

DOI:10.11784/tdxbz202505040

基于容量互济的柔性有载调压控制策略

孙龙飞^{1,2}, 尹靖元^{1,2}, 刘科研³, 李 昭³, 于建成⁴, 霍群海^{1,2}

- (1. 高密度电磁动力与系统全国重点实验室, 中国科学院电工研究所, 北京 100190;
2. 中国科学院大学电子电气与通信工程学院, 北京 100049; 3. 中国电力科学研究院配电研究所, 北京 100192;
4. 国网天津电力公司电力科学研究院, 天津 300384)

摘要: 随着电力系统中可再生能源与电动汽车等新型负载不断接入, 新型配电网中的电能质量问题愈加突出, 传统有载调压变压器中加入电力电子变换器可以构成柔性有载调压变压器, 可以将变压器原有的离散调压转变为连续调压, 然而为了改善电能质量问题, 现有柔性有载调压变压器中由于电压等级和功率流动路径限制, 电能质量治理能力有限. 为了解决以上问题, 本文提出了一种基于容量互济的柔性有载调压控制策略, 使得变换器输入侧与输出侧可以互相进行辅助补偿, 变换器输出侧可以通过控制电压相位辅助输入侧进行无功调节, 变换器输入侧可以通过控制输入电感电流提高输出侧的电压补偿能力上限, 同时在所提出装置的变换器直流侧接入储能, 增强了变换器两侧电路的补偿能力; 同时分析了分接开关动作对两种控制策略的影响, 之后分析了所提出装置在不同控制策略下的功率流动路径, 并提出了基于容量互济的多级分层控制策略以及变换器两侧电路的闭环控制策略; 最后, 通过仿真和试验结果得出以下结论: 柔性有载调压装置可以通过分接开关与变换器配合实现连续调压, 在柔性有载调压装置的变换器直流侧接入储能, 可以减弱变换器两侧电路之间的功率耦合关系, 并通过变换器两侧电路之间的容量互济控制, 提升柔性有载调压装置中变换器的补偿能力.

关键词: 柔性有载调压变压器; 容量互济; 分接开关; 功率流动路径; 分层多级控制

中图分类号: TM72 文献标志码: A 文章编号: 0493-2137(2026)06-0553-12

Control Strategy for Flexible On-Load Voltage Regulation Based on Capacity-Sharing

Sun Longfei^{1,2}, Yin Jingyuan^{1,2}, Liu Keyan³, Li Zhao³, Yu Jiancheng⁴, Huo Qunhai^{1,2}

- (1. State Key Laboratory of High Density Electromagnetic Power and Systems, Institute of Electrical Engineering, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China; 2. School of Electronic, Electrical and Communication Engineering, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China;
3. Distribution Research Institute, China Electric Power Research Institute, Beijing 100192, China;
4. Electric Power Science Research Institute of State Grid Tianjin Electric Power Company, Tianjin 300384, China)

Abstract: With the continuous integration of renewable energy sources and the increasing penetration of emerging loads such as electric vehicles in power systems, power quality issues in modern distribution grids are becoming increasingly prominent. Traditional on-load tap-changing (OLTC) transformers, when equipped with power electronic converters, can be upgraded to flexible on-load voltage regulating transformers that convert discrete voltage regulation into continuous voltage regulation. However, the power quality improvement capability of existing flexible OLTC transformers remains limited due to constraints imposed by voltage levels and power flow paths. To address these challenges, this study proposes a flexible on-load voltage regulation control strategy based on capacity sharing, enabling the converter's input and output sides to assist and compensate for each other. The converter's out-

收稿日期: 2025-05-30; 修回日期: 2025-08-30.

作者简介: 孙龙飞 (1998—), 男, 博士研究生, sunlongfei@mail.iee.ac.cn.

通信作者: 尹靖元, yinjingyuan@mail.iee.ac.cn.

基金项目: 智能电网重大专项(2030)项目(2024ZD0800800); 国家电网有限公司总部科技项目(SGTJDK00DWJS2400298).

Supported by the Smart Grid-National Science and Technology Major Project (No. 2024ZD0800800), the Science and Technology Project of SGCC (State Grid Corporation of China) (No. SGTJDK00DWJS2400298).

put side can assist the input side in reactive power adjustment by controlling the voltage phase, while the input side can enhance the upper limit of the voltage compensation capability of the output side by controlling the input inductor current. Simultaneously, an energy storage system is integrated into the converter's DC side to strengthen the compensation capabilities of both sides. The effects of tap-changer operations on the two control strategies are analyzed, and the power-flow paths of the proposed device under different control strategies are examined. Based on these findings, a multi-level hierarchical control strategy incorporating capacity sharing control, along with a dual-sided closed-loop control method, is developed. Simulation and experimental results demonstrate that integrating a tap changer with a power electronic converter enables continuous voltage regulation in flexible OLTC transformers. Incorporating an energy storage system to the DC side reduces power coupling between the two circuits of the converter. Moreover, through capacity sharing control between the converter's two sides, the compensation capability of the converter in the flexible on-load voltage regulation device is greatly enhanced.

Keywords: flexible on-load voltage regulating transformer (FOVRT); capacity sharing; tap changer; power flow path; hierarchical and multi-level control

随着可再生能源与电动汽车等非线性负荷接入比例逐渐增加^[1-2], 新型配电网的电能质量问题每年都会造成巨大的经济损失^[3-5], 例如电压的短时中断和骤升骤降, 对半导体工业、医疗行业和汽车制造等敏感负荷造成难以估量的损失. 作为配电网的核心设备, 电力变压器承担着电压等级转换、电气隔离和能量传输的关键作用^[6-8], 通过变压器的电力电子化可以使其具备部分电能质量治理的作用.

传统有载调压变压器通过调整分抽头切除或者接入分段绕组, 进而实现对电网电压的“阶梯式”调节, 但是只能实现离散的电压调节^[9], 在有载调压变压器中加入一个小容量的电力电子变换器构成柔性有载调压变压器 (flexible on-load voltage regulating transformer, FOVRT), 可以实现对电网电压波动的连续补偿^[10-13]. 相较于传统 STATCOM, 所提出 FOVRT 将电力电子变换器与传统有载调压变压器一体化设计, 减小了装置体积, 且电力电子变换器输入侧直接从变压器绕组中取能, 可以输出补偿电流实现功率因数提高等功能. 相较于 UPQC 装置, 所提出 FOVRT 的电力电子变换器只需要变压器功率的 5% ~ 10% 容量, 就可以实现相较于传统有载调压变压器离散调压的连续调压, 当发生故障时闭合旁路开关就可以将变换器旁路掉, 从而不影响变压器的整体运行.

基于单相背靠背电路的 FOVRT 除了可以补偿电网电压波动和三相不平衡电压外, 还可以通过变换器输入侧电路控制电感电流进行无功调节, 实现功率因数校正^[14]. 然而, 基于背靠背电路 FOVRT 的变换器输入侧电路, 一方面要考虑变换器输出侧的补偿电压控制, 电网电压上涨则变换器需要吸收功率, 电网电压下降则变换器电路需要发出功率, 这使得变换器输入侧功率流动方向主要取决于变换器输出侧; 另一

方面变换器的直流侧需要保持电压稳定, 这会始终占用变换器输入侧的一部分容量. 基于上述两方面原因, FOVRT 变换器输入侧只能实现小范围的无功功率调节, 且无功调节能力随着变换器输出侧对电网电压波动的情况而变化.

在基于背靠背变换器 FOVRT 的变换器直流侧接入储能, 可以增大变换器输入侧的无功调节能力, 同时增加 FOVRT 内部的功率流动路径, 增大变换器两侧电路的补偿能力^[15]. 与在 FOVRT 装置整体附近直接接入储能相比, 将储能接入 FOVRT 变换器的直流侧具备以下优势: 一是 FOVRT 中背靠背变换器直流侧接入储能, 相当于在 FOVRT 内部构成了一个小型的 UPQC 装置, 且可以与有载调压变压器进行一体化设计, 提升功率密度, 减少装置占用空间; 二是由于 FOVRT 中变换器两侧分别通过并联、串联与主变压器相连接, 故在直流侧接入储能后, 可以增大原有 FOVRT 的补偿能力^[16].

在固定容量下, 由于变换器电路的电压等级和输入功率限制, FOVRT 对变换器输入电流、输出电压的控制能力有限. 在 FOVRT 背靠背变换器电路的直流侧接入储能之后, 可以采用背靠背变换器两侧电路容量互济的控制策略提升补偿能力^[17].

FOVRT 容量互济控制策略包括两部分: 一是变换器输出侧辅助输入侧进行无功功率补偿; 二是变换器输入侧辅助输出侧进行电压补偿. 文献[18]提出一种考虑线路阻抗的背靠背变换器两侧协同调压方法, 通过变换器并联侧的功率控制实现协同电压补偿, 但是线路阻抗数值难以测量, 且会随实际环境与使用时间变化. 文献[19]通过将变换器串联侧幅维持为额定值, 通过调整补偿电压相位实现变换器串联侧无功补偿, 但是没有考虑有载调压变压器分接开关的影响.

本文基于单相背靠背变换器 FOVRT 提出了一种基于容量互济的控制策略,同时考虑了变换器两侧电路的互济方案,并分析了有载分接开关动作的影响,提出了 FOVRT 的分层多级控制策略,最后通过仿真和实验验证了所提出控制策略的有效性。

1 电路方案

1.1 柔性有载调压变压器拓扑

本文所提出的柔性有载调压变压器电路结构如图 1 所示。

图 1 中,FOVRT 由主变压器 T_m 、分接开关、电力电子变换器、储能部分和旁路开关组成。

主变压器 T_m 的一次侧由主绕组 N_m 、分段绕组 $N_{p1} \sim N_{pn}$ 和变换器取能绕组 N_t 组成, n 表示分段绕组的个数,变换器取能绕组与分段绕组使用同一磁芯,但无电气连接,二次侧绕组连接负载 R_L 。分接开关 $K_0 \sim K_n$ 连接于分段绕组引出的分抽头上,可以采用机械式、电力电子式和混合式分接开关,分接开关动作可以将分段绕组从一次侧切除或接入,进而实现变压器变比的改变。电力电子变换器采用背靠背电路结构,由输入并联侧与输出串联侧构成,并联侧采用 L_1 进行滤波,串联侧采用 L_2 、 C_2 进行滤波,中间直流侧电容为 C_{dc} 。变换器直流侧接入了储能,储能可以采用锂电池或超级电容器等储能元件。在变换器发生故障时,旁路开关 K_{ck} 动作可以将变换器从主电路中旁路掉,进而保证主变压器的稳定运行。

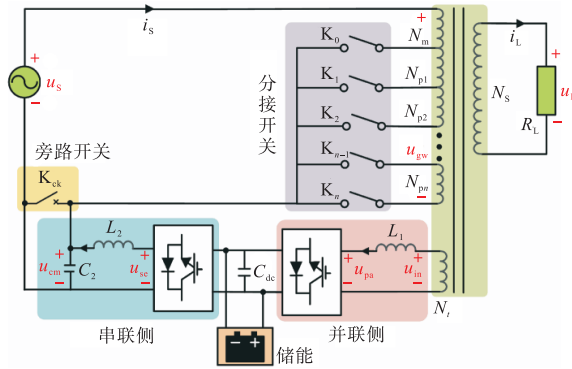


图 1 柔性有载调压变压器电路结构

Fig.1 Circuit structure of the flexible on-load voltage regulating transformer

u_S 、 u_L 分别为主变压器 T_m 的输入电压与二次侧电压, u_{in} 、 u_{cm} 、 u_{gw} 分别为变换器的输入电压、变换器的输出电压和分段绕组的两侧电压, u_{pa} 、 u_{se} 分别为变换器并联侧电路输入电压与串联侧电路输出电压, i_S 、 i_L 分别为变压器 T_m 的一次侧与二次侧电流。故可

以得到关系式为

$$\begin{cases} u_S = u_{gw} + u_{cm} \\ u_{in} = K_{32}u_L \\ K_{32} = N_t / N_S \\ K_{12} = (N_m + nN_{pn}) / N_S \end{cases} \quad (1)$$

式中: K_{12} 表示变压器一次侧绕组与二次侧绕组之间的匝数比; K_{32} 表示取能绕组与变压器二次侧绕组之间的匝数比。

1.2 电路建模

对所提出 FOVRT 电路进行建模可得

$$\begin{cases} L_1 di_{L_1} / dt + u_{pa} = u_{in} \\ L_2 di_{L_2} / dt + u_{cm} = u_{se} \\ C_2 du_{cm} / dt - i_{L_2} = i_S \end{cases} \quad (2)$$

变换器的输入取能绕组是隔离式绕组,与主绕组绕制在同一磁芯上,故主变压器 T_m 的一次侧电流为

$$i_S = K_{31}i_{L_1} + K_{21}i_L = i_{sh} + i_{L^*} \quad (3)$$

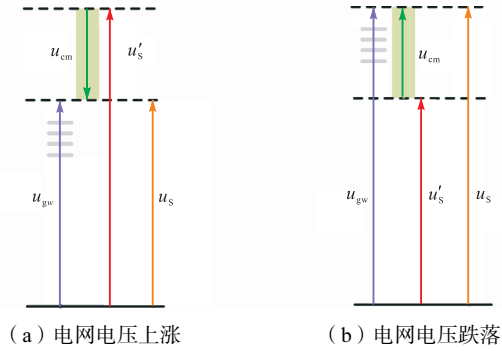
式中: K_{31} 表示取能绕组与一次侧绕组之间的匝数比; K_{21} 表示二次侧绕组与一次侧绕组之间的匝数比; i_{sh} 表示取能绕组电流折算到变压器一次侧的电流; i_{L^*} 表示二次侧电流折算到变压器一次侧的电流。

对于所提出结构变换器的串联侧电路,串联侧电路通过控制输出电压 u_{cm} 的幅值大小,可以对电网电压 u_S 的涨落进行精确的补偿。变换器分接开关的动作可以影响主变压器 T_m 的变比,进而保证负载电压的稳定。两种调节方式的区别是:

(1) 电力电子变换器的容量一般设置为 5% ~ 10%,故串联侧输出的补偿电压调节范围较小,但是输出电压 u_{cm} 是连续的^[20-21];

(2) 分接开关连接于主变压器分抽头的支路上,调节范围一般为 10% ~ 20%,分接开关动作对电网电压涨落的调节范围相对较大,但是分接开关的调节是离散的,机械式分接开关具有 5 ~ 8 s 的时间延迟,采用反并联晶闸管构成的电力电子式分接开关延迟低,但造价较高^[22-24],机械开关与电力电子开关结合的混合式分接开关结构较为复杂。

两种电压调节方式配合动作,可以将分接开关的调压范围全部转化为连续调压,如图 2 所示, u'_S 表示电网电压发生暂升或暂降后的数值。图 2(a) 中,电网电压暂升后,分接开关动作提高变压器变比 K_{12} ,变换器输出与电网电压反向的补偿电压 u_{cm} ,使得负载电压 u_L 保持稳定。图 2(b) 中电网电压暂降后,分接开关动作降低变压器变比 K_{12} ,变换器输出与电网电压同向的补偿电压 u_{cm} ,使得负载电压 u_L 保持稳定。



(a) 电网电压上涨 (b) 电网电压跌落
图 2 FOVRT 调压示意
Fig.2 Schematic of FOVRT voltage regulation

2 串联侧辅助调节无功功率

2.1 工作原理

串联侧可以通过调节输出电压 u_{cm} 的相位来补偿一次侧电压 u_s 相角, 进而调节无功功率, 即承担部分无功功率以减少并联侧变流器的容量使用。

变换器串联侧辅助并联侧无功补偿如图 3 所示, 符号 “*” 表示二次侧变量折算到变压器一次侧后的变量; 符号 “'” 表示变换器补偿后的变量; δ 为功率角, 表示电网电压跌落 u'_s 与一次侧绕组电压 u'_{gw} 之间的夹角; φ_L 表示功率因数角; β 为 i_s 与 i'_{L*} 之间的夹角, $\beta = \varphi_L - \delta$; u'_{gw} 是变换器补偿后的一次侧绕组电压; φ_{cm} 表示补偿电流 u_{cm} 的相角; i_{L*} 为折算到一次侧的二次侧电流; i'_{L*} 为变换器补偿后折算到一次侧的二次侧电流; φ_{sh} 表示补偿电流 i_{sh} 的相角. 图 3 中绿色区域表示 u_{cm} 的调节范围, 紫色区域表示变换器串联侧辅助并联侧电路无功补偿时 i_{sh} 幅值与相角的变化。

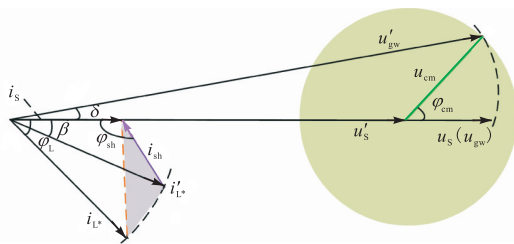


图 3 变换器串联侧辅助并联侧无功补偿示意
Fig.3 Schematic diagram of transformer series side assisting parallel side reactive compensation

一次侧绕组电压 u_{gw} 在变换器串联侧补偿前后的幅值保持不变, 折算到一次侧的二次侧电流 i_{L*} 补偿前后的幅值保持不变, 即

$$\begin{cases} |u_s| = |u_{gw}| = |u'_{gw}| = U \\ |i_{L*}| = |i'_{L*}| = I \end{cases} \quad (4)$$

定义电网电压跌落系数 k 为 u'_s 与 u_s 的比值, 即

$$k = |u'_s|/|u_s| \quad (5)$$

由图 3 可知, $\varphi_{cm} < 90^\circ + \delta/2$ 时, 表示电源电压发生暂降; $\varphi_{cm} > 90^\circ + \delta/2$ 时, 表示电源电压发生暂升。

将变换器串联侧输出电压 u_{cm} 设置为额定电压, 最大限度地让变换器串联侧分担了并联侧的负担, 同时根据三角关系可以得到变换器串联侧输出电压 u_{cm} 的幅值与相角为

$$\begin{cases} |u_{cm}| = u_{rat} \\ \varphi_{cm} = 180^\circ - \arctan\left(\frac{\sin \delta}{k - \cos \delta}\right) \end{cases} \quad (6)$$

对式 (6) 进行变换, 可以得到功率角 δ 与变换器串联侧电压相角 φ_{cm} 的关系为

$$\delta = \begin{cases} \varphi_{cm} - \arcsin(k \sin \varphi_{cm}) & 0 < \varphi_{cm} < \frac{\pi}{2} \\ \varphi_{cm} - \pi - \arcsin(-k \sin \varphi_{cm}) & \frac{\pi}{2} < \varphi_{cm} < \pi \end{cases} \quad (7)$$

对于变换器的并联侧, 同样可由图 3 得到补偿电流 i_{sh} 的幅值与相位为

$$\begin{cases} |i_{sh}| = \sqrt{i_s^2 + i_{L*}'^2 - 2i_s i_{L*}' \cos(\varphi_L - \delta)} \\ \varphi_{sh} = 90^\circ + \arctan\left(\frac{\cos \beta - \cos \varphi_L}{\sin \beta}\right) \end{cases} \quad (8)$$

根据式 (7) 和 (8), 可以绘制出 δ 与 φ_{cm} 、 $|i_{sh}|$ 与 φ_{cm} 、 φ_{sh} 与 φ_{cm} 关系曲线, 如图 4 所示, 其中, 图 4(a)、(c)、(e) 表示 $\varphi_{cm} < 90^\circ$ 时的关系曲线, 图 4(b)、(d)、(f) 表示 $90^\circ < \varphi_{cm} < 180^\circ$ 时的关系曲线, 图 4(b)、(d)、(f) 中 φ_{cm} 的转折点是 $90^\circ + \delta/2$, 转折点位置表示电网电压的幅值波动程度。

由图 4 可知, 当变换器串联侧输出电压相角 $\varphi_{cm} < 90^\circ$ 时, 随着 φ_{cm} 增大, 变换器并联侧输出电流的幅值 $|i_{sh}|$ 逐渐减小, 相位 φ_{sh} 逐渐减小; 当变换器串联侧输出电压相角 $90^\circ < \varphi_{cm} < 90^\circ + \delta/2$ 时, 随着 φ_{cm} 增大, 变换器并联侧输出电流的幅值 $|i_{sh}|$ 逐渐减小, 但相位 φ_{sh} 逐渐增大; 当变换器串联侧输出电压相角 $90^\circ + \delta/2 < \varphi_{cm} < 180^\circ$ 时, 随着 φ_{cm} 增大, 变换器并联侧输出电流的幅值 $|i_{sh}|$ 逐渐增大, 相位 φ_{sh} 逐渐减小。

综上分析, 通过合理控制变换器串联侧输出电压相角可以辅助并联侧调节补偿电流, 进而减轻变换器并联侧的负担。

2.2 分接开关影响

考虑到 FOVRT 的分接开关动作影响, 分接开关设置为 5% 一档, 调节范围为 $-80\% \sim 120\%$, 用 μ 表征分接开关的变化状态, μ 的变换范围是 $(-0.8, 1.2)$, 表示分接开关的动作状态. u_{cm} 、 u'_s 的可以用 μ

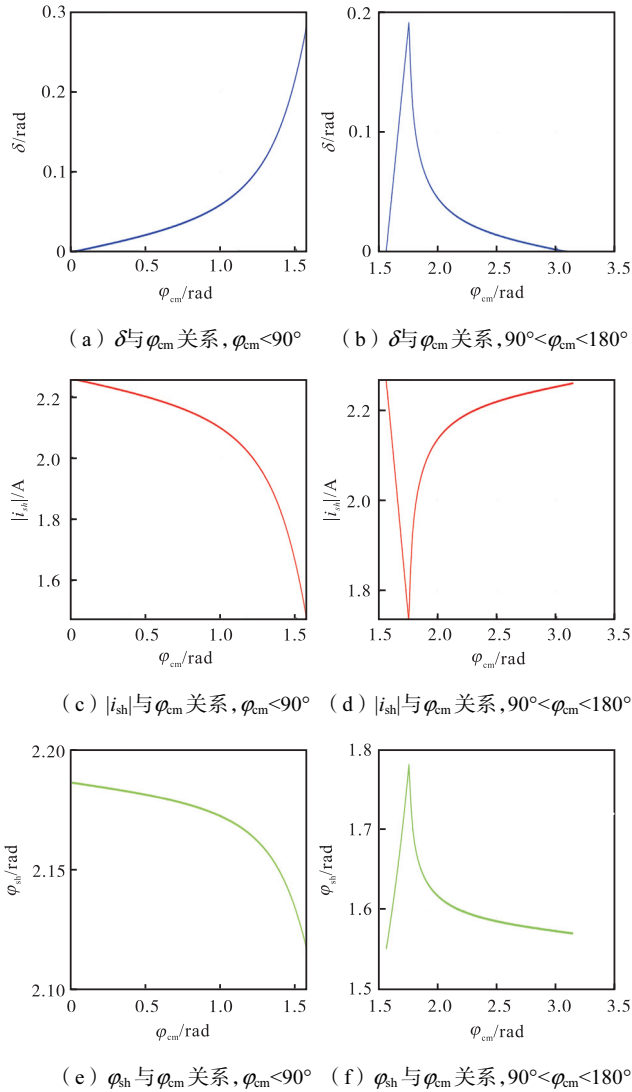


图4 δ 与 φ_{cm} 、 $|i_{sh}|$ 与 φ_{cm} 、 φ_{sh} 与 φ_{cm} 关系

Fig.4 Relationships of δ and φ_{cm} , $|i_{sh}|$ and φ_{cm} , φ_{sh} and φ_{cm}

表示为

$$\begin{cases} u_{cm} = K_{12}u_{cm_s} = \mu k_{12}u_{cm_s} \\ u'_s = K_{12}u'_{s_s} = \mu k_{12}u'_{s_s} \end{cases} \quad (9)$$

$$\cos \delta = \frac{\mu^2 k_{12}^2 u_L^2 + u_s'^2 - u_{cm}^2}{2\mu k_{12} u_L u_s'} \quad (10)$$

式中： u_{cm_s} 表示变换器串联侧输出电压 u_{cm} 折算到二次侧的变量； u'_{s_s} 表示跌落后的电网电压 u'_s 折算到二次侧的变量。

根据图 3 中变量关系，由余弦定理和式 (9) 可以得到功率角 δ 和分接开关系数 μ 的关系式 (10)，根据式 (6) 与式 (10) 可以绘制出功率角 δ 和分接开关系数 μ 、变换器串联侧输出电压相角 φ_{cm} 与分接开关系数 μ 的关系曲线，如图 5 所示。

由图 5 可知，当变压器一次侧连接的分接头位于中间位置时，功率角 δ 和变换器串联侧输出电压相角 φ_{cm} 是最大值，当变压器一次侧连接的分接头从中间

位置逐渐上移或者下移时，都会使功率角 δ 和变换器串联侧输出电压相角 φ_{cm} 逐渐减小，进而影响变换器串联侧辅助并联侧进行电流补偿的效果。

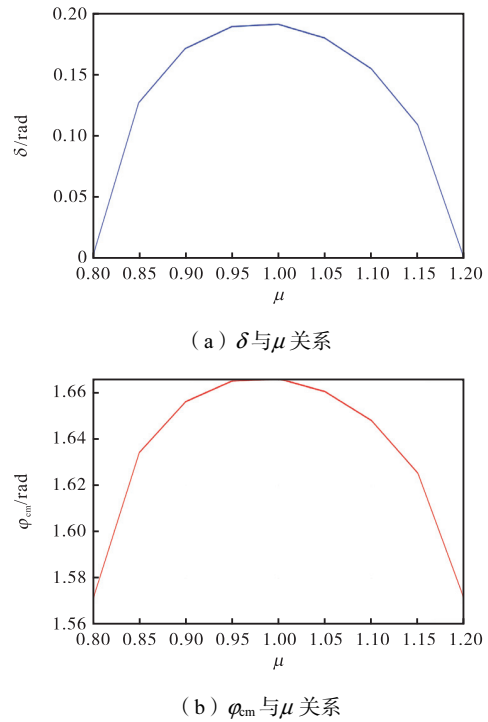


图5 δ 与 μ 以及 φ_{cm} 与 μ 的关系

Fig.5 Relationships of δ and μ , φ_{cm} and μ

3 并联侧辅助调节补偿电压

3.1 工作原理

FOVRT 变换器的并联侧可以改变补偿电流相角来补偿无功功率，还可以通过改变补偿电流幅值的大小，通过变压器 T_m 绕组感应后改变变压器一次侧电流的大小，进而改变变换器串联侧的输出电流大小，在固定的变换器补偿容量之下，实现增大变换器串联侧输出电压上限的功能。

变换器并联侧辅助串联侧电压补偿示意如图 6 所示，其中紫色区域表示 i_{sh} 的调节范围，绿色区域表

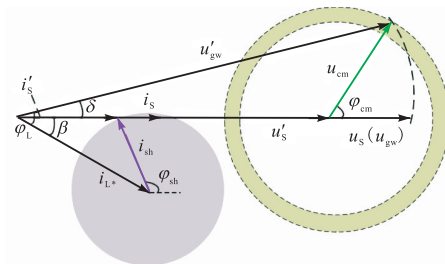


图6 变换器并联侧辅助串联侧电压补偿示意

Fig.6 Schematic of voltage compensation of the transformer parallel side aiding the series side

示变换器并联侧辅助串联侧电路补偿电压后 u_{cm} 扩大的调压范围。

在变换器额定容量下,为使变换器串联侧输出更高的补偿电压,需要最大限度地减小变压器 T_m 的一次侧电流 i_s ,而 i_s 受变换器并联侧补偿电流 i_{sh} 的影响,当 i_{sh} 垂直于 i_s 时,变换器并联侧补偿电流 i_{sh} 达到最小值,此时功率角 δ 同样是最小值,如图 7 所示。

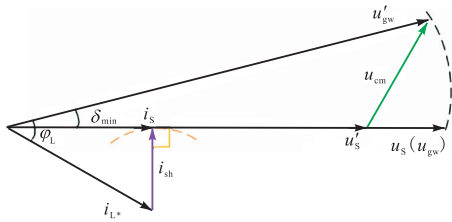


图 7 变换器并联侧补偿电流 i_{sh} 与 i_s 垂直时示意
Fig.7 Schematic when the compensating current i_{sh} of the transformer parallel side is perpendicular to i_s

由图 7 中可以得到 i_{sh} 的关系式为

$$|i_{sh}| = |i_{L*}| \sin(\varphi_L - \delta_{min}) \quad (11)$$

在图 6 中根据正弦定理可以得

$$\frac{|i_{L*}|}{\sin \varphi_{sh}} = \frac{|i_{sh}|}{\sin(\varphi_L - \delta)} \quad (12)$$

假设变换器并联侧输出补偿电流为额定电流,联立式(11)和式(12),可得到变换器并联侧输出补偿电流 i_{sh} 的相角,即

$$\begin{cases} |i_{sh}| = i_{rat} \\ \varphi_{sh} = \pi - \arcsin \frac{\sin(\varphi_L - \delta)}{\sin(\varphi_L - \delta_{min})} \end{cases} \quad (13)$$

对式(13)进行变换,可以得到功率角 δ 与变换器并联侧电流相角 φ_{sh} 的关系为

$$\delta = \varphi_L - \arcsin[\sin(\varphi_L - \delta_{min}) \sin \varphi_{sh}] \quad (14)$$

在图 6 中由正弦定理可以得到补偿电压 u_{cm} 的相角 φ_{cm} 与功率角 δ 的关系为

$$\frac{|u'_s|/k}{\sin(\pi - \varphi_{cm})} = \frac{|u'_s|}{\sin(\varphi_{cm} - \delta)} \quad (15)$$

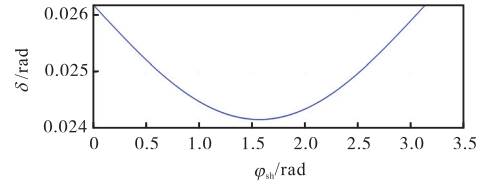
对式(16)进行变换,得到变换器串联侧输出电压 u_{cm} 的相角关系,同时根据图 6 中变量关系,可以得到变换器串联侧输出电压 u_{cm} 的幅值关系,即

$$\begin{cases} |u_{cm}| = \sqrt{u_{gw}^2 + (ku_s)^2 - 2u'_{gw}ku_s \cos \delta} \\ \varphi_{cm} = \arctan \frac{\sin \delta}{\cos \delta - k} \end{cases} \quad (16)$$

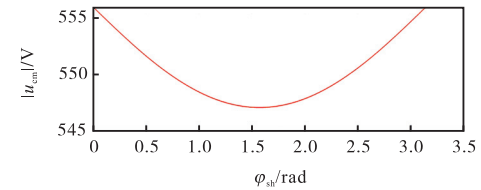
根据式(14)和式(16),可以绘制出 δ 与 φ_{sh} 、 $|u_{cm}|$ 与 φ_{sh} 、 φ_{cm} 与 φ_{sh} 的关系曲线,如图 8 所示。

由图 8 可知,当变换器并联侧输出电流相角 $\varphi_{sh} <$

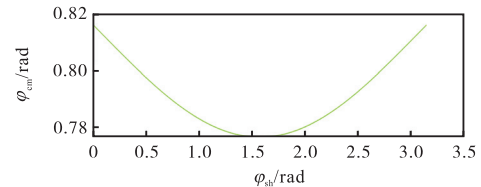
90° 时,随着 φ_{sh} 增大,变换器串联侧输出电压的幅值 $|u_{cm}|$ 逐渐减小,相位 φ_{cm} 逐渐减小;当变换器串联侧输出电压相角 $90^\circ < \varphi_{sh} < 180^\circ$ 时,随着 φ_{sh} 增大,变换器串联侧输出电压的幅值 $|u_{cm}|$ 逐渐增大,相位 φ_{cm} 同样逐渐增大。



(a) δ 与 φ_{sh} 关系



(b) $|u_{cm}|$ 与 φ_{sh} 关系



(c) φ_{cm} 与 φ_{sh} 关系

图 8 δ 与 φ_{sh} 、 $|u_{cm}|$ 与 φ_{sh} 、 φ_{cm} 与 φ_{sh} 关系

Fig.8 Relationships of δ and φ_{sh} , $|u_{cm}|$ and φ_{sh} , φ_{cm} and φ_{sh}

综上所述,通过合理控制变换器并联侧输出电流相角可以辅助串联侧电路提升输出电压上限,进而提升变换器串联侧的补偿能力。

3.2 分接开关影响

将折算到一次侧的二次侧电流 i_{L*} 、变换器并联侧电流补偿电流 i_{sh} 用分接开关系数 μ 表示,即

$$\begin{cases} i_{sh} = i_{L_1} / (\mu k_{13}) \\ i_{L*} = i_{L_1} / (\mu k_{12}) \end{cases} \quad (17)$$

根据图 6 可以得到 $\varphi_L - \delta$ 与分接开关系数 μ 的关系式,并将式(17)代入得

$$\cos \beta = \frac{\mu^4 k_{12}^2 k_{13}^2 i_s'^2 + \mu^2 k_{13}^2 i_L'^2 - \mu^2 k_{12}^2 i_L'^2}{2\mu^3 k_{12} k_{13} i_s' i_L'} \quad (18)$$

结合式(13)和(18),可以绘制出功率角 β 和分接开关系数 μ 、变换器并联侧补偿电流相角 φ_{sh} 与分接开关系数 μ 的关系曲线,如图 9 所示。

由图 9 可知,当变压器一次侧连接的分抽头位于中间位置时, i_s' 与 i_{L*} 之间的夹角 β 达到最大值,变换器并联侧补偿电流相角 φ_{sh} 达到最小值。当变压器一

次侧连接的分抽头从中间位置逐渐上移或者下移时, 会使夹角 β 减小, 相角 φ_{sh} 增大, 进而影响变换器并联侧提升串联侧电压输出上限的效果.

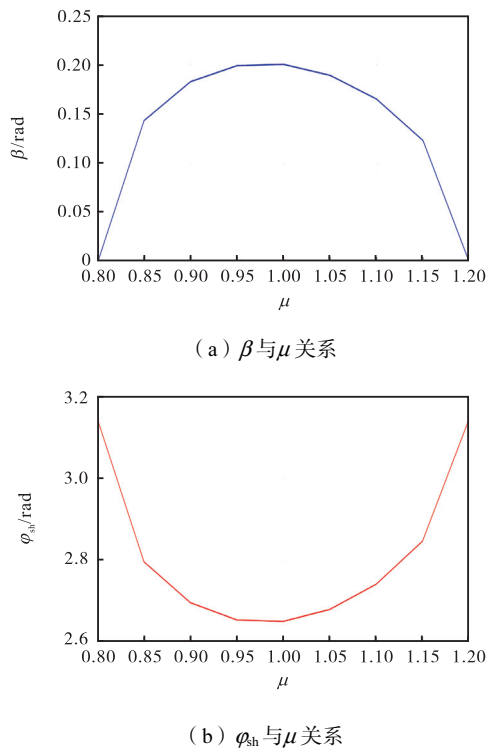


图9 β 与 μ 、 φ_{sh} 与 μ 关系
Fig.9 Relationships of β and μ , φ_{sh} and μ

4 功率分析与综合控制

4.1 功率流动分析

在 FOVRT 变换器的直流侧接入储能, 可以起到缓冲直流侧电压功率的作用, 并在必要时提供负荷有功功率. 不同工况下储能与变换器两侧电路存在不同的功率流动路径, 储能单元的接入减弱了两侧变换器之间的功率耦合关系, 从而提升了两侧变换器的补偿能力. 当电网电压出现波动时, 变换器会控制串联侧输出电压进行补偿, FOVRT 中的功率流动如图 10 所示.

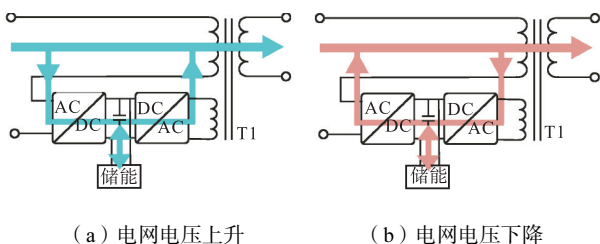
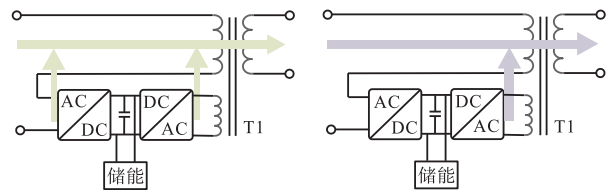


图10 电网电压上升与下降的有功功率流动
Fig.10 Active power flow during grid voltage rise and dip

当电网电压上升时, 变换器串联侧输出与电网电

压反向的电压, 此时变换器串联侧吸收有功功率, FOVRT 内部有功功率路线如图 10(a) 所示. 当电网电压下降时, 变换器串联侧输出与电网电压同向的电压, 此时变换器串联侧发出有功功率, FOVRT 内部有功功率路线如图 10(b) 所示.

FOVRT 中变换器采用串联侧辅助并联侧调节无功功率控制策略时, 相当于变换器两侧均发出了一部分无功功率, FOVRT 内部无功功率路线如图 11(a) 所示. 变换器采用并联侧辅助串联侧调节无功功率控制策略时, 相当于变换器并联侧发出了更多的无功功率, FOVRT 内部无功功率路线如图 11(b) 所示.



(a) 串联侧辅助并联侧无功调节 (b) 并联侧辅助串联侧电压补偿

图11 容量互济控制策略下的无功功率流动

Fig.11 Reactive power flow under capacity mutual aid control strategy

4.2 分层多级控制策略

根据所提出变换器两侧电路的容量互济控制策略, 在 FOVRT 实现所需功能时, 不同功能之间可以进行分级控制, 如图 12 所示, 串联侧电路调节电压与辅助调节无功功率均可以得到补偿电压 u_{cm_ref} 的幅值和相位, 并联侧调节无功功率与辅助调节电压均可以确定补偿电流 i_{L_ref} 的幅值和相位, 电压、无功功率同时调节则同时确定补偿电压 u_{cm_ref} 与补偿电流 i_{L_ref} 的幅值和相位.

图 12 中, 首先判断需要调节电压幅值还是无功功率, 电压幅值调节指令由电网电压实际值与额定电压比较得到, 无功功率调节指令由 FOVRT 二次侧电压相位和电流相位比较得到. 如果仅需要调节无功功率, 则判断是否超过变换器并联侧的调节范围, 若超过补偿范围, 则通过变换器串联侧进行辅助调节; 如果仅需要调节电压幅值, 则判断是否超过变换器串联侧的调节范围, 若超过补偿范围, 则通过变换器并联侧进行辅助调节; 若需要同时调节电压与无功功率, 则变换器两侧同时进行补偿, 若未达到要求, 则通过补偿目标优先级判断的方法, 来确定变换器容量互济控制策略的使用对象, 进而达到控制要求.

FOVRT 变换器两侧电路的基本控制策略如图 13 所示, 图中 $G_{PR1}(s)$ 、 $G_{PR2}(s)$ 表示准比例谐振控制器, $G_d(s)$ 表示系统延迟, 主要包括采样开关延时、脉

宽调制延时以及离散化的计算延时等, m_{pa} 表示并联侧电路调制信号, m_{se} 表示串联侧电路调制信号,

FOVRT 变换器两侧电路均使用了基于准比例谐振控制器的闭环控制策略.

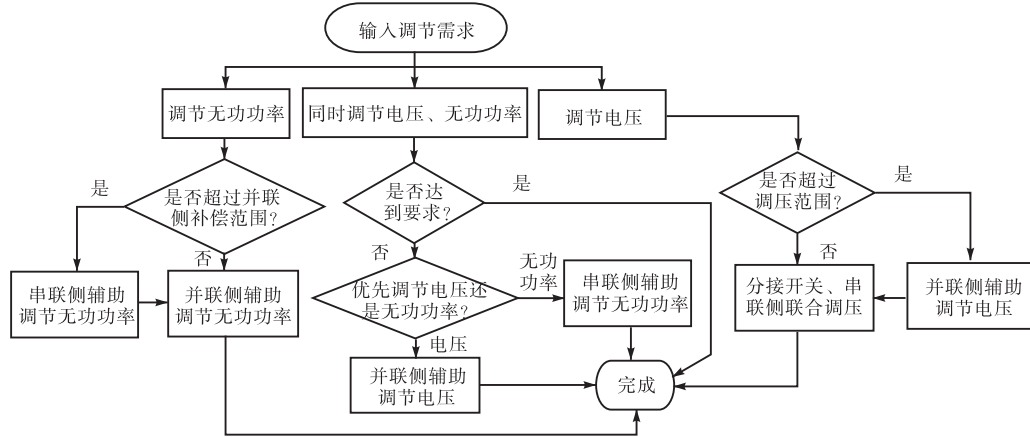
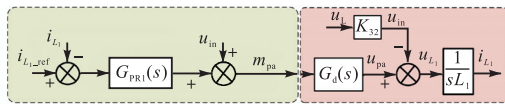
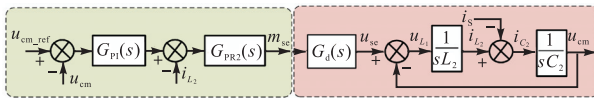


图 12 FOVRT 分层多级控制策略

Fig.12 Hierarchical and multi-level control strategy of FOVRT



(a) 并联侧控制策略



(b) 串联侧控制策略

图 13 FOVRT 变换器两侧控制策略

Fig.13 Control strategy on both sides of FOVRT converter

5 仿真

本文使用 MATLAB/Simulink 对所提出的控制策略进行了仿真验证, 柔性有载调压变压器的电压等级设置为 10 kV/0.4 kV, 电力电子变换器从隔离绕组取能输入, 输出直接接入主电路, 变换器的直流母线需满足最大输入电压的可控整流需求, 则最低需要满足

$$u_{dc_min} = 110\% \sqrt{2} u_{in} = 388.85 \text{ V} \quad (19)$$

式中 u_{in} 为变换器并联侧的输入电压, 故将变换器直流侧电压设置为 450 V, 其他电路的主要参数见表 1.

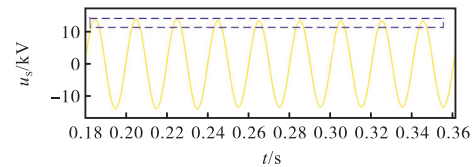
表 1 所提出 FOVRT 的仿真参数

Tab.1 Simulation parameters of the proposed FOVRT

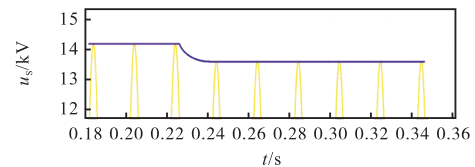
T_m 变比	$S_{Tm}/(\text{kV} \cdot \text{A})$	分抽头	u_{in}/V
10.0 : 0.4	315	$4 \times (\pm 2.5\%)$	250
u_{dc}/V	L_1/mH	L_2/mH	$C_2/\mu\text{F}$
450	1.2	1.5	35

图 14 展示了电网电压下降时, 变换器与分接开关实现联合调压的过程. 电网电压 u_s 在 0.24 s 时从 100% 跌落至 96%, 变换器检测到电压跌落 after 快速反

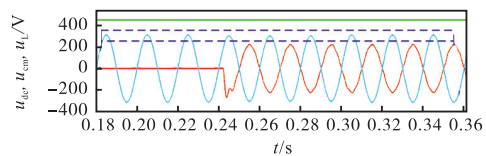
应, 变换器串联侧输出峰值为 200 V 的补偿电压 u_{cm} , 随后分接开关向下调节一档, 在 0.30 s 时完成动作, 负载电压 u_L 恢复稳定. 由此可知, 所提出控制策略可以实现对电网电压波动的快速补偿.



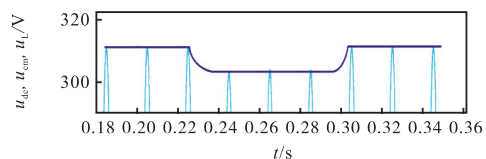
(a) 电网电压跌落



(b) 图(a)的局部放大



(c) 分接开关与变换器联合调压



(d) 图(c)的局部放大

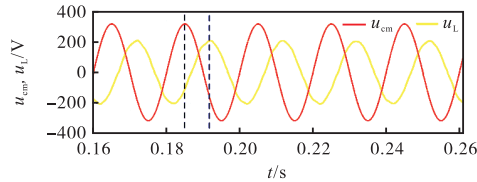
图 14 FOVRT 无级调压波形

Fig.14 Stepless voltage regulation waveforms of FOVRT

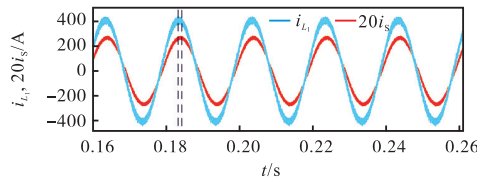
图 15 展示了 FOVRT 变换器串联侧辅助并联侧

无功调节的过程,为便于观测,将电网电压 i_s 放大了 20 倍. 变换器串联侧输出了一个幅值为 200 V、相位超前电网电压 u_s 相位 60° 的补偿电压,同时,变换器并联侧可以将输入电流 i_{L_1} 控制为幅值为 40 A、相位为 30° 的补偿电流,即 FOVRT 变换器串联侧可以输出一个具备其他相位的电压以辅助并联侧电路进行无功补偿.

图 16 展示了 FOVRT 变换器并联侧辅助串联侧调节补偿电压波形的过程,为便于观测,将电网电压 i_s 放大了 20 倍. FOVRT 变换器并联侧将其输入电流 i_{L_1} 控制为幅值为 45 A、相位为 45° 时的补偿电流时,变换器串联侧输出了一个幅值为 260 V、与电网电压同相的补偿电压,即变换器可以通过并联侧对电网电流进行更高的补偿,使得在额定容量下变换器串联侧可以输出更高幅值的电压.

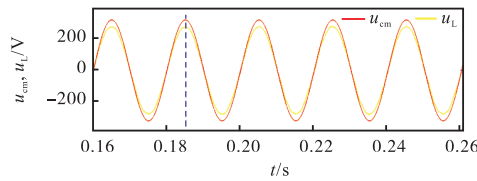


(a) 串联侧变换器输出电压与负载电压波形

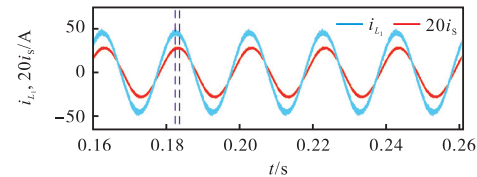


(b) 并联侧变换器输入电流与电网电流波形

图 15 FOVRT 变换器串联侧辅助并联侧无功调节波形
Fig.15 Reactive power regulation waveforms of parallel side assisted by series side of FOVRT converter



(a) 串联侧变换器输出电压与负载电压波形



(b) 并联侧变换器输入电流与电网电流波形

图 16 FOVRT 变换器并联侧辅助串联侧调节补偿电压波形

Fig.16 Compensating voltage waveforms regulated by the parallel side of FOVRT converter assisting its series side

6 实验

本文搭建了一个 110 V/55 V 的单相柔性有载调压变压器实验平台,如图 17 所示,在 FOVRT 变换器直流侧接入直流电源以模拟直流侧储能环境,实验参数见表 2.

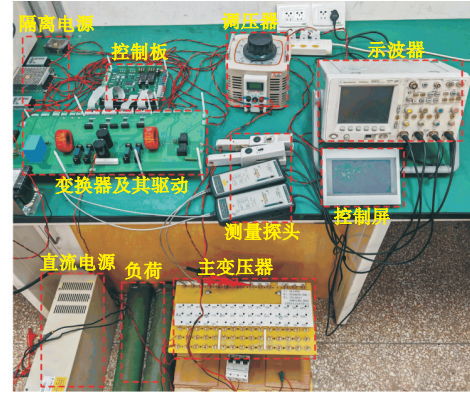


图 17 FOVRT 实验样机

Fig.17 FOVRT experimental prototype

表 2 所提出 FOVRT 的实验参数

Tab.2 Experimental parameters of the proposed FOVRT

T_m 变比	u_{dc}/V	u_m/V	开关频率/kHz
110.0 : 55.0	42	22	10
L_1/mH	L_2/mH	$C_2/\mu F$	负载/ Ω
1.2	1.5	50	40

图 18 展示了 FOVRT 变换器并联侧控制输入电感电流 i_{L_1} 的过程,变换器并联侧控制输入电感电流 i_{L_1} 增大后, i_{L_1} 通过主变压器绕组感应至一次侧电路,进而使得一次侧电流 i_s 与变换器串联侧输出电感电流 i_{L_2} 增大,同时 FOVRT 变换器直流侧电压 u_{dc} 保持不变.

图 19 展示了 FOVRT 变换器输出与电网电压同向电压 u_{cm} 的过程,变换器串联侧输出补偿电压之后,负载电压 u_L 增大,由于主变压器二次侧负载不变,故变换器串联侧输出电感电流 i_{L_2} 略有增加,FOVRT 变换器直流侧电压 u_{dc} 保持不变.

图 20 是 FOVRT 变换器串联侧辅助并联侧无功调节的过程,在 FOVRT 变换器两侧同时运行时,变换器串联侧输出了一个幅值为 20 V、相位超前电网电压 60° 的补偿电压 u_{cm} ,同时变换器并联侧可以输出一个幅值为 2 A、相角为 30° 的补偿电流 i_{L_1} ,这表明通过变换器串联侧输出电压相位的调节,可以与变换器并联侧共同实现无功调节.

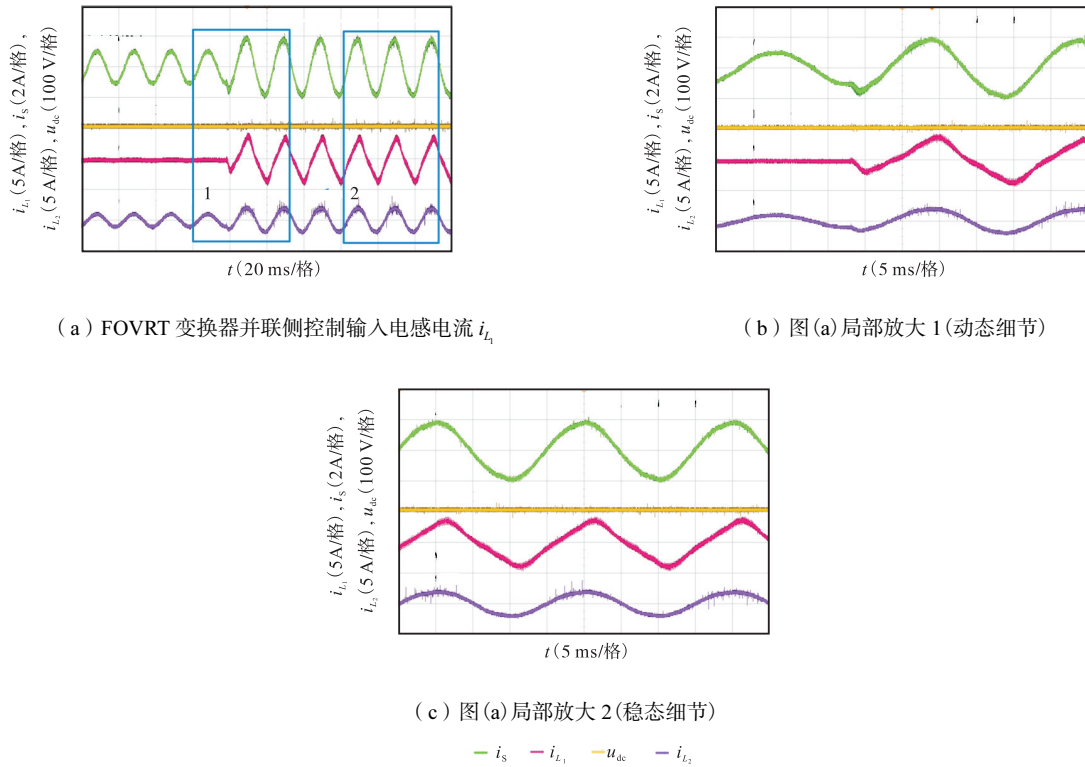


图 18 FOVRT变换器并联侧控制输入电感电流

Fig.18 Input inductor current for the parallel side control of FOVRT converter

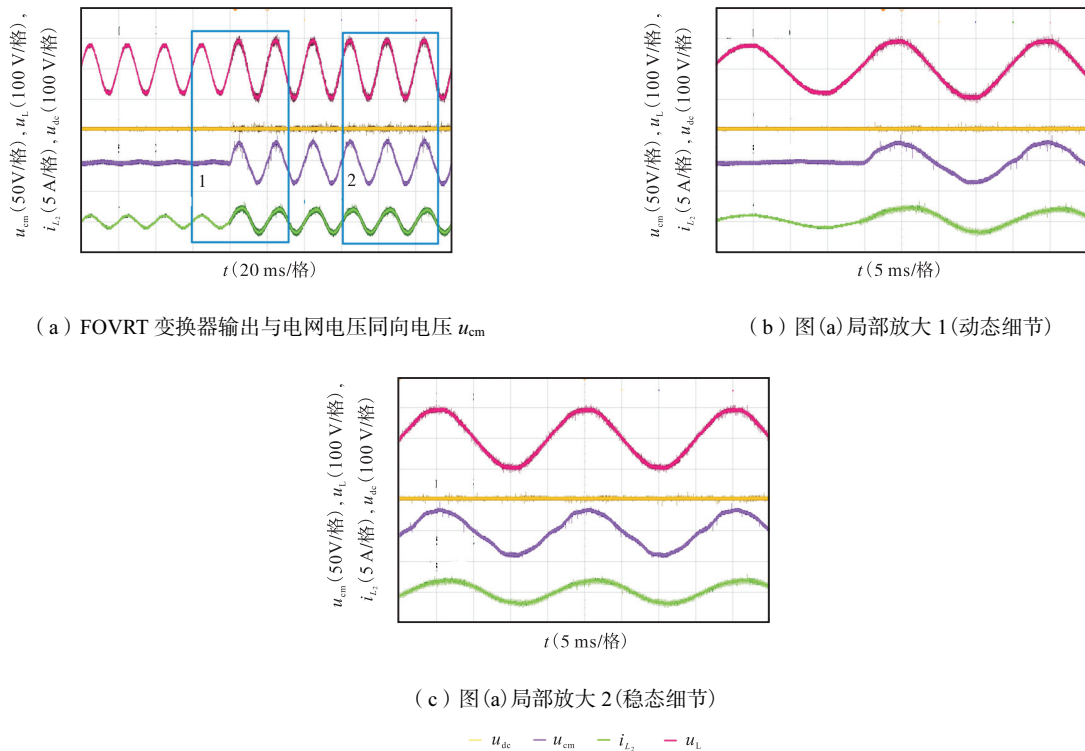


图 19 FOVRT变换器串联侧输出与电网电压反向的电压

Fig.19 Voltage at the series side output of the FOVRT converter that is reversed with respect to the grid voltage

图 21 是 FOVRT 变换器并联侧辅助串联侧调节补偿电压的过程. FOVRT 变换器并联侧将输入电感电流 i_{L1} 控制为幅值为 3 A、相角为 45° 的电流时, 变换

器串联侧可以输出幅值为 30 V、与电网电压同向的补偿电压, 即 FOVRT 可以通过变换器并联侧对电网电流进行更高的补偿, 使得在额定容量下变换器串联

侧可以输出更高幅值的电压。

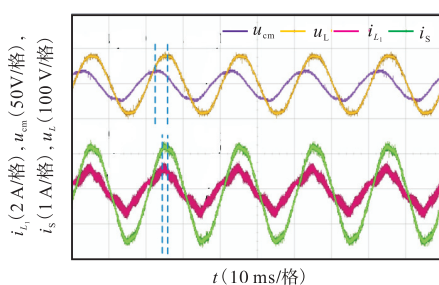


图 20 FOVRT 变换器串联侧辅助并联侧无功调节

Fig.20 FOVRT converter series side assisting parallel side reactive power regulation

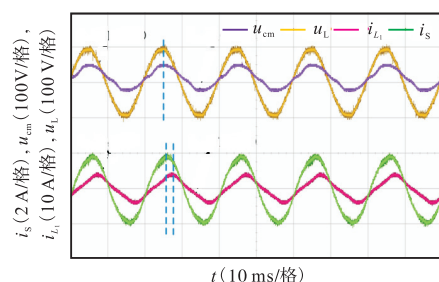


图 21 FOVRT 变换器并联侧辅助串联侧调节补偿电压

Fig.21 FOVRT converter parallel side assisting series side in regulating compensation voltage

7 结 语

本文在柔性有载调压变压器的变换器直流侧接入储能,减弱了 FOVRT 中电力电子变换器两侧之间的功率耦合关系,从而增强变换器两侧电路的补偿能力.提出了在固定变换器容量下的容量互济控制策略,使得变换器的串联侧与并联侧在功能上实现相互协助,同时分析了有载分接开关动作对所提出控制策略的影响,并设计了相应的分层多级控制策略,在仿真与实验样机中对上述策略进行验证,结果验证了本文所提策略的正确性和有效性,实现了 FOVRT 变换器两侧的容量互济控制。

参考文献:

- [1] 卓振宇, 张 宁, 谢小荣, 等. 高比例可再生能源电力系统关键技术及发展挑战[J]. 电力系统自动化, 2021, 45(9): 171-191.
Zhuo Zhenyu, Zhang Ning, Xie Xiaorong, et al. Key technologies and developing challenges of power system with high proportion of renewable energy[J]. Automation of Electric Power Systems, 2021, 45(9): 171-191 (in Chinese).
- [2] 鲁宗相, 黄 瀚, 单葆国, 等. 高比例可再生能源电力系统结构形态演化及电力预测展望[J]. 电力系统自动化, 2017, 41(9): 12-18.
Lu Zongxiang, Huang Han, Shan Baoguo, et al. Morphological evolution model and power forecasting prospect of future electric power systems with high proportion of renewable energy[J]. Automation of Electric Power Systems, 2017, 41(9): 12-18 (in Chinese).
- [3] 邹才能, 陈艳鹏, 熊 波, 等. 碳中和目标下中国新能源使命[J]. 中国科学院院刊, 2023, 38(1): 48-58.
Zou Caineng, Chen Yanpeng, Xiong Bo, et al. Mission of new energy under carbon neutrality goal in China [J]. Bulletin of Chinese Academy of Sciences, 2023, 38(1): 48-58 (in Chinese).
- [4] Mahdavi M, Schmitt K E K, Chamana M, et al. Evaluation of voltage fluctuations effect on reconfiguration of distribution systems[J]. IEEE Systems Journal, 2024, 18(1): 198-209.
- [5] Wang P Y, Liang F Y, Song J Y, et al. Impact of the PV location in distribution networks on network power losses and voltage fluctuations with PSO analysis[J]. CSEE Journal of Power and Energy Systems, 2022, 8(2): 523-534.
- [6] 王 鹤, 栾钧翔. 变压器的电力电子化演进及其对电压稳定影响综述[J]. 电力系统保护与控制, 2020, 48(16): 171-187.
Wang He, Luan Junxiang. Summary of power electronic evolution of transformer and its influence on voltage stability[J]. Power System Protection and Control, 2020, 48(16): 171-187 (in Chinese).
- [7] Bahadornjad M, Nair N K C. Intelligent control of on-load tap changing transformer[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2014, 5(5): 2255-2263.
- [8] de Oliveira Quevedo J, Emmanuel C F, Concatto B R, et al. Analysis and design of an electronic on-load tap changer distribution transformer for automatic voltage regulation[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2017, 64(1): 883-894.
- [9] 王金丽, 马 钊, 潘 旭, 等. 配电变压器有载调压技术[J]. 中国电力, 2018, 51(5): 75-79, 100.
Wang Jinli, Ma Zhao, Pan Xu, et al. On-load tap-changing technology of distribution transformer[J]. Electric Power, 2018, 51(5): 75-79, 100 (in Chinese).
- [10] Han L B, Yin J Y, Wu L X, et al. Research on the novel flexible on-load voltage regulator transformer and voltage stability analysis[J]. Energies, 2022,

- 15(17): 6189.
- [11] 黎家明, 霍群海, 尹靖元, 等. 考虑柔性有载调压变压器的两阶段电压无功优化协调控制方法研究[J]. 电网技术, 2025, 49(1): 272-283.
- Li Jiaming, Huo Qunhai, Yin Jingyuan, et al. Research on two-stage voltage and reactive power optimization coordinated control method considering flexible on-load tap changer[J]. Power System Technology, 2025, 49(1): 272-283(in Chinese).
- [12] Liu Q R, Huo Q H, Yin J Y, et al. Research on coordinated control of flexible on-load voltage regulator and STATCOM[J]. Energy Reports, 2022, 8(13): 994-1002.
- [13] Sun L F, Yin J Y, Liu S, et al. Flexible on-load voltage regulating transformer based on common-capacity-midpoint two-half-bridge converter[J]. IET Power Electronics, 2025, 18(1): 1-13.
- [14] Han L B, Yin J Y, Wu L X, et al. Research on reactive power compensation control strategy of flexible on-load voltage regulator[J]. Energies, 2022, 15(17): 6193.
- [15] 刘畅, 卓建坤, 赵东明, 等. 利用储能系统实现可再生能源微电网灵活安全运行的研究综述[J]. 中国电机工程学报, 2020, 40(1): 1-18, 369.
- Liu Chang, Zhuo Jiankun, Zhao Dongming, et al. A review on the utilization of energy storage system for the flexible and safe operation of renewable energy micro-grids[J]. Proceedings of the CSEE, 2020, 40(1): 1-18, 369(in Chinese).
- [16] 马茜, 王文立, 许倩. 储能式统一电能质量控制器负载电压全补偿容量配置策略[J]. 电力系统自动化, 2019, 43(20): 90-96.
- Ma Qian, Wang Wenli, Xu Qian. Capacity allocation strategy for full compensation of load voltage in unified power quality controller with energy storage[J]. Automation of Electric Power Systems, 2019, 43(20): 90-96(in Chinese).
- [17] 刘盈瑞. 多功能储能式 UPQC 运行特性及控制研究[D]. 秦皇岛: 燕山大学, 2022.
- Liu Yingrui. Research on Operation Characteristics and Control of Multi-Function UPQC Integrating Energy Storage[D]. Qinhuangdao: Yanshan University, 2022(in Chinese).
- [18] 张震霄, 年珩, 李培, 等. 储能型统一电能质量调节器电压补偿能力分析及其提升方法[J]. 电力系统自动化, 2022, 46(23): 151-159.
- Zhang Zhenxiao, Nian Heng, Li Pei, et al. Voltage compensation capability analysis and improvement method for unified power quality conditioner with energy storage[J]. Automation of Electric Power Systems, 2022, 46(23): 151-159(in Chinese).
- [19] 黄晓明, 范志华, 苗世洪, 等. 含储能单元的统一电能质量调节器功率协调控制策略[J]. 高电压技术, 2018, 44(10): 3390-3398.
- Huang Xiaoming, Fan Zhihua, Miao Shihong, et al. Coordinated power control strategy of unified power quality conditioner with energy storage unit[J]. High Voltage Engineering, 2018, 44(10): 3390-3398(in Chinese).
- [20] Liu Y B, Liang D L, Wang Y H, et al. Power flow analysis and DC-link voltage control of hybrid distribution transformer[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2021, 36(11): 12579-12595.
- [21] Liu Y B, Zhang L S, Liang D L, et al. Quasi-proportional-resonant control for the hybrid distribution transformer with LCL-type converters[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2022, 58(5): 6368-6385.
- [22] 李双双. 有载调压变压器分接开关机械故障诊断研究[D]. 保定: 华北电力大学, 2021.
- Li Xiaoshuang. Research on Mechanical Fault Diagnosis of On-Load Tap-Changer Transformer[D]. Baoding: North China Electric Power University, 2021(in Chinese).
- [23] 王春霖, 刘畅, 杨华, 等. 基于复合开关级联 H 桥结构的有载调压配电变压器[J]. 高电压技术, 2022, 48(5): 1987-1996.
- Wang Chunlin, Liu Chang, Yang Hua, et al. On-load tap changer distribution transformer based on hybrid-switch cascaded H-bridge structure[J]. High Voltage Engineering, 2022, 48(5): 1987-1996(in Chinese).
- [24] 宋祺鹏, 秦开明, 戚振彪, 等. 基于电子开关的高精度宽幅有载调压配电变压器研究[J]. 电网技术, 2018, 42(9): 3055-3060.
- Song Qipeng, Qin Kaiming, Qi Zhenbiao, et al. Research on high accuracy and wide range OLTC transformer based on power electronic technology[J]. Power System Technology, 2018, 42(9): 3055-3060(in Chinese).

(责任编辑: 孙立华)