Lulu. Optimal dispatching of distribution network based on multi-type demand response [J]. Journal of Power Supply, 2024, 22(2): 273-282. (in Chinese)
- [2] Moutis P, Alizadeh-Mousavi O. Digital twin of distribution power transformer for real-time monitoring of medium voltage from low voltage measurements [J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2021, 36(4): 1952-1963.
- [3] 陆城,胡文斐,张伟强.用于快速充电站的高频高效模块化固态变压器[J].电源学报,2021,19(6):74-82.
Lu Cheng, Hu Wenfei, Zhang Weiqiang. High-frequency high-efficiency modular solid state transformer for quick charging stations [J]. Journal of Power Supply, 2021, 19(6): 74-82. (in Chinese)
- [4] 潘志城,邓军,周海滨,等.特高压多端混合直流输电工程柔直变压器的振动特性研究[J].高压电器,2022,58(1):122-129.
Pan Zhicheng, Deng Jun, Zhou Haibin, et al. Research on vibration characteristics of flexible DC transformer in UHV multi-terminal hybrid DC transmission project [J]. High Voltage Apparatus, 2022, 58(1): 122-129. (in Chinese)
- [5] 牟杰,杨依睿,徐永海,等.接入电力电子变压器的光伏及混合储能协调控制策略研究[J].电力电容器与无功补偿,2022,43(3):143-152.
Mu Jie, Yang Yirui, Xu Yonghai, et al. Research on coordinated control strategy of photovoltaic and hybrid energy storage system connected to power electronic transformer [J]. Power Capacitor & Reactive Power Compensation, 2022, 43(3): 143-152. (in Chinese)
- [6] 刘梦轩,范栋琦,金成.基于模块化多电平变换器的混合型电力电子变压器及其控制策略的研究[J].电器与能效管理技术,2020(1):64-70.
Liu Mengxuan, Fan Dongqi, Jin Cheng. Research on hybrid power electronic transformer based on modular multi-level converter and its control strategy [J]. Electrical & Energy Management Technology, 2020(1): 64-70. (in Chinese)
- [7] Milczarek A, Malinowski M. Comparison of classical and smart transformers impact on MV distribution grid [J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2020, 35(3): 1339-1347.
- [8] 陈沛龙,刘君,曾华荣,等.一种新型混合式电力电子变压器仿真研究[J].变压器,2017,54(11):35-39.
Chen Peilong, Liu Jun, Zeng Huarong, et al. Simulation research of a novel hybrid power electronic transformer [J]. Transformer, 2017, 54(11): 35-39. (in Chinese)
- [9] 孙孔明,李玉敦,梁正堂,等.配电变压器高压侧单相接地对低压侧转移过电压研究[J].山东电力技术,2022,49(4):39-45,74.
Sun Kongming, Li Yudun, Liang Zhengtang, et al. Study of transferred overvoltage at low-voltage side of distribution transformer generated by single-phase to ground fault at high voltage side [J]. Shandong Electric Power, 2022, 49(4): 39-45, 74. (in Chinese)
- [10] 李大伟,梁得亮,高亚晨,等.一种基于模糊控制的混合式配电变压器的控制策略[J].电工技术学报,2021,36(zk2):696-703,722.
Li Dawei, Liang Deliang, Gao Yachen, et al. A control strategy based on fuzzy logic control for hybrid distribution transformer [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2021, 36(zk2): 696-703, 722. (in Chinese)
- [11] Sadigh A K, Smedley K M. Review of voltage compensation methods in dynamic voltage restorer (DVR) [C]// 2012 IEEE Power and Energy Society General Meeting. San Diego, CA, USA, 2012: 1-8.
- [12] 周秀,朱洪波,马云龙,等.不同模型下变压器绕组短路力学特性对比分析[J].高压电器,2022,58(1):148-154.
Zhou Xiu, Zhu Hongbo, Ma Yunlong, et al. Comparative analysis of short circuit mechanical characteristics of transformer winding under different models [J]. High Voltage Apparatus, 2022, 58(1): 148-154. (in Chinese)
- [13] Rauf A M, Khadkikar V. An enhanced voltage sag compensation scheme for dynamic voltage restorer [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2015, 62(5): 2683-2692.

- [14] 袁栋, 袁宇波, 贾勇勇, 等. 一种混合型输入串联输出并联直流变压器[J]. 电网技术, 2021, 45(1): 179-188.
Yuan Dong, Yuan Yubo, Jia Yongyong, et al. An ISOP hybrid DC transformer [J]. Power System Technology, 2021, 45(1): 179-188. (in Chi-nese)
- [15] 杨斌, 赵剑锋, 季振东, 等. 混合变压器技术研究综述[J]. 电力自动化设备, 2020, 40(2): 205-213, 1-3.
Yang Bin, Zhao Jianfeng, Ji Zhendong, et al. Overview of hybrid transformer technologies [J]. Electric Power Automation Equipment, 2020, 40(2): 205-213, 1-3. (in Chinese)
- [16] Kang T, Choi S, Morsy A S, et al. Series voltage regulator for a distribution transformer to compensate voltage sag/swell [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2017, 64(6): 4501-4510.
- [17] 杨斌. 多功能混合型电力电子变压器关键技术研究[D]. 南京: 东南大学, 2019.
Yang Bin. Research on the key techniques of multifunctional hybrid power electronic transformer [D]. Nanjing: Southeast University, 2019. (in Chinese)
- [18] Chen Y H, Lin Changyi, Chen J M, et al. An inrush mitigation technique of load transformers for the series voltage sag compensator [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2010, 25(8): 2211-2221.
- [19] 张健, 宋士瞻, 咸日常, 等. 配电变压器高压侧无功补偿对经济运行的影响分析[J]. 电工技术, 2021(9): 82-85.
Zhang Jian, Song Shizhan, Xian Richang, et al. Analysis of the influence of reactive power compensation at the high voltage side of distribution transformer on economic operation [J]. Electric Engineering, 2021(9): 82-85. (in Chinese)
- [20] Gao Shan, Lin Xinchun, Ye Shangjun, et al. Transformer inrush mitigation for dynamic voltage restorer using direct flux linkage control [J]. IET Power Electronics, 2015, 8(11): 2281-2289.



万家伟

作者简介:

万家伟(1990—), 男, 硕士, 工程师。研究方向: 电气工程、高电压技术。E-mail: 981837970@qq.com。

陈汉超(1989—), 男, 硕士, 工程师。研究方向: 电气工程。E-mail: chenhanchaosuper@163.com。

廖承(1981—), 男, 硕士, 工程师。研究方向: 高电压技术。E-mail: 6982145@qq.com。

曹毅(1984—), 男, 通信作者, 硕士, 工程师。研究方向: 电网运行与控制、电力市场。E-mail: jiaboyan121@126.com。

(责任编辑: 郭凯凯)