# 基于直接式AC/AC变换的两相支撑调控型 混合配电变压器

蔡国伟,王艺博,刘 闯,朱炳达,郭东波,张翰文

(东北电力大学 现代电力系统仿真控制与绿色电能新技术教育部重点实验室,吉林 吉林 132012)

摘要:针对配电网中不确定性因素导致的电压跌落/骤升给敏感负荷带来的不利影响,提出了一种基于直接式AC/AC变换的两相支撑调控型混合配电变压器(HDT)。该HDT由直接式AC/AC变换器与传统工频变压器组合而成,能够根据负荷需求进行电压幅值与相角的柔性调控。对所采用的直接式AC/AC变换器拓扑及其调制策略进行了阐述分析。在此基础上,提出了基于直接式AC/AC变换的HDT系统结构。依托HDT系统结构,对其工作原理进行了详细分析并对HDT系统的电压幅值与相角调控范围进行了定量研究。最后通过搭建1kW的实验原理样机,对所提出的HDT系统理论分析的正确性与有效性进行了实验验证。 关键词:混合配电变压器;传统工频变压器;直接式AC/AC变换器;电压幅值调控;电压相角调控 中图分类号:TM 41;TM 46

### 0 引言

人类社会电气化进程的不断推进使得人们对电能的依赖程度越来越高,在电能消耗量不断增长的同时,耗能设备的种类也呈现出多样化发展趋势<sup>[1-2]</sup>。在此背景下,为了确保接于电力系统的电力设备能够安全可靠运行,保证良好的电能质量是其避不开的重要课题<sup>[3-4]</sup>。电压波动作为反映电能质量优劣的重要指标之一,在配电网各种扰动中的占比高达92%之多<sup>[5-6]</sup>,而某些工业负荷发生影响安全生产的电压波动事件也有20~30次/a<sup>[7-8]</sup>,严重制约了企业与社会的发展。随着近年来分布式电源的高比例并网运行,配电网的电压波动与越限等问题更加突出<sup>[9-10]</sup>。因此,在多样化负荷对电能质量要求越来越高以及电网运行环境愈亦复杂的矛盾背景下,做好保证电网电压质量的研究工作尤为重要。

针对上述问题,为避免敏感负荷在系统电压出现波动时带来的危害以及减少因电压扰动造成的巨大经济损失<sup>[11-12]</sup>,利用具有电压调控能力的电力装置可有效应对系统电压扰动问题。在多种电压调控装置中,将传统工频变压器TR(power frequency TRansformer)与电力电子变换器相结合的方案是一种不错的选择,该方案既可以发挥TR电磁耦合的安全性优势,又可以利用电力电子变换器所具有的动态性能,实现了两者的优势互补<sup>[13]</sup>。此种具有混合特点的调压装置起初被称为智能变压器<sup>[14]</sup>或新一代变压器<sup>[15]</sup>。然而,从可靠性的角度来看,文献[15]所提出的方案存在变压器变比问题以及其电力电子变

收稿日期:2020-01-19;修回日期:2020-09-28 基金项目:国家自然科学基金面上项目(51877035) Project supported by the General Program of the National Natural Science Foundation of China(51877035) 换器损坏后整套电力装置无法正常运行等不足,使 得该类装置难以满足电力系统安全可靠运行的要 求<sup>[13]</sup>。随着近年来电力电子技术的不断发展,电力 电子变换器所具有的性能得到了有效提升,基于电 力电子技术的电压补偿装置也因此取得了进一步发 展,尤其是考虑电力电子技术与TR相结合的混合式 电压补偿器获得了较多的研究成果<sup>[16-17]</sup>。文献[18] 提出了一种基于双向电力电子开关的智能配电变压 器,其可以实现电压的有载调控,但较窄的电压调控 范围以及阶跃式的调压方式使得其使用范围受限。

目前,在众多的混合式交流电压补偿装置中,基 于AC/DC、DC/DC与DC/AC变换器的固态变压器SST(Solid State Transformer)发展较为成熟。通常情况下,SST拓扑结构利用中频变压器实现隔离目的且输送至负荷的能量全部经由电力电子单元传输,在电力电子模块故障情况下,SST无法正常运行;同时,SST的模块化结构又增加了系统运行成本<sup>[19]</sup>。文献[20-22]提出了一种基于矩阵变换器的混合式配电变压器HDT(Hybrid Distribution Transformer),相较于SST,HDT在一定程度上得以简化且能够满足故障后运行的相关要求。然而该类HDT系统拓扑与控制系统设计仍较为复杂,如文献[22]中的变压器一次侧接有1个三相矩阵变换器,二次侧接有3个单相矩阵变换器,整个系统结构较为繁杂,运行可靠性降低。

针对由配电网中各种不确定性因素导致的电 压波动给敏感负荷所带来的不利影响,本文提出了 一种基于直接式AC/AC变换的两相支撑调控型 HDT系统,该HDT由直接式AC/AC变换器与TR组 合而成。在三相配电系统中,所提出的HDT系统拓 扑具有基于另外两相电压实现本相电压的支撑调 控能力,能够满足负荷电压柔性调控的需求。本文 首先对所采用的直接式AC/AC变换器拓扑及其调 制策略进行了阐述;在此基础上,提出了基于直接式 AC/AC变换的HDT系统结构;然后对HDT系统的 运行原理进行了详细分析并对其电压幅值与相角的 调控范围进行了定量研究;最后搭建了1kW的实验 平台,对HDT系统的电压幅值、电压相角与电压幅 值+电压相角这3种调控模式进行了实验验证,取得 了较好的效果。

# 1 直接式AC/AC变换器与HDT系统结构

# 1.1 直接式AC/AC变换器及其调制策略

本文采用文献[23]提出的直接式AC/AC变换 器拓扑结构及其调制策略,见附录图A1。图A1(a) 为直接式AC/AC变换器的拓扑结构,该变换器由2 个脉冲宽度调制(PWM)型AC/AC 斩波桥臂构成, 将其分别定义为P-Leg与N-Leg。在每个桥臂中均 有4个IGBT(S<sub>1</sub>、S<sub>1e</sub>、S<sub>2</sub>、S<sub>2e</sub>与S<sub>1p</sub>、S<sub>1ep</sub>、S<sub>2p</sub>、S<sub>2p</sub>)以及1 个用于吸收线路杂散电感能量的电容 $(C_1 = C_2)$ ,2个 桥臂构成H桥结构。图A1(b)-(e)为P-Leg与N-Leg 的调制原理。图中,u,为PWM 载波,P-Leg 与N-Leg 均选取三角波作为载波进行分析。由PWM原理可 知:在运行过程中,无论变换器输入电压 $v_{\rm uv}(t)$ 极性 如何,每半个周期内,在P-Leg与N-Leg的8个IGBT 中,始终有4个常开,4个接受PWM进行高频动作, 即变换器最多有4个IGBT进行高频动作,有效降低 了开关损耗。另一方面,该变换器的输出电压极性 与输入电压极性直接相关,输入电压极性对输出结 果具有直接影响。变换器的输出电压 $\boldsymbol{v}_{000}(t)$ 与输 入电压**v**<sub>112</sub>(t)具有如下关系:

$$\boldsymbol{v}_{0102}(t) = \boldsymbol{v}_{01}(t) - \boldsymbol{v}_{02}(t) = (d_1 - d_2)\boldsymbol{v}_{1112}(t) \quad (1)$$

其中, $v_{01}(t)$ 与 $v_{02}(t)$ 分别为P-Leg与N-Leg的端电 压; $d_1$ 与 $d_2$ 分别为P-Leg与N-Leg的占空比,其取值范 围均为[0,1]。由式(1)可知,通过调整 $d_1$ 与 $d_2$ 的取 值可以实现对变换器输出电压的调控,即变换器具 有双自由度调控能力,变换器运行灵活性较高。同 时,由变换器桥臂占空比的取值范围可知, $d_1$ - $d_2$ 的 取值范围为[-1,1],即变换器具有双极性调控能力。

1.2 基于直接式AC/AC变换器的HDT系统结构

针对直接式 AC / AC 变换器的特点,提出基于 直接式 AC / AC 变换的 HDT 系统结构,如附录图 A2 所示。图中,HDT 系统结构由 TR、直接式 AC / AC 变换器模块及其控制系统构成。TR 的一次侧由 W<sub>A</sub>、W<sub>B</sub>、W<sub>c</sub>这3个绕组构成;二次侧由主绕组(W<sub>a1</sub>、 W<sub>b1</sub>、W<sub>c1</sub>)与辅助绕组(W<sub>a2</sub>、W<sub>b2</sub>、W<sub>c2</sub>)这2个部分构 成。由 HDT 系统的拓扑结构可知,每相电力电子模 块由2个直接式 AC / AC 变换器构成且2个变换器 的输入侧分别与另外两相的辅助绕组相连,即工作 于每相的电力电子模块由另外两相支撑。总体而 言,TR的二次侧主绕组、直接式AC/AC变换器模 块与负载构成串联系统。为了提高整个系统的可靠 性,在直接式AC/AC变换器模块输入与输出端口 分别装设了旁路开关S<sub>bp1</sub>、S<sub>bp2</sub>、S<sub>bp3</sub>与S<sub>bp-a</sub>、S<sub>bp-b</sub>、S<sub>bp-c</sub>。 在正常工作状态,旁路开关S<sub>bp1</sub>、S<sub>bp3</sub>与S<sub>bp-a</sub>、S<sub>bp-b</sub>、S<sub>bp-c</sub>。 在正常工作状态,旁路开关S<sub>bp1</sub>、S<sub>bp2</sub>、S<sub>bp3</sub>处于闭合状 态,S<sub>bp-a</sub>、S<sub>bp-b</sub>、S<sub>bp-c</sub>处于断开状态;在检修/故障状态, 旁路开关S<sub>bp1</sub>、S<sub>bp2</sub>、S<sub>bp3</sub>处于断开状态,S<sub>bp-a</sub>、S<sub>bp-b</sub>、S<sub>bp-c</sub>处 于闭合状态。

# 2 HDT系统运行原理与控制策略

#### 2.1 HDT系统运行原理

由图 A1 可知, HDT 系统的二次侧输出电压  $v_{La}$ 、  $v_{Lb}$ 、 $v_{Lc}$ 分别等于TR二次侧主绕组电压  $v_{Ta}$ 、 $v_{Tb}$ 、 $v_{Tc}$ 与直 接式 AC / AC 变换器模块输出侧电压  $\Delta v_{bc}$ 、 $\Delta v_{ca}$ 、 $\Delta v_{ab}$ 之和,即:

$$\begin{cases} \boldsymbol{v}_{\text{La}} = \boldsymbol{v}_{\text{Ta}} + \Delta \boldsymbol{v}_{\text{bc}} \\ \boldsymbol{v}_{\text{Lb}} = \boldsymbol{v}_{\text{Tb}} + \Delta \boldsymbol{v}_{\text{ca}} \\ \boldsymbol{v}_{\text{La}} = \boldsymbol{v}_{\text{Ta}} + \Delta \boldsymbol{v}_{\text{cb}} \end{cases}$$
(2)

TR二次侧主绕组电压 $v_{Ta}$ 、 $v_{Tb}$ 、 $v_{Te}$ 分别取决于TR 的一次侧绕组与二次侧主绕组匝数比 $n_{Ta1}$ 、 $n_{Tb1}$ 、 $n_{Te1}$ ( $n_{Ta1} = n_{Tb1} = n_{Tc1} = n_{T1}$ )。直接式AC/AC变换器模块输 出侧电压 $\Delta v_{be}$ 、 $\Delta v_{ca}$ 、 $\Delta v_{ab}$ 取决于TR的一次侧绕组与二 次侧辅助绕组匝数比 $n_{Ta2}$ 、 $n_{Tb2}$ 、 $n_{Tc2}$ ( $n_{Ta2} = n_{Tb2} = n_{Tc2} = n_{T2}$ ) 以及变换器的占空比,即HDT系统满足如下电压 关系:

$$\begin{cases} \boldsymbol{v}_{\mathrm{Sa}} = \boldsymbol{n}_{\mathrm{Ta1}} \boldsymbol{v}_{\mathrm{Ta}} \\ \boldsymbol{v}_{\mathrm{Sb}} = \boldsymbol{n}_{\mathrm{Tb1}} \boldsymbol{v}_{\mathrm{Tb}} \\ \boldsymbol{v}_{\mathrm{Sc}} = \boldsymbol{n}_{\mathrm{Tc1}} \boldsymbol{v}_{\mathrm{Tc}} \end{cases}$$
(3)

$$\begin{aligned} \Delta \boldsymbol{v}_{bc} &= D_{A1} \boldsymbol{v}_{Cb} + D_{A2} \boldsymbol{v}_{Cc} \\ \Delta \boldsymbol{v}_{ca} &= D_{B1} \boldsymbol{v}_{Cc} + D_{B2} \boldsymbol{v}_{Ca} \\ \Delta \boldsymbol{v}_{\perp} &= D_{C1} \boldsymbol{v}_{C} + D_{C2} \boldsymbol{v}_{Cl} \end{aligned}$$
(4)

其中, $v_{Sa}$ 、 $v_{Sb}$ 、 $v_{Sc}$ 为HDT系统一次侧输入电压,即为TR一次侧电压; $v_{Ca}$ 、 $v_{Cb}$ 、 $v_{Cc}$ 为TR二次侧辅助绕组电压,其值由式(5)计算得到; $D_{A1}$ 和 $D_{A2}$ 、 $D_{B1}$ 和 $D_{B2}$ 、 $D_{C1}$ 和 $D_{C2}$ 分别为装设于A相、B相、C相的直接式AC/AC变换器占空比,其值由式(6)计算得到。

$$\begin{cases} \boldsymbol{v}_{Ca} = \boldsymbol{v}_{Sa}/n_{Ta2} \\ \boldsymbol{v}_{Cb} = \boldsymbol{v}_{Sb}/n_{Tb2} \\ \boldsymbol{v}_{Cc} = \boldsymbol{v}_{Sc}/n_{Tc2} \end{cases}$$
(5)  
$$= d_{Ab1} - d_{Ab2}, D_{A2} = d_{Ac1} - d_{Ac2} \end{cases}$$

$$\begin{cases} D_{B1} = d_{Bc1} - d_{Bc2}, D_{B2} = d_{Ba1} - d_{Ba2} \\ D_{C1} = d_{Ca1} - d_{Ca2}, D_{C2} = d_{Cb1} - d_{Cb2} \end{cases}$$
(6)

其中, $d_{Ab1}$ 和 $d_{Ab2}$ 、 $d_{Ac1}$ 和 $d_{Ac2}$ 、 $d_{Bc1}$ 和 $d_{Bc2}$ 、 $d_{Ba1}$ 和 $d_{Ba2}$ 与 $d_{Ca1}$ 和 $d_{Ca2}$ 、 $d_{Cb1}$ 和 $d_{Cb2}$ 分别为A相、B相与C相中每个直接式AC/AC变换器P-Leg和N-Leg的占空比。

 $(D_{A1})$ 

综上分析,HDT系统二次侧输出电压 **v**<sub>La</sub>、**v**<sub>Lb</sub>、**v**<sub>Le</sub>

与一次侧输入电压**v**<sub>Sa</sub>、**v**<sub>Sb</sub>、**v**<sub>Se</sub>满足如下关系:

$$\begin{cases} N_{\rm TA} = \boldsymbol{v}_{\rm La}/\boldsymbol{v}_{\rm Sa} = \left(\boldsymbol{v}_{\rm Ta} + \Delta \boldsymbol{v}_{\rm bc}\right)/\boldsymbol{v}_{\rm Sa} \\ N_{\rm TB} = \boldsymbol{v}_{\rm Lb}/\boldsymbol{v}_{\rm Sb} = \left(\boldsymbol{v}_{\rm Tb} + \Delta \boldsymbol{v}_{\rm ca}\right)/\boldsymbol{v}_{\rm Sb} \\ N_{\rm TC} = \boldsymbol{v}_{\rm Lc}/\boldsymbol{v}_{\rm Sc} = \left(\boldsymbol{v}_{\rm Tc} + \Delta \boldsymbol{v}_{\rm ab}\right)/\boldsymbol{v}_{\rm Sc} \end{cases}$$
(7)

其中, $N_{TA}$ 、 $N_{TB}$ 、 $N_{TC}$ 为HDT系统变比。HDT系统一次 侧电压 $\boldsymbol{v}_{Sa}$ 、 $\boldsymbol{v}_{Sb}$ 、 $\boldsymbol{v}_{Sc}$ 可以表示为:

$$\begin{cases} \boldsymbol{v}_{\mathrm{Sa}} = V_{\mathrm{S}} \\ \boldsymbol{v}_{\mathrm{Sb}} = V_{\mathrm{S}} \mathrm{e}^{\mathrm{j}\frac{-2\pi}{3}} \\ \boldsymbol{v}_{\mathrm{S}} = V_{\mathrm{S}} \mathrm{e}^{\mathrm{j}\frac{2\pi}{3}} \end{cases} \tag{8}$$

其中,*V*<sub>s</sub>为HDT系统一次侧电压幅值。由此,将式 (3)—(5)与式(8)代入式(7)可得:

$$\begin{cases} N_{\rm TA} = 1/n_{\rm T1} + \left(D_{\rm A1} e^{j\frac{-2\pi}{3}} + D_{\rm A2} e^{j\frac{2\pi}{3}}\right)/n_{\rm T2} \\ N_{\rm TB} = 1/n_{\rm T1} + \left(D_{\rm B1} e^{j\frac{4\pi}{3}} + D_{\rm B2} e^{j\frac{2\pi}{3}}\right)/n_{\rm T2} \\ N_{\rm TC} = 1/n_{\rm T1} + \left(D_{\rm C1} e^{j\frac{-2\pi}{3}} + D_{\rm C2} e^{j\frac{-4\pi}{3}}\right)/n_{\rm T2} \\ \boldsymbol{v}_{\rm La} = \boldsymbol{v}_{\rm Sa} \left[1/n_{\rm T1} + \left(D_{\rm A1} e^{j\frac{-2\pi}{3}} + D_{\rm A2} e^{j\frac{2\pi}{3}}\right)/n_{\rm T2}\right] \\ \boldsymbol{v}_{\rm Lb} = \boldsymbol{v}_{\rm Sb} \left[1/n_{\rm T1} + \left(D_{\rm B1} e^{j\frac{4\pi}{3}} + D_{\rm B2} e^{j\frac{2\pi}{3}}\right)/n_{\rm T2}\right] \quad (10) \\ \boldsymbol{v}_{\rm La} = \boldsymbol{v}_{\rm Sa} \left[1/n_{\rm T1} + \left(D_{\rm C1} e^{j\frac{-2\pi}{3}} + D_{\rm C2} e^{j\frac{-4\pi}{3}}\right)/n_{\rm T2}\right] \end{cases}$$

再将式(8)代入式(10),可得:

$$\begin{cases} \boldsymbol{v}_{\text{La}} = V_{\text{S}} \left[ 1/n_{\text{TI}} + \left( D_{\text{A1}} e^{j\frac{-2\pi}{3}} + D_{\text{A2}} e^{j\frac{2\pi}{3}} \right)/n_{\text{T2}} \right] \\ \left\{ \boldsymbol{v}_{\text{Lb}} = V_{\text{S}} \left[ e^{j\frac{-2\pi}{3}}/n_{\text{T1}} + \left( D_{\text{B1}} e^{j\frac{2\pi}{3}} + D_{\text{B2}} \right)/n_{\text{T2}} \right] \\ \left[ \boldsymbol{v}_{\text{Lc}} = V_{\text{S}} \left[ e^{j\frac{2\pi}{3}}/n_{\text{T1}} + \left( D_{\text{C1}} + D_{\text{C2}} e^{j\frac{-2\pi}{3}} \right)/n_{\text{T2}} \right] \end{cases}$$
(11)

由式(9)—(11)可知,HDT系统不仅可以调控输 出电压的幅值,而且具有输出电压相角调控能力。 HDT系统输出电压的幅值调控能力与相角调控范围 取决于式(9)所示变比的取值。分别设置 $n_{T1}=n_{T2}$ 和  $n_{T1}\neq n_{T2}$  2种情况,以A相为例,对HDT系统的电压调 控能力进行具体分析。所绘制HDT系统变比与直接 式AC / AC变换器占空比的关系曲面,如图1所示。

由图1可以看出,当TR变比的取值不同时, HDT系统的电压调控范围也不同;不论*n*<sub>TI</sub>=*n*<sub>T2</sub>还是 *n*<sub>T1</sub>≠*n*<sub>T2</sub>,随着TR变比取值的增大,HDT系统的电压 调控范围减小,反之调控范围增大。当TR变比的取 值确定后,直接式AC/AC变换器占空比与TR变比 的关系即为图1所示的某一对应曲面。TR变比的 取值需依据系统电压以及负荷需求具体进行优化设



#### 图1 HDT系统变比与直接式AC/AC变换器占空比的关系

Fig.1 Relationship between variable ratio of HDT system and duty cycle of direct AC / AC converter

计。另一方面,考虑到装设于HDT系统的直接式AC/AC变换器占空比取值范围为[-1,1],对式(9) 所示TR变比进行计算分析可知,其电压相角调控范 围为[-60°,60°]。

为了便于进一步分析, 对 $n_{T1}=n_{T2}=1$ 时的 HDT系 统电压调控范围进行定量分析,则式(11)可简化为 式(12)。

$$\begin{cases} \boldsymbol{v}_{\text{La}} = V_{\text{S}} \left( 1 + D_{\text{A1}} e^{j\frac{-2\pi}{3}} + D_{\text{A2}} e^{j\frac{2\pi}{3}} \right) \\ \boldsymbol{v}_{\text{Lb}} = V_{\text{S}} \left( e^{j\frac{-2\pi}{3}} + D_{\text{B1}} e^{j\frac{2\pi}{3}} + D_{\text{B2}} \right) \\ \boldsymbol{v}_{\text{Lc}} = V_{\text{S}} \left( e^{j\frac{2\pi}{3}} + D_{\text{C1}} + D_{\text{C2}} e^{j\frac{-2\pi}{3}} \right) \end{cases}$$
(12)

根据式(12),HDT系统的电压调控范围相量图 见图2。

由图2可以看出,当直接式AC/AC变换器占空 比满足关系 $D_{A1}=D_{A2}\in[-1,1]$ 时,HDT系统的输出电 压 $v_{La}$ 与输入电压 $v_{Sa}$ 共线,即HDT系统仅可实现电压 幅值调控,调控范围为[0,2];当直接式AC/AC变 换器占空比满足关系 $D_{A1}\neq D_{A2}$ 时,HDT系统的输出电 压 $v_{La}$ 与输入电压 $v_{Sa}$ 之间存在一个夹角 $\theta$ ,此时的 HDT系统具备电压幅值与相角同时调控能力,调控 范围分别为[0,2]与 $[-60^\circ, 60^\circ]$ 。

从另一角度来看,当HDT装设于配电系统时, 其TR变比已依据系统电压等级与负荷需求进行了 相关优化设计,即TR变比已为定值,若此时HDT系



图 2 HDT系统电压调控范围相量图 Fig.2 Phasor diagram of voltage regulation range of HDT system

统的输入侧电压 $v_{sa}$ 、 $v_{sb}$ 、 $v_{sc}$ 出现波动,则其输出侧电 压 $v_{La}$ 、 $v_{Lb}$ 、 $v_{Lc}$ 可在 HDT系统电压可调范围内进行柔 性调控,满足负荷电压所需。上文所提出的幅值调 控范围[0,2]与相角调控范围[-60°,60°]均为 $n_{T1}$ =  $n_{T2}$ =1时的计算结果。在配电网中,依据负荷需求以 及电压波动特性,可对TR变比的取值进行优化设 计。考虑配电网实际需求以及为了提供具体参考, 在此将图2(b)中场景 I—V下的 HDT 调控范围进 行计算,具体结果详见附录表A1。由表A1可以看 出,当TR变比取不同值时,HDT 的电压调控范围不 同。反之,当配电网中实际所需的电压调控需求不 同时,可依据具体工况需求对 HDT 中TR变比的取 值进行优化设计。依据上文 HDT 运行原理分析可 知,所对应的直接式AC / AC 变换器模块容量需求 可依据式(13)进行选取。

 $S_{\text{N-AC/AC}} = v_{\text{N-AC/AC}} = \zeta v_{\text{TN}} i_{\text{TN}} = \zeta S_{\text{TN}}$  (13) 其中, $S_{\text{N-AC/AC}}, v_{\text{N-AC/AC}} = i_{\text{N-AC/AC}}$ 分别为直接式AC/AC 变换器模块额定容量、额定电压与额定电流; $\zeta$ 为 HDT系统的电压调控范围; $v_{\text{TN}}, i_{\text{TN}} = S_{\text{TN}}$ 分别为所对 应的TR二次侧主绕组额定电压、额定电流与额定 容量。

由式(13)可以看出,HDT系统中所串入的直接 式AC/AC变换器单元模块的容量需求取决于TR 额定容量以及HDT系统的电压调控范围。

#### 2.2 HDT系统控制策略

在上文HDT系统运行原理分析的基础上,提出 HDT系统的控制策略,该控制策略与传统HDT并无 实质差别,其控制框图如图3所示。图中, $V_{Lref}$ 与 $V_{L}$ 分别为HDT系统二次侧输出电压参考值与实际值;  $v_{error}$ 为电压偏差;D为变换器占空比; $v_{L}$ 、 $\omega$ 分别为 HDT系统二次侧电压瞬时值与角频率。由图3可 知,当系统电压稳定或变换器出现故障情况下,旁路 开关S<sub>p</sub>接通,HDT系统工作于TR模式。当系统存在 电压波动,如电压跌落或骤升,HDT系统可以利用电 压采样反馈值与参考值的偏差经比例积分(PI)控制 器提供变换器占空比,进而利用PWM模块调制后形成高频动作信号,最终实现电压控制。



图 3 HDT 系统控制框图 Fig.3 Control block diagram of HDT system

#### 2.3 HDT系统优势对比分析

通过上文的分析,为了能够更为清晰地体现本 文所提直接式AC/AC型HDT的优势,将其与现有 HDT的方案进行对比,具体如表1所示。由表1可 知,直接式AC/AC型HDT具有长时补偿能力、无需 外部储能设备以及具有单级功率变换特点等优势;另 一方面,直接式AC/AC型HDT无直流环节,从而无 需装设电解电容,其体积小、使用寿命较长且维护工 作量较小。针对直接式AC/AC型HDT,本文所采用 的直接式AC/AC变换器具有结构简单、无需采用 特殊的换流策略或RC缓冲电路即可解决换流问题; 同时,其具有双极性特点,能够实现电压的双极性调 控,满足HDT的电压跌落与骤升等相关调控需求。

# 表1 不同类型HDT的对比分析

Table 1 Comparative analysis of different types of HDT

HDT类型	长时补偿能力	直流环节	功率变换	外部储能
AC / AC 型	有	无	单级	无
DC / AC 型	依靠外部储能	有	单级	有
AC/DC/AC型	有	有	两级	无

# 3 实验验证

#### 3.1 实验平台参数

在理论分析的基础上,利用一个1kW的实验平 台装置对所提出的HDT系统的有效性与合理性进 行验证性分析,所搭建的实验平台装置及其参数分 别见附录图A3与表A2。为了对HDT系统的工作模 式进行详细分析,将所提出的HDT系统调控模式划 分为电压幅值、电压相角与电压幅值+电压相角这3 种调控模式,具体分析如下。

#### 3.2 电压幅值调控模式

由上文的理论分析可知:在HDT系统中,当 $D_{A1}$ =  $D_{A2}$ 、 $D_{B1}$ = $D_{B2}$ 、 $D_{C1}$ = $D_{C2}$ 时,HDT二次侧的A相、B相、C 相可以实现对应的电压幅值调控。换言之,当 $D_{A1}$ =  $D_{A2}$ 时,HDT系统二次侧的A相工作于电压幅值调控 模式,其他两相亦相同。为了证明所提出的HDT系 统能够运行于电压幅值调控模式,以A相为例进行 实验。同时,考虑实验室的设备条件,直接将TR的 B相与C相二次侧主绕组视为用以支撑A相的辅助绕 组,即用以支撑A相电压调控的另外两相电压直接 取自TR对应二次侧主绕组。设HDT系统的一次侧 额定电压 $v_{\text{SAN}}$ =110 V,额定负载电压 $v_{\text{LAN}}$ =55 V,TR 一次侧与二次侧主绕组匝数比 $n_{\text{TI}}$ =2。为了验证HDT 系统的电压幅值调控能力,设HDT系统一次侧输入 电压 $v_{\text{SA}}$ =120 V, $v_{\text{SA}}$ > $v_{\text{SAN}}$ 。由此可知,TR二次侧主绕 组电压 $v_{\text{Ta}}$ =60 V, $v_{\text{Ta}}$ > $v_{\text{LAN}}$ ,即为了满足负荷电压所需, HDT系统需要由B相与C相构建1个幅值为-5 V的 调控电压。此时,HDT系统的变比 $N_{\text{TA}}$ =120/55。所 得实验结果与其对应的相量图见附录图A4。

图 A4(a)为A相TR二次侧主绕组电压 $v_{Ta}$ ,HDT 系统二次侧电压(负荷侧电压)v<sub>1</sub>以及HDT补偿调 控电压 $\Delta v_{hc}$ 的实验结果。由图可以看出,HDT系统 构建的调控电压 $\Delta v_{\rm br}$ 与二次侧主绕组电压 $v_{\rm ra}$ 相角相 差180°,两者合成满足负荷电压v<sub>1</sub>所需。图A4(b) 为A相TR二次侧主绕组电压**v**<sub>Ta</sub>、HDT系统二次侧电 压(负荷侧电压) $\boldsymbol{v}_{La}$ 以及B、C两相调控电压( $D_{Al}\boldsymbol{v}_{Cb}$ 、  $D_{A2} \boldsymbol{v}_{C}$ )实验结果。由图可以看出,B、C两相的调控 电压幅值相等且相角互差120°。图A4(c)为HDT系 统 B、C 两相 TR 的二次侧辅助绕组电压( $\boldsymbol{v}_{Cb}, \boldsymbol{v}_{Cc}$ )与其 对应的AC/AC变换器输出侧端口电压( $D_{AI}$  $\boldsymbol{v}_{Cb}$ 、  $D_{A2} \boldsymbol{v}_{C}$ )的实验结果对比图。由图A4(c)可以看出, B、C两相所对应的AC/AC变换器输入输出端口电 压同向且幅值由占空比进行调整。图A4(d)为B、C 两相调控电压 $(D_{A1}\boldsymbol{v}_{Cb}, D_{A2}\boldsymbol{v}_{Cc})$ 与其所合成的A相补偿 调控电压 $\Delta v_{bc}$ 的实验结果。由图A4(d)可以看出, B、C相电压幅值相等,相角互差120°,在HDT幅值调 控模式下,所构建的合成电压 $\Delta v_{hc}$ 与A相电压 $v_{Ta}$ 相 角互差180°。

综上分析,HDT系统输入侧电压高于额定电压时,HDT系统通过AC/AC变换器调控电压的构建,可以实现输出电压的有效调控,满足负载所需。

#### 3.3 电压相角调控模式

为了验证所提出的 HDT 系统能够运行于相 角调控模式,以A相为例进行实验。设HDT 系统的 一次侧额定电压 v<sub>SAN</sub>=110 V,额定负载电压 v<sub>LAN</sub>= 55 V,TR一次侧与二次侧主绕组匝数比 n<sub>T1</sub>=2。设 HDT 系统的一次侧实验电压 v<sub>SA</sub>=v<sub>SAN</sub>=110 V,则TR 二次侧主绕组电压 v<sub>Ta</sub>=v<sub>LAN</sub>=55 V,即负载电压幅值 满足要求。为了验证 HDT 系统的电压相角调控能 力,设TR二次侧主绕组电压 v<sub>Ta</sub>超前负载电压 v<sub>La</sub>的 相角为25°。为了满足负载电压相角要求,需要通过 HDT 系统进行电压相角调控,所得实验结果与其对 应的相量图见附录图 A5。

图 A5(a)为A相TR二次侧主绕组电压 $v_{Ta}$ 、HDT系统二次侧电压(负荷侧电压) $v_{La}$ 以及HDT系统补偿调控电压 $\Delta v_{ba}$ 的实验结果。由图可以看出,负载

电压 $v_{L}$ 滞后TR二次侧主绕组电压 $v_{T_a}$ 的相角为25°, HDT系统调控电压 Δv<sub>bc</sub>滞后 TR 二次侧主绕组电压  $v_{T_a}$ 的相角为102.5°。图A5(b)为A相TR二次侧主绕 组电压 $v_{Ta}$ 、HDT系统二次侧电压(负荷侧电压) $v_{La}$ 以 及B、C两相调控电压( $D_{A1}\boldsymbol{v}_{Cb}$ 、 $D_{A2}\boldsymbol{v}_{Cc}$ )实验结果。由图 可以看出,B相调控电压D<sub>A1</sub>v<sub>Cb</sub>滞后C相调控电压  $D_{A2}v_{Ce}$ 的相角为60°。图A5(c)为HDT系统B、C两相 的TR二次侧辅助绕组电压 $v_{Cb}$ 、 $v_{Cc}$ 与其对应的AC/ AC变换器输出侧端口电压 $(D_{A1}\boldsymbol{v}_{Cb}, D_{A2}\boldsymbol{v}_{Cb})$ 实验结果 对比图。由图可以看出,B相调控电压 $D_{AI}$  $\boldsymbol{v}_{Cb}$ 与B相 电压 $v_{cb}$ 同相,C相调控电压 $D_{A2}v_{cc}$ 与C相电压 $v_{cc}$ 反 相。图A5(d)为B、C两相调控电压( $D_{A1}\boldsymbol{v}_{Cb}, D_{A2}\boldsymbol{v}_{Cc}$ )与 其所合成的A相补偿调控电压Δv<sub>bc</sub>的实验结果。由 图可以看出,C相调控电压 $D_{a,v}$ 。超前A相补偿调控 电压 $\Delta v_{\rm bc}$ 的相角为42.5°, B相调控电压 $D_{\rm A1}v_{\rm Cb}$ 滞后A 相补偿调控电压 $\Delta v_{\rm bc}$ 的相角为17.5°。

综上分析,HDT系统输入侧电压相角出现偏移时,HDT系统通过AC/AC变换器调控电压的构建,可以实现输出电压相角的有效调控,满足负载所需。

# 3.4 电压幅值+相角调控模式

为了验证 HDT系统具有电压幅值+相角调控能力,在此设定 $D_{A1}=-D_{A2}=0.5$ 场景进行具体分析,其对应的实验结果及相量图如图4所示。图中, $\delta_1$ 、 $\delta_2$ 分



别为C相、B相调控电压滞后、超前A相补偿调控电压的相角。

图 4(a)为 A 相 TR 二次侧主绕组电压  $v_{Ta}$ 、HDT 系统二次侧电压(负荷侧电压)v<sub>L</sub>以及HDT补偿调 控电压  $\Delta v_{hc}$  的实验结果图。由图可知, 当 $D_{A1} = -D_{A2} =$ 0.5时,B、C两相调控电压( $D_{A1}\boldsymbol{v}_{Cb}, D_{A2}\boldsymbol{v}_{Cc}$ )所合成的A 相补偿调控电压  $\Delta v_{\rm bc}$  与 TR 二次侧主绕组电压  $v_{\rm Ta}$  垂 直,TR二次侧主绕组电压 $v_{T_a}$ 超前负载电压 $v_{L}$ 的相 角为23.4°。图4(b)为A相TR二次侧主绕组电压  $v_{Ta}$ 、HDT系统二次侧电压(负荷侧电压) $v_{La}$ 以及B、C 两相调控电压 $(D_{A1}\boldsymbol{v}_{Cb}, D_{A2}\boldsymbol{v}_{Cb})$ 实验结果图。由图可 知,B相调控电压 $D_{A1}$  $\boldsymbol{v}_{Cb}$ 滞后C相调控电压 $D_{A2}$  $\boldsymbol{v}_{Cc}$ 的相 角为 $60^{\circ}$ 。图4(c)为HDT系统B、C两相的TR二次 侧辅助绕组电压 v<sub>cb</sub>、v<sub>cc</sub>与其对应的 AC / AC 变换器 输出侧端口电压 $(D_{A}, \boldsymbol{v}_{C}, \boldsymbol{D}_{A}, \boldsymbol{v}_{C})$ 实验结果对比图。由 图可知,由于D<sub>A1</sub>=-D<sub>A2</sub>=0.5,B、C相调控电压幅值相 等,B相调控电压 $D_{A1}$  $\boldsymbol{v}_{Cb}$ 与B相电压 $\boldsymbol{v}_{Cb}$ 同相,C相调控 电压 $D_{A2}$  $\boldsymbol{v}_{Cc}$ 与C相电压 $\boldsymbol{v}_{Cc}$ 反相。图4(d)为B、C两相 调控电压 $(D_{A1}\boldsymbol{v}_{Cb}, D_{A2}\boldsymbol{v}_{Cc})$ 与其所合成的A相补偿调控 电压  $\Delta v_{bc}$  的实验结果。由图可知, C 相调控电压  $D_{A2} \boldsymbol{v}_{Ce}$ 超前A相补偿调控电压 $\Delta \boldsymbol{v}_{be}$ 的相角为30°,B相 调控电压 $D_{\rm Al} \boldsymbol{v}_{\rm Cb}$ 滞后A相补偿调控电压 $\Delta \boldsymbol{v}_{\rm bc}$ 的相角 为30°。综上分析,HDT系统具有同时调控电压幅 值与相角的能力。

# 4 结论

电压波动会影响敏感负荷的正常运行,甚至会 导致其出现故障,从而产生不必要的经济损失。针 对该问题,本文提出了一种适用于配电网电压柔性 调控的基于直接式AC/AC变换的两相支撑调控型 HDT。在直接式AC/AC变换器拓扑与调制策略分 析的基础上,对所提出的HDT系统结构与运行原理 进行了详细的分析,并以电压幅值与相角为分析对 象对HDT系统的电压调控范围进行了研究,得到了 不同场景下的HDT系统变比与直接式AC/AC变换 器占空比的关系;最后搭建1kW的实验平台,从电 压幅值、电压相角与电压幅值+相角这3种调控模式 对HDT系统的运行可行性进行验证分析,验证了理 论分析的正确性。

附录见本刊网络版(http://www.epae.cn)。

#### 参考文献:

- [1] HOCK R T, DE NOVAES Y R, BATSCHAUER A L. A voltage regulator for power quality improvement in low-voltage distribution grids[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2018, 33(3): 2050-2060.
- [2] 叶琳浩,刘泽槐,张勇军,等. 智能用电技术背景下的配电网运 行规划研究综述[J]. 电力自动化设备,2018,38(5):154-163. YE Linhao, LIU Zehuai, ZHANG Yongjun, et al. Review on operation and planning of distribution network in background

of smart power utilization technology[J]. Electric Power Automation Equipment, 2018, 38(5): 154-163.

- [3] 王守相,葛磊蛟,王凯.智能配电系统的内涵及其关键技术
   [J]. 电力自动化设备,2016,36(6):1-6.
   WANG Shouxiang,GE Leijiao,WANG Kai. Main contents and key technologies of smart distribution system[J]. Electric Power Automation Equipment,2016,36(6):1-6.
- [4] MAHELA O P, SHAIK A G, GUPTA N. A critical review of detection and classification of power quality events [J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2015, 41:495-505.
- [5] AELOIZA E C, ENJETI P N, MORAN L A, et al. Analysis and design of a new voltage sag compensator for critical loads in electrical power distribution systems [J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2003, 39(4):1143-1150.
- [6] BRUMSICKLE W E, SCHNEIDER R S, LUCKJIFF G A, et al. Dynamic sag correctors:cost-effective industrial power line conditioning[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2001, 37(1):212-217.
- [7] JOTHIBASU S, MISHRA M K. An improved direct AC-AC converter for voltage sag mitigation [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2015, 62(1):21-29.
- [8] KIM S, KIM H G, CHA H. Dynamic voltage restorer using switching cell structured multilevel AC-AC converter[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2017, 32(11):8406-8418.
- [9] 李国强,刘光晔,侯龙宇,等.多OLTC协调动作对电压稳定影响的定量评估方法[J].电力自动化设备,2019,39(7):154-160.
   LI Guoqiang, LIU Guangye, HOU Longyu, et al. Quantitative evaluation method of voltage stability affected by multi-OLTC coordination[J]. Electric Power Automation Equipment, 2019, 39(7):154-160.
- [10] 张江林,庄慧敏,刘俊勇,等.分布式储能系统参与调压的主动 配电网两段式电压协调控制策略[J].电力自动化设备,2019, 39(5):22-28,36.
  ZHANG Jianglin,ZHUANG Huimin,LIU Junyong, et al. Twostage coordinated voltage control scheme of active distribution network with voltage support of distributed energy storage system[J]. Electric Power Automation Equipment, 2019, 39(5):22-28,36.
- [11] KANIEWSKI J. Three-phase power flow controller based on bipolar AC / AC converter with matrix choppers [C] //International Symposium on Power Electronics, Electrical Drives, Automation and Motion(SPEEDAM). Amalfi, Italy: IEEE, 2018: 709-715.
- [12] TARGOSZ R, MANSON J. Cost of poor power quality [M] // Handbook of Power Quality. Chichester, UK: John Wiley & Sons, Ltd.: 545-592.
- [13] KANIEWSKI J. Hybrid distribution transformer based on a bipolar direct AC / AC converter[J]. IET Electric Power Applications, 2018, 12(7):1034-1039.
- [14] HARADA K, ANAN F, YAMASAKI K, et al. Intelligent transformer[C]//Power Electronics Specialists Conference. Baveno, Italy:IEEE, 1996:1337-1341.
- [15] AELOIZA E C, ENJETI P N, MORAN L A, et al. Next generation distribution transformer: To address power quality for critical loads[C] //IEEE Power Electronics Specialist Conference. Acapulco, Mexico; IEEE, 2003:1266-1271.
- [16] DIVAN D, KANDULA P. Distributed power electronics: an enabler for the future grid[J]. CPSS Transactions on Power Electronics & Applications, 2016, 1(1):57-65.
- BALA S,DAS D,AELOIZA E, et al. Hybrid distribution transformer: Concept development and field demonstration [C] // 2012 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition

(ECCE). Raleigh, NC, USA: IEEE, 2012: 4061-4068.

- [18] QUEVEDO J O, GIACOMINI J C, BELTRAME R C, et al. Smart distribution transformer applied to smart grids [C] // 2013 Brazilian Power Electronics Conference. Gramado, Brazil: IEEE, 2013: 1046-1053.
- [19] SHE X,HUANG A Q,BURGOS R. Review of solid-state transformer technologies and their application in power distribution systems[J]. IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics, 2013, 1(3):186-198.
- [20] SZCZEŚNIAK P, KANIEWSKI J. Hybrid transformer with matrix converter[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2016,31(3):1388-1396.
- [21] PINTO S F,ALCARIA P,MONTEIRO J,et al. Matrix converterbased active distribution transformer[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2016, 31(4):1493-1501.
- [22] PINTO S F, MENDES P V, FERNANDO S J. Modular matrix converter based solid state transformer for smart grids[J]. Electric Power Systems Research, 2016, 136:189-200.
- [23] 蔡国伟,王艺博,郭东波,等.适用于电压幅值双极性调控的直接式AC/AC变换器拓扑结构[J].电力自动化设备,2020,40

(7):83-88,95.

CAI Guowei, WANG Yibo, GUO Dongbo, et al. Topology structure of direct AC / AC converter adapted to voltage amplitude bipolar regulation [J]. Electric Power Automation Equipment, 2020, 40(7): 83-88, 95.

#### 作者简介:



蔡国伟(1968—),男,吉林吉林人,教授,博士研究生导师,主要从事电力系统运行分析方面的教学与科研工作;

王艺博(1989—),男,山东济宁人,助教,博士研究生,通信作者,主要研究方向为 功率电子变换技术以及电力系统柔性调控 (**E-mail**:wangyibo@neepu.edu.cn);

蔡国伟 刘 闾(1985—),男,辽宁新民人,教授,博士研究生导师,主要研究方向为能源互联网柔性功率 变换以及电力系统稳定与控制。

(编辑 王欣竹)

# Direct AC / AC conversion based hybrid distribution transformer with two-phase supported regulation

CAI Guowei, WANG Yibo, LIU Chuang, ZHU Bingda, GUO Dongbo, ZHANG Hanwen

(Key Laboratory of Modern Power System Simulation and Control & Renewable Energy Technology,

Ministry of Education, Northeast Electric Power University, Jilin 132012, China)

Abstract: In view of the adverse effects of voltage sag/swell caused by uncertainties in distribution network on sensitive loads, a direct AC/AC conversion based HDT (Hybrid Distribution Transformer) with twophase supported regulation is proposed. The HDT is composed of direct AC/AC converters and traditional power frequency transformer. It can adjust the voltage amplitude and phase angle flexibly according to load demand. The direct AC/AC converter topology and its modulation strategy are illustrated and analyzed. On this basis, the structure of direct AC/AC conversion based HDT system is proposed. The working principle of the HDT system is analyzed in detail, and the voltage amplitude and phase angle control range of the HDT system are studied quantitatively. Finally, a 1 kW experimental principle prototype is built to verify the correctness and validity of the theoretical analysis of the proposed HDT system.

Key words: hybrid distribution transformer; traditional power frequency transformer; direct AC / AC converter; voltage amplitude control; voltage phase angle control

附录



# 表 A1 不同 TR 变比取值下的 HDT 电压调控能力 Table A1 Voltage regulation capacity of HDT with different TR ratio values

$n_{T2}/n_{T1}$	电压调控范围
1	$[0, 2], [-\pi/3, \pi/3]$
2	$[1/2, 3/2], [-\pi/3, \pi/3]$
3	$[2/3, 4/3], [-\pi/3, \pi/3]$
5	$[4/5, 6/5], [-\pi/3, \pi/3]$
10	[9/10, 11/10], [-π/3, π/3]



图 A3 实验装置 Fig.A3 Experimental device 表 A2 参数说明

Table A2 Parameters specification

参数	数值	参数	数值
额定功率/kW	1	电感 L/mH	0.3
变压器变比	2:1	电容 C1与 C2/µF	10
额定负载电压/V	55	输出电容 Co/µF	10
额定电源电压/V	110	开关频率/kHz	10
IGBT	IKW75N60T		



(e)电压幅值调控示意图图 A4 电压幅值调控实验结果Fig.A4 Experimental results of voltage amplitude control



Fig.A5 Experimental results of phase angle control