直接式AC/AC型混合配电变压器及其在配电环网潮流柔性调控中的应用

王艺博,张瀚文,蔡国伟,刘 闯,郭东波,朱炳达
(东北电力大学 电气工程学院,吉林 吉林 132012)

摘要:为满足未来配电网智能化的发展需求,实现配电环网潮流柔性调控,提出了一种能够满足城市配电环网潮流柔性调控的直接式AC/AC型混合配电变压器(AC/AC-HDT)。提出了AC/AC-HDT的拓扑结构并对其运行原理、优势进行分析与对比。基于此,结合现有配电环网的主要闭环方式,提出了含AC/AC-HDT的城市配电环网组网方案。基于配电环网潮流调控基本原理,给出了AC/AC-HDT在城市配电环网潮流调控中的策略流程。通过实验室AC/AC-HDT原理样机的搭建以及含AC/AC-HDT的双电源配电环网潮流调控效果的仿真分析,验证了所提直接式AC/AC-HDT拓扑的合理性以及其在配电环网潮流柔性调控中应用的可行性。

关键词:混合配电变压器;直接式AC/AC型变换器;配电环网;潮流调控
中图分类号:TM 41;TM 46 **文献标志码:**A DOI:10.16081/j.epae.202011028

0 引言

随着电力用户向多样化发展、分布式/储能并网运行以及配电网规模的不断扩大,现代城市配电网在规划、运行与管理等方面较之以往均已具有显著差异且面临着众多挑战[1-2]。针对目前已出现的问题与不足,研究人员提出了各种不同的解决措施与应对手段。在配电网网架结构方面,传统配电网所遵循的"闭环设计,开环运行"原则已难以满足未来配电网发展需求,配电网网架结构由开环辐射运行状态向网状闭环运行状态过渡转变是其未来发展过程中的必由之路[3]。目前,随着城市配电环网闭环运行所存在的循环功率过大导致的设备负载分布不均、分布式电源并网运行所导致的双向潮流以及配电网运行管理灵活性需求等问题的出现,具有调节次数、调节连续性、调节时限等约束限制[4]的传统配电环网潮流调控手段难以实现城市配电环网潮流精细化与实时化调控需求。

随着现代电力电子技术与先进控制理论的发展,大容量电力电子变换设备已经具备了能量双向流动、变换、调控与管理能力[5]。电力电子技术已广泛应用于现代电力系统中,给电力系统带来了深刻的变革。统一潮流控制器(UPFC)作为第三代灵活交流输电系统(FACTS)设备的典型代表,凭借其潮流控制能力,在输电系统中得到了成功应用[6]。然而,在城市中压配电网中,UPFC的应用仍需突破其经济性瓶颈[7]。近年来,将传统电气一次设备与电力电子技术相结合、充分挖掘现有设备综合利用率、降低电力系统设备成本等问题已被国内外众多学者所关注。在众多的技术方案中,将装设于城市中压配电网中的传统工频变压器TR(power frequency TRansformor)与电力电子变换器相结合构成混合配电变压器HDT(Hybrid Distribution Transformer)是一种有效的技术方案。该技术方案不仅能够有效利用TR的安全性优势,同时又可以发挥电力电子变换器所具有的灵活性特点,实现了两者的优势互补[8]。相较于目前发展较为成熟的电力电子变压器(PET),HDT无需由电力电子单元承担全部负荷功率,所选用的电力电子器件功率等级与成本等得到有效降低,同时,PET的模块化结构又增加了系统运行成本[9]。另一方面,当电力电子单元发生故障或处于检修状态时,PET需全部退出运行,负荷供电可靠性受到影响,而HDT仍可由TR为负荷提供电能,即HDT满足故障后运行的相关要求,具有较高的供电可靠性[10-11]。

目前,依据HDT拓扑结构中是否含有储能设备可以将HDT划分为两大类[12]:一类为含有储能设备(如电容与蓄电池等)的HDT,该拓扑结构中由于储能装置的存在,HDT较为笨重且价格高昂,同时其调控能力受限于储能装置的容量[13];另一类为不含储能设备的HDT,此类HDT又可进一步划分为AC/DC/AC型HDT与直接式AC/AC型HDT(AC/AC-HDT)这2种。由于AC/DC/AC型HDT增设了一级DC/AC变换器,整个系统存在多级功率变换而具有较高的功率损耗比例[10,14]。AC/AC-HDT与上述几种方案相比,其拓扑结构中不存在直流环节,因而无需装设电容器或储能设备,装置体积、重

收稿日期:2020-05-15;**修回日期:**2020-09-25
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)

量以及成本得到有效降低；同时由于装置仅含有一次能量变换设备，相较于AC／DC／AC型HDT具有更高的运行效率。文献[10,14-17]提出了一种基于矩阵变换器的AC／AC-HDT，相较于PET，AC／AC-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AC／AC-HDT的拓扑与控制系统设计仍较为复杂，如文献[15]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。

为了有效解决城市配电环网运行过程中循环功率过大以及分布式电源并网导致的双向潮流等问题，同时为了实现城市配电环网潮流柔性调控，本文提出了一种AC／AC-HDT。该AC／AC-HDT由直接式AC／AC变换器模块与TR组合而成，在对其拓扑结构与运行原理进行分析的基础上，给出了不同闭环场景下AC／AC-HDT的组网方案；针对不同组网方案，基于配电环网潮流调控基本原理，提出了含AC／AC-HDT的城市配电环网潮流柔性调控策略流程；分别搭建了实验与仿真平台系统，对本文所提拓扑和原理的正确性与有效性进行了验证分析。

1 AC／AC-HDT的拓扑结构与运行原理

1.1 拓扑结构

本文所提出的AC／AC-HDT拓扑结构如附录图A1所示。由图A1可知，AC／AC-HDT由TR、直接式AC／AC变换器模块（A-AC／AC、B-AC／AC、C-AC／AC）及其对应的控制系统构成。TR的一次侧含有W_A、W_B、W_C 3个绕组；二次侧由主绕组（W_{a1}、W_{b1}、W_{c1}）与辅助绕组（W_{a2}、W_{b2}、W_{c2}）2个部分构成。直接式AC／AC变换器模块均由2个直接式AC／AC变换器单元组成，鉴于文献[18]所提出的直接式AC／AC变换器具有双极性、共地且无换流问题等优势，所提出的AC／AC-HDT拓扑结构中的直接式AC／AC变换器选用该种结构。直接式A-AC／AC变换器模块见附录图A2。由图A1、A2可知，每相中2个直接式AC／AC变换器的输入侧分别与TR另外两相的二次侧辅助绕组相连，即工作于每相的直接式AC／AC变换器模块由另外两相提供电压支撑。另一方面，TR的二次侧主绕组与直接式AC／AC变换器模块构成串联系统，AC／AC-HDT输出侧电压（$\boldsymbol{v}_{sa}$、$\boldsymbol{v}_{sb}$、$\boldsymbol{v}_{sc}$）由TR二次侧主绕组电压（$\boldsymbol{v}_{TRa}$、$\boldsymbol{v}_{TRb}$、$\boldsymbol{v}_{TRc}$）与直接式AC／AC变换器模块输出电压（$\Delta\boldsymbol{v}_{bc}$、$\Delta\boldsymbol{v}_{ca}$、$\Delta\boldsymbol{v}_{ab}$）构成。综上分析，AC／AC-HDT可以实现系统一次侧输入电压（$\boldsymbol{v}_{Sa}$、$\boldsymbol{v}_{Sb}$、$\boldsymbol{v}_{Sc}$）向二次侧输出电压（$\boldsymbol{v}_{sa}$、$\boldsymbol{v}_{sb}$、$\boldsymbol{v}_{sc}$）的变换。

为了提高系统可靠性，在直接式AC／AC变换器模块输入和输出端口分别装设旁路开关S_{bp1}、S_{bp2}、S_{bp3}和$S_{bp\text{-}a}$、$S_{bp\text{-}b}$、$S_{bp\text{-}c}$。在正常工作状态，旁路开关S_{bp1}、S_{bp2}、S_{bp3}处于闭合状态，$S_{bp\text{-}a}$、$S_{bp\text{-}b}$、$S_{bp\text{-}c}$处于断开状态，此时直接式AC／AC变换器模块投入运行，可以实现对AC／AC-HDT输出电压的柔性调控；在检修／故障状态，旁路开关S_{bp1}、S_{bp2}、S_{bp3}处于断开状态，$S_{bp\text{-}a}$、$S_{bp\text{-}b}$、$S_{bp\text{-}c}$处于闭合状态，此时直接式AC／AC变换器模块被旁路而退出运行，AC／AC-HDT由柔性运行状态转变为TR运行状态，输出电压为TR二次侧主绕组输出电压，即AC／AC-HDT具备故障或检修状态运行能力。

1.2 运行原理

由AC／AC-HDT的拓扑结构可知，AC／AC-HDT的二次侧输出电压（$\boldsymbol{v}_{sa}$、$\boldsymbol{v}_{sb}$、$\boldsymbol{v}_{sc}$）等于TR二次侧主绕组电压（$\boldsymbol{v}_{TRa}$、$\boldsymbol{v}_{TRb}$、$\boldsymbol{v}_{TRc}$）与直接式AC／AC变换器模块输出侧电压（$\Delta\boldsymbol{v}_{bc}$、$\Delta\boldsymbol{v}_{ca}$、$\Delta\boldsymbol{v}_{ab}$）之和，即：

$$\begin{cases}\boldsymbol{v}_{sa}=\boldsymbol{v}_{TRa}+\Delta\boldsymbol{v}_{bc}\\ \boldsymbol{v}_{sb}=\boldsymbol{v}_{TRb}+\Delta\boldsymbol{v}_{ca}\\ \boldsymbol{v}_{sc}=\boldsymbol{v}_{TRc}+\Delta\boldsymbol{v}_{ab}\end{cases}\tag{1}$$

TR二次侧主绕组电压$\boldsymbol{v}_{TRa}$、$\boldsymbol{v}_{TRb}$、$\boldsymbol{v}_{TRc}$取决于TR的一次侧绕组与二次侧主绕组匝数比（$n_{Ta1}=n_{Tb1}=n_{Tc1}=n_{T1}$）。直接式AC／AC变换器模块输出侧电压$\Delta\boldsymbol{v}_{bc}$、$\Delta\boldsymbol{v}_{ca}$、$\Delta\boldsymbol{v}_{ab}$取决于TR的一次侧绕组与二次侧辅助绕组匝数比（$n_{Ta2}=n_{Tb2}=n_{Tc2}=n_{T2}$）以及变换器的占空比$D$，即AC／AC-HDT满足如下电压关系：

$$\begin{cases}\boldsymbol{v}_{Sa}=n_{Ta1}\boldsymbol{v}_{TRa}\\ \boldsymbol{v}_{Sb}=n_{Tb1}\boldsymbol{v}_{TRb}\\ \boldsymbol{v}_{Sc}=n_{Tc1}\boldsymbol{v}_{TRc}\end{cases}\tag{2}$$

$$\begin{cases}\Delta\boldsymbol{v}_{bc}=D_{A1}\boldsymbol{v}_{Cb}+D_{A2}\boldsymbol{v}_{Cc}\\ \Delta\boldsymbol{v}_{ca}=D_{B1}\boldsymbol{v}_{Cc}+D_{B2}\boldsymbol{v}_{Ca}\\ \Delta\boldsymbol{v}_{ab}=D_{C1}\boldsymbol{v}_{Ca}+D_{C2}\boldsymbol{v}_{Cb}\end{cases}\tag{3}$$

其中，$\boldsymbol{v}_{Ca}$、$\boldsymbol{v}_{Cb}$、$\boldsymbol{v}_{Cc}$为TR二次侧辅助绕组电压，其值由式(4)计算得到；D_{A1}和D_{A2}、D_{B1}和D_{B2}与D_{C1}和D_{C2}分别为A-AC／AC、B-AC／AC与C-AC／AC变换器模块的占空比。

$$\begin{cases}\boldsymbol{v}_{Ca}=\boldsymbol{v}_{Sa}/n_{Ta2}\\ \boldsymbol{v}_{Cb}=\boldsymbol{v}_{Sb}/n_{Tb2}\\ \boldsymbol{v}_{Cc}=\boldsymbol{v}_{Sc}/n_{Tc2}\end{cases}\tag{4}$$

综上分析，AC／AC-HDT系统二次侧输出电压与一次侧输入电压满足：

$$\begin{cases}N_{TA}=\boldsymbol{v}_{sa}/\boldsymbol{v}_{Sa}=\left(\boldsymbol{v}_{TRa}+\Delta\boldsymbol{v}_{bc}\right)/\boldsymbol{v}_{Sa}\\ N_{TB}=\boldsymbol{v}_{sb}/\boldsymbol{v}_{Sb}=\left(\boldsymbol{v}_{TRb}+\Delta\boldsymbol{v}_{ca}\right)/\boldsymbol{v}_{Sb}\\ N_{TC}=\boldsymbol{v}_{sc}/\boldsymbol{v}_{Sc}=\left(\boldsymbol{v}_{TRc}+\Delta\boldsymbol{v}_{ab}\right)/\boldsymbol{v}_{Sc}\end{cases}\tag{5}$$

其中，N_{TA}、N_{TB}、N_{TC}为AC／AC-HDT的柔性变比。AC／AC-HDT的一次侧电压可以表示为：

$$\begin{cases}\boldsymbol{v}_{Sa}=V_S\\ \boldsymbol{v}_{Sb}=V_S\mathrm{e}^{-\mathrm{j}\frac{2\pi}{3}}\\ \boldsymbol{v}_{Sc}=V_S\mathrm{e}^{\mathrm{j}\frac{2\pi}{3}}\end{cases}\tag{6}$$

其中，V_S为 AC／AC-HDT 系统一次侧电压幅值。

由此，将式(2)—(4)和式(6)代入式(5)可得：

$$\begin{cases} N_{TA} = 1/n_{T1} + \left(D_{A1}/n_{T2}\right)e^{-j\frac{2\pi}{3}} + \left(D_{A2}/n_{T2}\right)e^{j\frac{2\pi}{3}} \\ N_{TB} = 1/n_{T1} + \left(D_{B1}/n_{T2}\right)e^{j\frac{4\pi}{3}} + \left(D_{B2}/n_{T2}\right)e^{j\frac{2\pi}{3}} \\ N_{TC} = 1/n_{T1} + \left(D_{C1}/n_{T2}\right)e^{-j\frac{2\pi}{3}} + \left(D_{C2}/n_{T2}\right)e^{-j\frac{4\pi}{3}} \end{cases} \tag{7}$$

进而，可得：

$$\begin{cases} \boldsymbol{v}_{sa} = V_S\left[1/n_{T1} + \left(D_{A1}e^{-j\frac{2\pi}{3}} + D_{A2}e^{j\frac{2\pi}{3}}\right)/n_{T2}\right] \\ \boldsymbol{v}_{sb} = V_S\left[e^{-j\frac{2\pi}{3}}/n_{T1} + \left(D_{B1}e^{j\frac{2\pi}{3}} + D_{B2}\right)/n_{T2}\right] \\ \boldsymbol{v}_{sc} = V_S\left[e^{-j\frac{2\pi}{3}}/n_{T1} + \left(D_{C1} + D_{C2}e^{-j\frac{2\pi}{3}}\right)/n_{T2}\right] \end{cases} \tag{8}$$

由式(8)可知，AC／AC-HDT 系统不仅具有调控输出电压幅值的能力，同时也具有输出电压相角调控能力。

1.3　HDT 优势对比分析

为了对所提 AC／AC-HDT 的优势进行较为清晰的认识，在此将其与 4 种方案下的 HDT 拓扑进行对比分析，各方案下 HDT 拓扑结构及其对比结果如附录图 A3 与表 1 所示。

表 1　不同方案下 HDT 拓扑性能的对比分析

Table 1　Comparison analysis of HDT topology characteristics under different schemes

HDT 拓扑	长时补偿能力	直流环节	功率变换	外部储能
方案 1	依靠外部储能	有	单级	有
方案 2	依靠外部储能	有	单级	有
方案 3	依靠外部储能	有	单级	有
方案 4	能	有	两级	无
AC／AC-HDT	能	无	单级	无

由图 A3 与表 1 可以看出，相较于方案 1—3，AC／AC-HDT 具有长时补偿能力、无直流环节且无需外部储能设备，从而使得其具有体积小、使用寿命较长且维护工作量较小等优势；与方案 4 相比，AC／AC-HDT 具有无直流环节、单级功率变换特点，使得具有运行效率高与运行调控简单等优势。

2　AC／AC-HDT 组网方案与潮流柔性调控

2.1　城市配电环网闭环方式

随着电力系统的快速发展，配电网规模、网架结构与运行方式均发生了较大变化，配电网的安全稳定运行和潮流控制灵活性需求均不断提高。配电环网相较辐射式配电网具有更高的可靠性与灵活性，适于对可靠性要求较高的敏感负荷设备供电。目前，配电环网闭环方式主要有 3 种，具体见附录图 A4。

图 A4(a)为同一变电站同一变压器母线出线的配电环网闭环方式，在该种配电环网闭环方式下，变压器或母线出现故障会导致环网负荷全部失电，其供电可靠性是 3 种闭环方式中最低的；图 A4(b)为同一变电站不同变压器母线出线的配电环网闭环方式，此种闭环方式避免了单一变压器或母线故障所导致的环网负荷全部失电风险，但是此种配电环网闭环的前提条件为出线变电站具有至少 2 台变压器；图 A4(c)为不同变电站不同变压器母线出线的配电环网闭环方式，此种闭环方式实现了不同变电站的电气互联，能够进行站间、不同供电分区间的能量交互与动态支撑，然而，此种闭环方式的前提是在相邻区域具有 2 座变电站，且考虑到中压线路供电半径问题，站间距离需相对较小。

2.2　含 AC／AC-HDT 的配电环网组网方案

针对配电网现有网架结构形态与发展趋势，同时考虑 AC／AC-HDT 系统的调控性能以及图 A4 的配电环网闭环方式可知：目前已基本完成大规模配电网建设与改造，在此前提下宜基于现有配电网结构过渡至含 AC／AC-HDT 系统的配电网组网形态。由此可确定出从现有配电网闭环方式向含 AC／AC-HDT 配电网柔性闭环方式的过渡方案。在现有配电环网闭环方式下，提出含 AC／AC-HDT 系统的组网方案，具体如附录图 A5 所示。

在同一变电站同一变压器母线出线的配电环网闭环方式下，考虑到该种闭环方式仅含 1 个电源点，由此构建 AC／AC-HDT 单电源点组网模式，即通过对变电站单一主变进行升级改造，实现配电环网的柔性升级，具体组网方式如图 A5(a)所示。针对同一变电站不同变压器母线出线的配电环网闭环方式与不同变电站不同变压器母线出线的配电环网闭环方式，以“远近衔接、合理过渡、适度超前”为原则，充分考虑变电站内主变压器与母线数量以及 AC／AC-HDT 系统的调控性能与改造目的，在配电环网内提出单环网单一变压器升级改造近期方案与单环网双变压器升级改造远景方案，具体组网方式如图 A5(b)、(c)所示。需要指出，随着未来城镇化进程的不断推进，为满足其发展需求，配电网网架结构将呈现更加复杂的“蜂巢状”结构[3]，由此，含 AC／AC-HDT 系统的配电环网组网方式 1、2 均会向着供电可靠性与灵活性更高的组网方式 3 过渡转变。

2.3　基于 AC／AC-HDT 的配电环网潮流柔性调控

相比网络拓扑结构简单、相对固定的输电网，配电网具有复杂易变的网络架构，同时其线路电阻、电抗之比较大，无法忽略，两者在潮流调控机理上具有较大区别。因此直接将输电网潮流调控理论应用到配电网并不适宜。为了简化分析，在此将上文阐述的不同闭环方式下的配电环网进行简化处理，并将环网中的负荷支路进行等值简化，得到的配电环网

等效电路如图1所示。图中，$\boldsymbol{v}_{S1}$、$\boldsymbol{v}_{S2}$为配电环网中电源点的电压；$\boldsymbol{i}_{S1}$、$\boldsymbol{i}_{S2}$为配电环网中电源点流向等值负荷的电流；$\Delta\boldsymbol{v}$为所装设的AC／AC-HDT提供的补偿调控电压；$\boldsymbol{v}_{S3}$为装设AC／AC-HDT后的等效电源点1的电压；$\boldsymbol{v}_{L1}$、…、$\boldsymbol{v}_{Ln-1}$、$\boldsymbol{v}_{Ln}$为环网中等值负载的电压；$\boldsymbol{Z}_{L1}$、…、$\boldsymbol{Z}_{Ln}$、$\boldsymbol{Z}_{Ln+1}$为环路内不同电力线路的阻抗值；$P_{S1}+jQ_{S1}$、$P_{S2}+jQ_{S2}$分别为电源点1和电源点2的功率；$P_{L1}+jQ_{L1}$、…、$P_{Ln-1}+jQ_{Ln-1}$、$P_{Ln}+jQ_{Ln}$为等值负荷的功率。

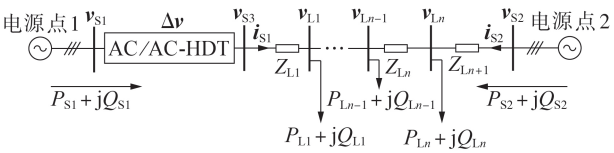


图1 含AC／AC-HDT的配电环网等效电路

Fig.1 Equivalent circuit of distribution loop network with AC／AC-HDT

在对配电环网柔性改造前，电源点1、2向负荷所提供的功率，即改造前的功率分布为：

$$S_{S1}=\frac{\sum_{i=1}^{n}\left(S_i\sum_{j=i+1}^{n+1}Z_{Lj}^*\right)}{Z_\Sigma^*}+\frac{\boldsymbol{v}_N\left(\boldsymbol{v}_{S1}^*-\boldsymbol{v}_{S2}^*\right)}{Z_\Sigma^*} \tag{9}$$

$$S_{S2}=\frac{\sum_{i=1}^{n}\left(S_i\sum_{j=1}^{i}Z_{Lj}^*\right)}{Z_\Sigma^*}-\frac{\boldsymbol{v}_N\left(\boldsymbol{v}_{S1}^*-\boldsymbol{v}_{S2}^*\right)}{Z_\Sigma^*} \tag{10}$$

其中，S_{S1}、S_{S2}分别为配电环网电源点1、2的功率；Z_Σ^*为电力线路总阻抗的共轭；$\boldsymbol{v}_N$为网络额定电压。

由式(9)与式(10)可知，配电环网中的电源点功率由2个部分构成，即取决于各个分支负荷与线路阻抗的功率部分以及取决于电源点电压差与线路阻抗的循环功率部分。配电环网中的分支负荷取决于负载本身，网架线路阻抗可视为恒定，由此可知，通过调控配电环网中电源点的电压即可实现网络潮流的柔性调控。

由上文对AC／AC-HDT的运行特性的分析可知，当对配电环网电源点1进行柔性改造后，电源点1与电源点2向负荷所提供的功率，即改造后的功率分布为：

$$S_{S1}=\frac{\sum_{i=1}^{n}\left(S_i\sum_{j=i+1}^{n+1}Z_{Lj}^*\right)}{Z_\Sigma^*}+\frac{\boldsymbol{v}_N\left(\boldsymbol{v}_{S1}^*+\Delta\boldsymbol{v}^*-\boldsymbol{v}_{S2}^*\right)}{Z_\Sigma^*} \tag{11}$$

$$S_{S2}=\frac{\sum_{i=1}^{n}\left(S_i\sum_{j=1}^{i}Z_{Lj}^*\right)}{Z_\Sigma^*}-\frac{\boldsymbol{v}_N\left(\boldsymbol{v}_{S1}^*+\Delta\boldsymbol{v}^*-\boldsymbol{v}_{S2}^*\right)}{Z_\Sigma^*} \tag{12}$$

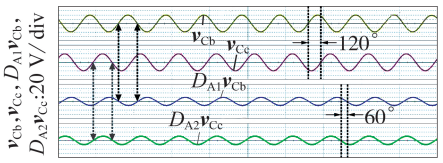
由此可知，基于AC／AC-HDT系统的电压调控能力能够实现改变配电环网中潮流分布的目的。通常在城市中压配电网中，潮流的调控关注点主要集中在有功功率，而无功功率则依据配电网中的无功功率调控装置实现就地平衡为主。当配电环网中装设AC／AC-HDT后，相当于塑造了一个电压幅值与相角均可柔性调控的电源点，使得电流在环网中的分配更合理。鉴于线路长度已知，线路阻抗值可视为已知量；同时，网络额定电压$\boldsymbol{v}_N$及不同电源点电压$\boldsymbol{v}_{S1}$、$\boldsymbol{v}_{S2}$可直接测量。因此，通过对AC／AC-HDT系统的调控补偿电压$\Delta\boldsymbol{v}$适当调节便可实现配电环网潮流的柔性调控。当设定$\boldsymbol{S}_{S1}$与$\boldsymbol{S}_{S2}$的目标值$\boldsymbol{S}_{S1ref}$与$\boldsymbol{S}_{S2ref}$后，电源点潮流调控量的期望值$\Delta\boldsymbol{S}_{ref}$亦确定，则AC／AC-HDT系统的补偿调控电压就有了目标值$\Delta\boldsymbol{v}_{ref}$；然后基于AC／AC-HDT系统的工作原理即可实现电压的柔性调控。由此得到含AC／AC-HDT系统的城市配电环网潮流调控策略流程具体如附录图A6所示。

3 实验与仿真分析

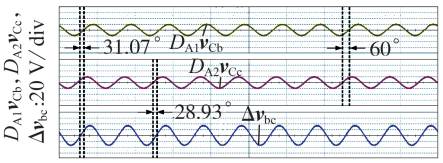
3.1 AC／AC-HDT系统性能实验验证

为了对AC／AC-HDT系统的有效性以及其运行性能进行验证分析，在实验室搭建了1 kW的实验平台系统。平台所选用的功率器件为英飞凌公司型号为IKW75N60T的IGBT，确定其开关频率为10 kHz；AC／AC变换器模块输出LC滤波器的电容与电感型号分别为C4ATMBW5100A3NJ与CTX01-19330-R-ND，电容与电感值分别为10 μF与0.3 mH；直接式AC／AC变换器单元中的电容C_1与C_2电容值均选取为10 μF；TR、印刷电路板(PCB)与散热器均为实验室定制，TR一次侧绕组与二次侧主绕组匝数比$n_{Ta1}=n_{Tb1}=n_{Tc1}=n_{T1}=2$；TR一次侧绕组与二次侧辅助绕组匝数比$n_{Ta2}=n_{Tb2}=n_{Tc2}=n_{T2}=4$；设AC／AC-HDT的一次侧额定输入电压为110 V，二次侧主绕组与辅助绕组输出额定电压分别为55 V与22.5 V；同时，限于实验室对AC／AC-HDT输入侧的电压调控为手动自耦调压器条件且为了便于实验，在此以单相AC／AC-HDT为例对其性能进行开环静态实验，所得到的实验结果如图2所示。

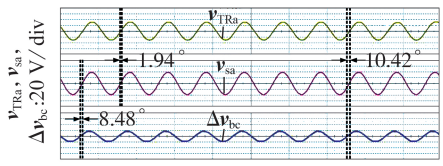
图2(a)为AC／AC-HDT系统A相中TR的B、C相辅助绕组电压$\boldsymbol{v}_{Cb}$、$\boldsymbol{v}_{Cc}$与其对应的调控电压$D_{A1}\boldsymbol{v}_{Cb}$、$D_{A2}\boldsymbol{v}_{Cc}$的实验波形图。由图可以看出，B相辅助绕组电压有效值为27.56 V与其对应的调控电压$D_{A1}\boldsymbol{v}_{Cb}$有效值为13.31 V，相位差为180°，即两者为反向；C相辅助绕组电压有效值为27.76 V，与其对应的调控电压$D_{A2}\boldsymbol{v}_{Cc}$有效值为13.81 V，相位差为0°；B、C相辅助绕组电压的相位差为120°，B、C相所对应的调控电压相位差为60°。图2(b)为B、C相调控电压$D_{A1}\boldsymbol{v}_{Cb}$、$D_{A2}\boldsymbol{v}_{Cc}$及其合成电压$\Delta\boldsymbol{v}_{bc}$的实验波形图。经测量可知，合成电压$\Delta\boldsymbol{v}_{bc}$的有效值为23.6 V。由图可知，B相与C相调控电压与其合成电压的相位差分别为31.07°与28.93°。图2(c)为A相主绕组电压$\boldsymbol{v}_{TRa}$、AC／



（a）v_{Cb}、v_{Cc}、$D_{A1}v_{Cb}$ 与 $D_{A2}v_{Cc}$ 的实验结果



（b）$D_{A1}v_{Cb}$、$D_{A2}v_{Cc}$ 与 Δv_{bc} 的实验结果



（c）v_{TRa}、v_{sa} 与 Δv_{bc} 的实验结果

图 2　AC / AC-HDT 实验结果

Fig.2　Experimental results of AC / AC-HDT

AC-HDT 的输出电压 v_{sa} 与 B、C 相调控电压的合成电压 Δv_{bc} 的实验波形图。由图可知，A 相主绕组电压 v_{TRa}、合成电压 Δv_{bc} 与 AC / AC-HDT 的输出电压相位差分别为 1.94°、8.48°，A 相主绕组电压 v_{TRa} 与合成电压 Δv_{bc} 的相位差为 10.42°。AC / AC-HDT 输出电压相位与幅值的调控均由直接式 AC / AC 变换器模块实现，即由于直接式 AC / AC 变换器模块的存在，使得 AC / AC-HDT 的输出电压 v_{sa} 幅值与相位均得以调控，即 AC / AC-HDT 具有电压幅值与相位调控能力。

3.2　基于 AC / AC-HDT 的配电环网潮流调控仿真分析

以 2 个配电网分区（供电分区 A 与供电分区 B）互联为例，搭建 PSIM 仿真平台，对 2 个供电分区某一联络线潮流在不同调控场景（场景 Ⅰ 为有功功率调控，场景 Ⅱ 为无功功率调控，场景 Ⅲ 为有功功率与无功功率同时调控）下的仿真结果进行分析，具体仿真结果分别如图 3—5 所示。

3.2.1　场景 Ⅰ：有功功率调控

在该场景下，利用 AC / AC-HDT 系统仅对联络线有功功率进行调控，具体仿真结果如图 3 与附录图 A7 所示。

图 3 分别为联络线有功功率 P、无功功率 Q，联络线三相电流 I_a、I_b、I_c 以及联络线两端电压 V_{La}、V_{Lb}、V_{Lc} 与 V_{Ta}、V_{Tb}、V_{Tc} 仿真结果，P、Q 均为标幺值，后同。由图 3 可知，在［0，0.05］s 内，供电分区 A 通过联络线向供电分区 B 提供有功、无功功率额度均为 1 p.u.；在（0.05，0.1］s 内，供电分区 B 有功负荷增加，此时

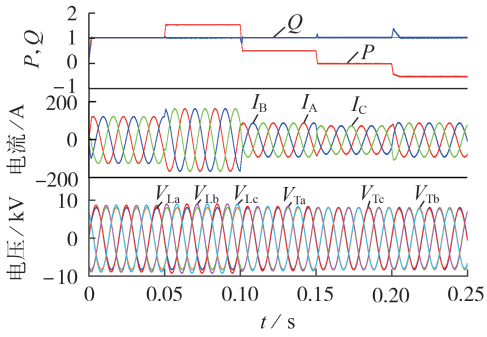


图 3　联络线有功功率调控仿真结果

Fig.3　Simulative results of tie line active power regulation

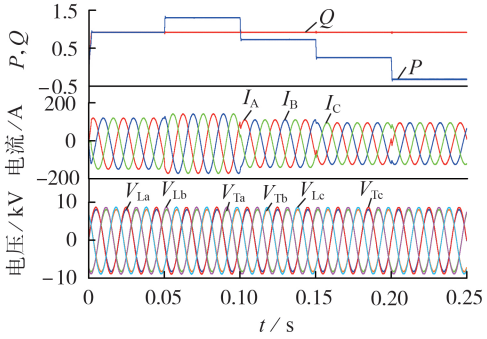


图 4　联络线无功功率调控仿真结果

Fig.4　Simulative results of tie line reactive power regulation

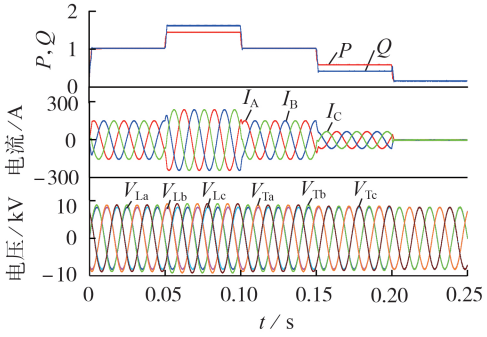


图 5　联络线有功功率与无功功率同时调控仿真结果

Fig.5　Simulative results of tie line active power and reactive power regulation simultaneously

恰逢供电分区 A 分布式电源功率大发，为了有效均衡负载率并尽可能消纳分布式能源，需从供电分区 A 专供 0.5 p.u. 的有功功率，此时联络线有功功率发生阶跃，阶跃至 1.5 p.u.，而无功功率维持 1 p.u. 不变；在（0.1，0.15］s 内，供电分区 B 负荷发生骤降且供电分区 A 分布式电源出力减小，此时联络线有功功率降至 0.5 p.u.，无功功率仍维持 1 p.u. 不变；随着供电分区 A 分布式电源出力的持续降低，在（0.15，0.2］s 内，供电分区 A 已无法为供电分区 B 提供有功功率，即此时联络线有功功率降至 0，而无功功率仍维持 1 p.u. 不变；在（0.2，0.25］s 内，供电分区 A 负荷发生骤升且该区分布式电源出力不足，此时供电分

区B有功功率充裕，因此需供电分区B通过联络线向供电分区A提供0.5 p.u.的有功功率，即联络线有功功率与无功功率呈现反向传送状态。综上可见，AC／AC-HDT能够在不影响稳态无功潮流的前提下较好地实现联络线上有功功率潮流的柔性调控。

3.2.2 场景Ⅱ：无功功率调控

相比于场景Ⅰ的有功功率调控，在该场景下仅利用AC／AC-HDT系统实现联络线无功功率的调控，具体仿真结果如图4与附录图A8所示。

为了便于对比分析，在该场景下利用AC／AC-HDT对无功功率的调控趋势过程与场景Ⅰ相似。由图6可知，在[0，0.05] s、(0.05，0.1] s、(0.1，0.15] s、(0.15，0.2] s与(0.2，0.25] s内，联络线有功和无功潮流分别为1、1、1、1、1 p.u.和1、1.4、0.8、0.3、-0.3 p.u.，即在[0，0.25] s的仿真时间范围内，AC／AC-HDT仅实现了联络线无功功率的调控，有功功率维持1 p.u.不变。分析可知，AC／AC-HDT能够在不影响稳态有功潮流的前提下较好地实现联络线上无功功率潮流的柔性调控。

3.2.3 场景Ⅲ：有功功率与无功功率同时调控

场景Ⅰ与场景Ⅱ分别对有功功率与无功功率的调控效果进行了仿真分析，在此对AC／AC-HDT的有功功率与无功功率同时调控能力进行验证分析，仿真结果如图5与附录图A9所示。

由图5可知，在[0，0.05] s、(0.05，0.1] s、(0.1，0.15] s、(0.15，0.2] s与(0.2，0.25] s内，联络线的有功潮流和无功潮流分别为1、1.5、1、0.5、0 p.u.和1、1.7、1、0.3、0 p.u.，即在[0，0.25] s的仿真时间范围内，AC／AC-HDT实现了联络线有功功率与无功功率的同时调控。同时，由(0.2，0.25] s的仿真结果可以看出，在该时段内，联络线上传输的有功功率、无功功率与联络线三相电流均为0，联络线首末两端的电压相等，即此时供电分区A与供电分区B之间无电能交互。分析可知，AC／AC-HDT能够较好地实现联络线有功潮流与无功潮流的柔性调控。

综上分析可知，AC／AC-HDT能够实现不同场景下的联络线有功潮流与无功潮流柔性调控，具有较好的潮流调控能力。

4 结论

针对城市配电环网传统潮流调控手段所存在的不足，本文提出了一种能够实现城市配电环网潮流柔性调控的AC／AC-HDT。文中首先给出了AC／AC-HDT的拓扑结构，在此基础上，对AC／AC-HDT的电压幅值与相位调控原理进行了理论分析；其次，以现有城市配电环网闭环方式为依托，提出了不同闭环方式下含AC／AC-HDT的城市配电环网组网方案；然后，通过配电环网潮流调控原理的分析，提出了含AC／AC-HDT的城市配电环网潮流柔性调控策略流程；最后，搭建了单相AC／AC-HDT实验原理样机与含AC／AC-HDT的城市配电环网仿真平台，从实验原理样机验证与配电环网系统仿真验证2个角度对本文所提拓扑与理论分析的合理性与有效性进行了验证分析，并取得了较好的验证效果。

附录见本刊网络版(http://www.epae.cn)。

参考文献：

[1] 马钊，安婷，尚宇炜. 国内外配电前沿技术动态及发展[J]. 中国电机工程学报，2016，36(6)：1552-1567.
MA Zhao，AN Ting，SHANG Yuwei. State of the art and development trends of power distribution technologies[J]. Proceedings of the CSEE，2016，36(6)：1552-1567.

[2] 肖白，郭蓓. 配电网规划研究综述与展望[J]. 电力自动化设备，2018，38(12)：200-211.
XIAO Bai，GUO Bei. Review and prospect of distribution network planning[J]. Electric Power Automation Equipment，2018，38(12)：200-211.

[3] 江道灼，徐宁，江崇熙，等. 蜂巢状有源配电网构想、关键技术与展望[J]. 电力系统自动化，2019，43(17)：1-11.
JIANG Daozhuo，XU Ning，JIANG Chongxi，et al. Conception，key technology and prospect of honeycomb-shape active distribution network[J]. Automation of Electric Power Systems，2019，43(17)：1-11.

[4] 张春朋，戚庆茹，赵争鸣，等. 用于配电网柔性互联的晶闸管控制曲折变压器[J]. 电网技术，2017，41(10)：3244-3250.
ZHANG Chunpeng，QI Qingru，ZHAO Zhengming，et al. Thyristor-controlled zigzag transformer for flexible inter-link of distribution networks[J]. Power System Technology，2017，41(10)：3244-3250.

[5] 何湘宁，宗升，吴建德，等. 配电网电力电子装备的互联与网络化技术[J]. 中国电机工程学报，2014，34(29)：5162-5170.
HE Xiangning，ZONG Sheng，WU Jiande，et al. Technologies of power electronic equipment interconnecting and networking in distribution grids[J]. Proceedings of the CSEE，2014，34(29)：5162-5170.

[6] 祁万春，杨林，宋鹏程，等. 南京西环网UPFC示范工程系统级控制策略研究[J]. 电网技术，2016，40(1)：92-96.
QI Wanchun，YANG Lin，SONG Pengcheng，et al. UPFC system control strategy research in Nanjing Western Power Grid[J]. Power System Technology，2016，40(1)：92-96.

[7] 仉志华. 基于UPFC的自愈配电环网及其潮流优化控制技术的研究[D]. 济南：山东大学，2012.
ZHANG Zhihua. Research on the self-healing distribution network with normally closed-loop operation and it's power flow optimal control technology based on UPFC[D]. Jinnan：Shandong University，2012.

[8] KANIEWSKI J. Hybrid distribution transformer based on a bipolar direct AC／AC converter[J]. IET Electric Power Applications，2018，12(7)：1034-1039.

[9] 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.

[10] SZCZEŚNIAK P，KANIEWSKI J. Hybrid transformer with matrix converter[J]. IEEE Transactions on Power Delivery，2016，31(3)：1388-1396.

[11] 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.

YANG Bin, ZHAO Jianfeng, JI Zhendong, et al. Overview of hybrid transformer technologies[J]. Electric Power Automation Equipment, 2020, 40(2): 205-213.

[12] BALA S, DAS D, AELOIZA E, et al. Hybrid distribution transformer: concept development and field demonstration[C]//2012 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition. Raleigh, NC, USA: IEEE, 2012: 4061-4068.

[13] 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.

[14] KANIEWSKI J. Hybrid distribution transformer based on a bipolar direct AC / AC converter[J]. IET Electric Power Applications, 2018, 12(7): 1034-1039.

[15] 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.

[16] PINTO S F, ALCARIA P, MONTEIRO J, et al. Matrix converter-based active distribution transformer[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2016, 31(4): 1493-1501.

[17] KANIEWSKI J, FEDYCZAK Z, BENYSEK G. AC voltage sag / swell compensator based on three-phase hybrid transformer with Buck-Boost matrix-reactance chopper[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2014, 61(8): 3835-3846.

[18] 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:

王艺博

王艺博(1989—),男,山东济宁人,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);

张瀚文(1994—),男,吉林吉林人,硕士研究生,主要研究方向为功率电子变换技术;

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

(编辑　王欣竹)

Direct AC / AC based hybrid distribution transformer and its application in power flow flexible regulation of distribution loop network

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

(School of Electrical Engineering, Northeast Electric Power University, Jilin 132012, China)

Abstract: In order to meet the demand of intelligent development of distribution network in the future and realize the power flow flexible regulation of distribution loop network, a direct AC / AC-HDT(AC / AC based Hybrid Distribution Transformer) is proposed, which can meet the demand of flexible regulation of power flow in urban distribution loop network. The topological structure of HDT is proposed, its operation principle and advantages are analyzed and compared. On this basis, combined with the main closed-loop mode of existing distribution loop network, the network scheme of urban distribution loop network with AC / AC-HDT is proposed. Then, based on the basic principle of power flow regulation of distribution loop network, the strategy of power flow regulation of urban distribution loop network is given. Through the construction of the laboratory prototype and the simulation analysis of the power flow regulation in dual power distribution loop network with AC / AC-HDT, the rationality of the proposed direct AC / AC-HDT topology and the feasibility of its application in power flow flexible regulation of distribution loop network are verified.

Key words: hybrid distribution transformer; direct AC / AC converter; distribution loop network; power flow regulation

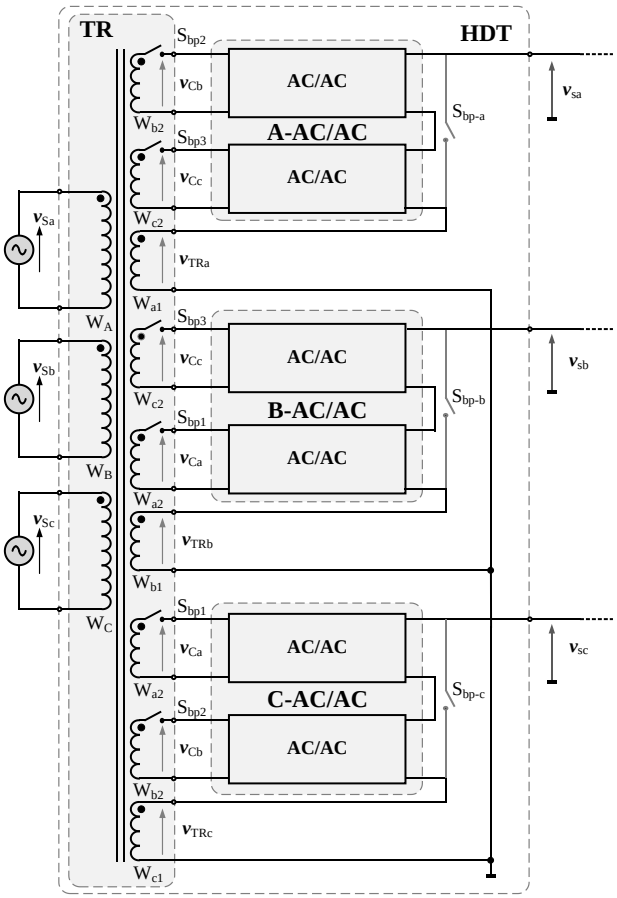


图 A1 AC/AC-HDT 的拓扑结构

Fig.A1 Topology structure of AC/AC-HDT

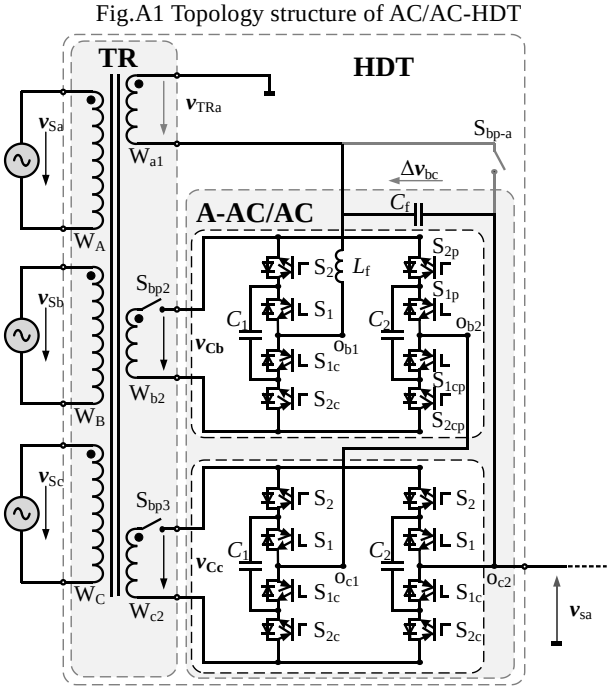


图 A2 直接式 A-AC/AC 变换器拓扑结构

Fig.A2 Topology structure of direct A-AC/AC converter

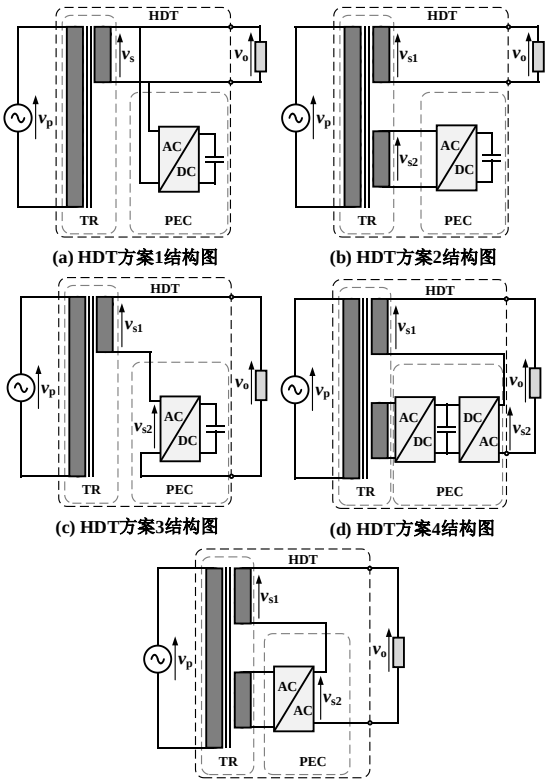


图 A3 HDT 原理图对比

Fig.A3 Schematic comparison of HDT

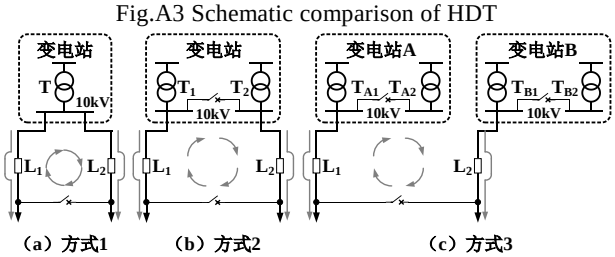


图 A4 配电环网闭环方式

Fig.A4 Closed-loop mode of distribution loop network

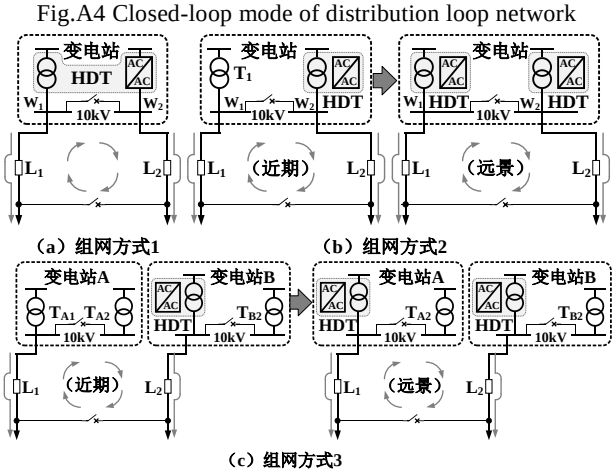


图 A5 含 AC/AC-HDT 系统的配电环网组网方案

Fig.A5 Distribution loop network scheme with AC/AC-HDT system

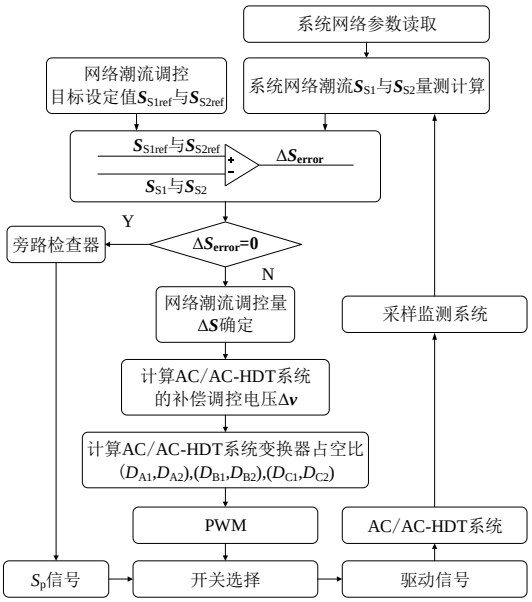


图 A6 含 HDT 系统的城市配电环网潮流调控策略流程

Fig.A6 Power flow control strategy of urban distribution loop network with HDT system

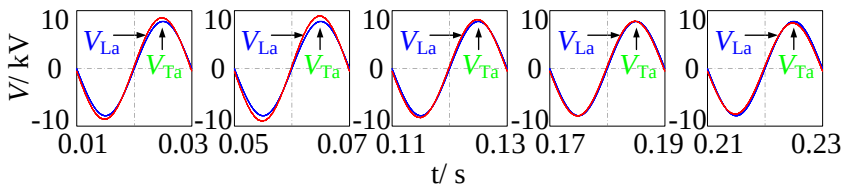


图 A7 场景Ⅰ中 V_{La} 与 V_{Ta} 波形放大图

Fig.A7 Zoomed view of V_{La} and V_{Ta} of scenario Ⅰ

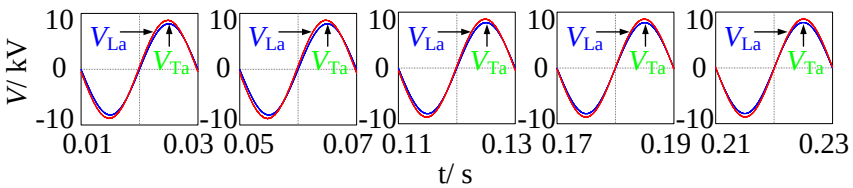


图 A8 场景Ⅱ中 V_{La} 与 V_{Ta} 波形放大图

Fig.A8 Zoomed view of V_{La} and V_{Ta} of scenario Ⅱ

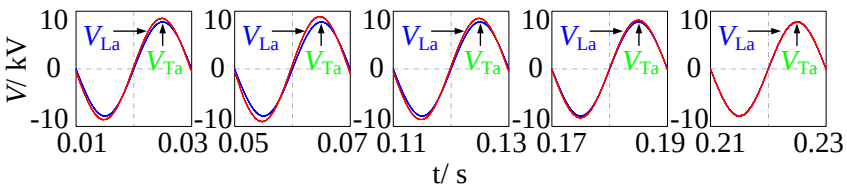


图 A9 场景Ⅲ中 V_{La} 与 V_{Ta} 波形放大图

Fig.A9 Zoomed view of V_{La} and V_{Ta} of scenario Ⅲ