耦合可控电抗器的统一电能质量控制器

谭 真,罗隆福,崔贵平,洪伟成,田 野
(湖南大学 电气与信息工程学院,湖南 长沙 410000)

摘要:针对传统结构的统一电能质量控制器(UPQC)难以适应高电压网络的问题,提出了一种新型UPQC的拓扑结构及其控制方法。晶闸管控制电抗器与补偿电容器并联后经TCLC接入电网与并联侧有源部分之间。通过控制TCLC的等效阻抗,实现并联侧的无功补偿和有功功率平衡;并联侧有源部分只需要补偿谐波分量。最后通过仿真算例验证所提控制器结构的正确性和有效性,仿真结果表明该结构能够大幅降低并联侧有源逆变器部分的容量,有源部分工作电压等级下降,降低了对开关管的要求和运行时的损耗,削减了装置的制造和运行成本。

关键词:UPQC;晶闸管控制电抗器;谐波分析;无功功率;动态电压恢复器
中图分类号:TM 571.2 **文献标志码:**A DOI:10.16081/j.epae.201912025

0 引言

随着各种电力电子器件、大量非线性负载以及无功负载的接入,配电网中低功率因数、谐波污染等电能质量问题日益严峻。不平衡负载的接入也会使得三相功率不平衡[1-2]。同时,配电网电压本身也会出现暂降、波动与闪变等问题[3-4]。统一电能质量控制器UPQC(Unified Power Quality Controller)能综合治理各种电能质量问题[5-7],具有广阔的运用前景。

当UPQC运用于电压等级较高的场景中时,其较高的制造成本、更为复杂的控制方法,使得UPQC在中高压场合中的使用受到了限制。但UPQC并联侧和串联侧所需要的直流电压不同:在串联侧,直流电压需要满足$V_{DC}\geqslant\sqrt{2}U_S$;在并联侧,直流电压需要满足$V_{DC}\geqslant\sqrt{6}U_S$[6]。在实际应用中,并联部分由于需要补偿无功功率和谐波,多数时间都处于运行状态,而串联侧只有当电压出现暂降、波动等现象时才会进行补偿。整个装置的损耗主要取决于并联部分,只要降低公共直流电压和并联侧补偿容量就可以降低装置的制造成本、运行损耗以及噪声等问题,使其适用于中高压场合。

为了解决UPQC难以应用于中高电压场合的问题,国内外学者进行了各方面的研究。文献[9]中采用了分离式的结构,将并联侧和串联侧的直流电压分开,此方法虽然降低了串联侧的直流电压,但是并联侧直流电压仍未降低。由于串联侧和并联侧相隔离,串联侧须接入额外的储能和充电设备。文献[10]通过升压变压器将并联侧接入电网,有效地降低了直流侧电压,但并联侧的容量并未减少,由于增加了额外的变压器,装置体积变大、造价上升,另外在运行时变压器还会产生噪声,使得这种结构的应用受到了限制。文献[11-12]中串联侧和并联侧都采用级联多电平的形式,提高了UPQC工作的电压等级,但这种结构需要大量的开关器件,必然导致控制复杂度增加、系统可靠性降低。文献[13]中并联侧采用混合型滤波器结构,降低了直流电压,同时降低了有源部分的补偿容量,但其无功补偿量不能实时调节,只适合无功功率波动较小的场合。本文所提出的UPQC结构能够根据需要动态地调节无功补偿容量,使得系统的无功功率完全由TCLC(Thyristor-Controlled LC-coupling)补偿,由于TCLC的分压作用,有源部分的工作电压大幅下降,无需额外的降压变压器或者级联结构,同时将无功功率和谐波分开补偿,降低了有源部分的补偿容量。

本文提出了一种全新结构和控制方法的UPQC,在其并联侧使用有源部分和TCLC联合补偿。TCLC补偿系统无功功率。有源部分只补偿谐波分量,其容量大幅减小。同时TCLC承担了大部分压降,直流侧电压得以降低。这种结构的UPQC制造和运行成本更低,且能够应用于中高压场合。最后通过仿真算例验证了这种结构的可行性和正确性。

1 新型UPQC的拓扑结构和工作原理

本文所提出的新型UPQC拓扑结构如图1所示。图中,R_s和L_s分别为系统电阻和电感;L_{se}和C_{se}分别为串联侧滤波电感与滤波电容;C_{DC}和V_{DC}分别为直流侧电容和电压;L_c为并联部分耦合电感;L_f、C_f分别为TCLC的补偿电感和电容;v_{sx}、v_{tx}、v_{lx}、v_{dx}、i_{lx}、i_{cx}分别为系统电压、装置电源侧电压、负载侧电压、串联补

收稿日期:2019-06-10;**修回日期:**2019-10-18
基金项目:国家自然科学基金资助项目(51477044);湖南省重大科技专项(2015GK1027,2017GK2241)
Project supported by the National Natural Science Foundation of China(51477044) and Hunan Province Major Science and Technology Project(2015GK1027,2017GK2241)

偿电压、负载电流和并联侧补偿电流(x=a,b,c,后同);T_1、T_2为反并联控制晶闸管。

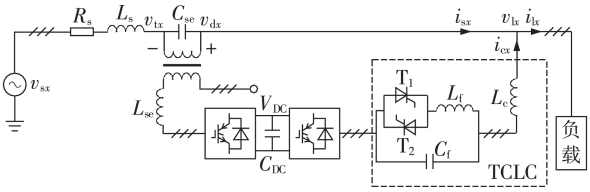


图1 新型UPQC拓扑图

Fig.1 Topology diagram of novel UPQC

UPQC由串联和并联两大部分构成,两部分共用一个直流源。串联侧输出经由串联变压器接入电源与负载之间[14],v_{tx}和v_{dx}共同向负载侧供电,只要合理控制v_{dx}就能治理电压暂降、闪变、三相电压不平衡等一系列电压质量问题;并联侧由有源部分和TCLC组成,TCLC补偿负载无功功率,有源部分补偿负载电流谐波。两部分协同工作可以相互弥补各自单独工作时的不足。TCLC分担了大部分的负载电压,有源部分的电压等级能够大幅降低,且有源部分不需要补偿无功,其补偿容量大幅下降。由于有源部分和TCLC为串联关系,通过有源部分开关管的动作,可以解决TCLC单独工作时存在的固有问题,如晶闸管动作时的冲击电流、系统谐振、没有谐波补偿能力等。

2 控制方法

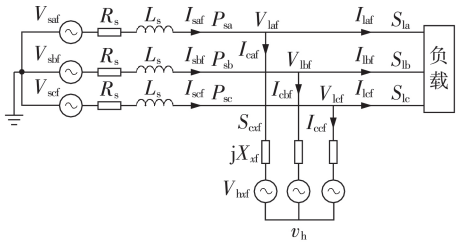
系统的控制主要由TCLC、并联侧有源部分和串联侧3个部分组成。其中,TCLC采用开环控制,其余2个部分采用闭环控制。

2.1 TCLC部分控制方法

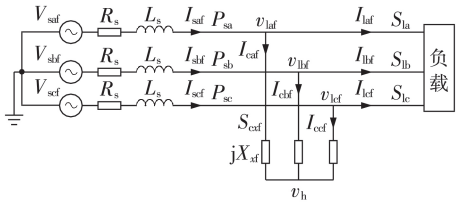
对于并联侧,TCLC补偿无功功率和平衡有功功率,有源部分补偿谐波电流,并联部分基频等效模型如图2所示。图2(a)为实际等效模型,图中,下标f表示基频成分;v_{lxf}为负载侧电压;v_h为等效公共点电压;I_{sxf}、I_{lxf}、I_{cxf}分别为电源侧电流、负载侧电流和补偿电流;P_{sx}为电源侧功率;S_{lx}为负载功率;X_{xf}为TCLC等效阻抗;v_{hxf}为有源部分等效三相电压源,其大小取决于TCLC的等效阻抗,如果TCLC能完全补偿无功功率,那么在基频时$v_{hxf}=0$[15]。为了简化分析,假设TCLC可以完全补偿无功功率且v_{lxf}是标准正弦波,在基频分量下的等效电路图如图2(b)所示。

如果三相电路的无功能够完全补偿,那么三相的有功功率即可平衡[15]。因此TCLC只需补偿无功分量。要确定晶闸管的触发角度,首先需要计算出X_{xf},由附录中式(A1)—(A5)可得:

$$\begin{bmatrix} X_{af} \\ X_{bf} \\ X_{cf} \end{bmatrix} = 3\left|v_{lxf}\right|^2 \frac{1}{M_a+M_b+M_c} \begin{bmatrix} M_b M_c \\ M_a M_c \\ M_a M_b \end{bmatrix} \tag{1}$$



(a) 实际等效模型



(b) 简化等效模型

图2 并联部分基频等效模型

Fig.2 Equivalent model of parallel part in fundamental frequency

$$\begin{bmatrix} M_a \\ M_b \\ M_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \dfrac{1}{Q_{La}-Q_{Lb}-Q_{Lc}} \\ \dfrac{1}{Q_{Lb}-Q_{La}-Q_{Lc}} \\ \dfrac{1}{Q_{Lc}-Q_{La}-Q_{Lb}} \end{bmatrix} \tag{2}$$

$$\left|v_{lxf}\right| = \sqrt{v_{laf}^2+v_{lbf}^2+v_{lcf}^2}/\sqrt{3} \tag{3}$$

其中,Q_{Lx}为负载侧三相无功功率。晶闸管控制电抗器的等效阻抗如下:

$$X_{TCR} = \frac{\pi}{2\pi-2\alpha+\sin(2\alpha)} X_{LTCR} \tag{4}$$

其中,α、X_{LTCR}分别为触发角和电抗器的阻抗。则TCLC的等效阻抗为:

$$\begin{bmatrix} X_{af} \\ X_{bf} \\ X_{cf} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \dfrac{\pi X_{Lf} X_{Cf}}{X_{Cf}\left[2\pi-2\alpha_a+\sin\left(2\alpha_a\right)\right]-\pi X_{Lf}} + X_{LC} \\ \dfrac{\pi X_{Lf} X_{Cf}}{X_{Cf}\left[2\pi-2\alpha_b+\sin\left(2\alpha_b\right)\right]-\pi X_{Lf}} + X_{LC} \\ \dfrac{\pi X_{Lf} X_{Cf}}{X_{Cf}\left[2\pi-2\alpha_c+\sin\left(2\alpha_c\right)\right]-\pi X_{Lf}} + X_{LC} \end{bmatrix} \tag{5}$$

其中,X_{Lf}、X_{Cf}、X_{LC}分别为补偿电感、补偿电容器和耦合电感的电抗。由式(5)可知,得到X_{xf}后,很难直接算出触发角度,因此在后续控制中,通过式(5)建立了X_{xf}和α_x的对应表格,根据X_{xf}查找对应晶闸管的触发角度。触发角以相量$\boldsymbol{v}_{lxf}-\boldsymbol{v}_h$为参考基准角,在实际控制中相量$\boldsymbol{v}_{lxf}$的角度可以直接测量,因此修正后的触发角为:

$$\begin{bmatrix} \alpha_{af} \\ \alpha_{bf} \\ \alpha_{cf} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \alpha_a \\ \alpha_b \\ \alpha_c \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} \theta_a \\ \theta_b \\ \theta_c \end{bmatrix} \tag{6}$$

其中，θ_x为电压通过TCLC时产生的角度差。根据附录中式(A2)可得：

$$\begin{bmatrix}\theta_a\\ \theta_b\\ \theta_c\end{bmatrix}=\begin{bmatrix}\arctan\left[\dfrac{X_{cf}-X_{bf}}{\sqrt{3}\left(X_{bf}+X_{cf}\right)}\right]\\ \arctan\left[\dfrac{X_{af}-X_{cf}}{\sqrt{3}\left(X_{af}+X_{cf}\right)}\right]\\ \arctan\left[\dfrac{X_{bf}-X_{af}}{\sqrt{3}\left(X_{bf}+X_{af}\right)}\right]\end{bmatrix}\tag{7}$$

通过负载无功功率、TCLC自身参数、负载实时电压等，由式(1)—(7)可得晶闸管的触发角度；负载无功功率通过文献[16]中瞬时无功功率理论方法求得；负载电压角度φ_x由锁相环获得。TCLC中2个反向并联晶闸管在各自的半个周期内触发导通：当$\varphi_x>\alpha_{xf}$时T_1触发；当$\varphi_x<180°-\alpha_{xf}$时$T_2$触发；当晶闸管电流过零时自动关断。TCLC的控制框图如图3所示。

2.2　并联侧有源部分控制方法

运用瞬时无功功率理论，可以分离出三相系统中有功功率、无功功率、谐波等成分。由三相电压v_{sx}和三相电流i_{sx}通过$abc/\alpha\beta$变换可得：

$$\begin{bmatrix}v_\alpha\\ v_\beta\end{bmatrix}=\sqrt{\frac{2}{3}}\begin{bmatrix}1 & -1/2 & -1/2\\ 0 & \sqrt{3}/2 & -\sqrt{3}/2\end{bmatrix}\begin{bmatrix}v_a\\ v_b\\ v_c\end{bmatrix}\tag{8}$$

$$\begin{bmatrix}i_\alpha\\ i_\beta\end{bmatrix}=\sqrt{\frac{2}{3}}\begin{bmatrix}1 & -1/2 & -1/2\\ 0 & \sqrt{3}/2 & -\sqrt{3}/2\end{bmatrix}\begin{bmatrix}i_a\\ i_b\\ i_c\end{bmatrix}\tag{9}$$

其中，v_α、v_β和i_α、i_β分别为$\alpha\beta$坐标系下的电压和电流α、β轴分量。

瞬时有功功率分量p和无功功率分量q分别为：

$$\begin{bmatrix}p\\ q\end{bmatrix}=\begin{bmatrix}v_\alpha & v_\beta\\ v_\beta & -v_\alpha\end{bmatrix}\begin{bmatrix}i_\alpha\\ i_\beta\end{bmatrix}\tag{10}$$

其中，p和q分别包含直流分量p_d、q_d和交流分量p_h、q_h。直流分量p_d、q_d代表三相坐标系中基频有功功率和基频无功功率；交流分量p_h和q_h包含谐波和负序电流。p经高通滤波器可得谐波电流和负序成分参考信号p_h，经过反变换可得电流参考信号：

$$\begin{bmatrix}i_{aref}\\ i_{bref}\\ i_{cref}\end{bmatrix}=\frac{1}{v_\alpha^2+v_\beta^2}\begin{bmatrix}1 & 0\\ -1/2 & \sqrt{3}/2\\ -1/2 & -\sqrt{3}/2\end{bmatrix}\begin{bmatrix}v_\alpha & v_\beta\\ v_\beta & -v_\alpha\end{bmatrix}\begin{bmatrix}p_h+\Delta_{dcp}\\ q\end{bmatrix}\tag{11}$$

其中，Δ_{dcp}为直流电压控制信号，以维持直流电压。

$$\Delta_{dcp}=-k_p\left(V_{DCref}-V_{DC}\right)\tag{12}$$

其中，V_{DCref}为直流电压参考值；k_p为比例调节系数。

通过反馈调节，维持直流电压的稳定，然后经过限幅环节，得到直流电压的控制信号，将电流参考值i_{xref}与实际补偿电流i_{cx}的差值Δi_{cx}作为滞环控制信号，滞环控制模块产生IGBT的控制信号。并联侧有源部分控制图如图4所示。图中，HPF为高通滤波器。

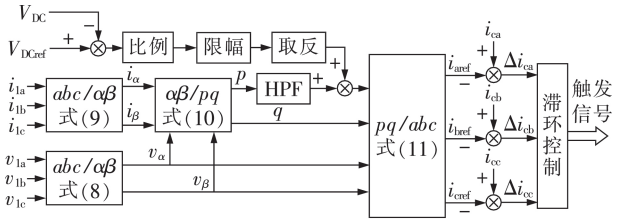


图4　有源部分控制框图

Fig.4　Control block diagram of active part

2.3　串联侧控制方法

串联部分控制方法如图5所示，采集v_{lx}和v_{tx}等信号，经过锁相环得到电源电压相角δ，以δ为基准将v_{lx}由abc三相坐标系变换到$dq0$坐标系中。将所得d轴分量与参考电压v_{ref}相减，得到理想与实际负载电压的差值Δv_d，通过反变换得到电压控制参考信号v_{xref}，将其与串联变压器二次侧的电压做差，得到控制信号Δv_{cx}。Δv_{cx}经过滞环控制模块，得到最终的驱动信号。

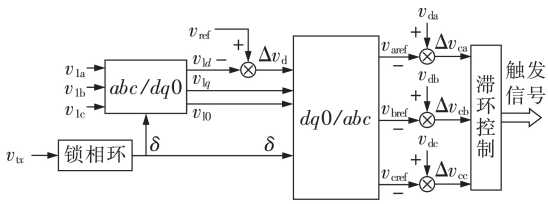


图5　串联侧控制框图

Fig.5　Control block diagram of series part

3　仿真验证

在MATLAB/Simulink仿真平台中对所提UPQC系统功能进行验证，仿真结构图如图1所示。仿真参数如下：电源电压为110 V，频率为50 Hz；串联部分C_{se}为1 μF，L_{se}为2 mH；并联部分L_c、L_f、C_f分别为5 mH、30 mH、160 μF；C_{CD}、V_{CD}分别为0.1 μF和

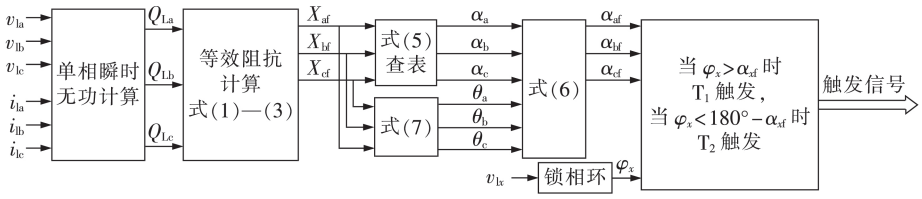


图3　TCLC控制框图

Fig.3　Control block diagram of TCLC

$110\sqrt{2}$ V。

图6为系统整体仿真波形，仿真时长0.2 s。在0.1 s时，使用三相可编程电源将电源电压幅值下降40%，在串联侧补偿作用下，负载侧电压依然维持在预设值。在0.05 s时，并联部分投入运行，表1为电源侧电流主要次数谐波含量。可以看出并联部分投入运行后，电源侧电流波形畸变率由17.25%下降到0.76%。通过图6中电源侧无功功率波形图可知，当并联部分投入运行后，电源侧的无功功率立即下降，到0.2 s时，电源侧无功功率降为0。在0.1 s电源侧电压跌落后，电源侧电流适当加大，用于维持电容电压。电压跌落时，串联侧开始动作，电容输出功率，使得电容电压下降，跌落结束后，在电容稳压控制作用下，直流侧电容电压逐渐恢复到预设值，其过程如图7所示。

图8为当电源电压含有谐波分量时的仿真波形图，通过三相可编程电源设置电源谐波，电源电压谐波含量如下：3次谐波含量为20%，初始相角为-25°，

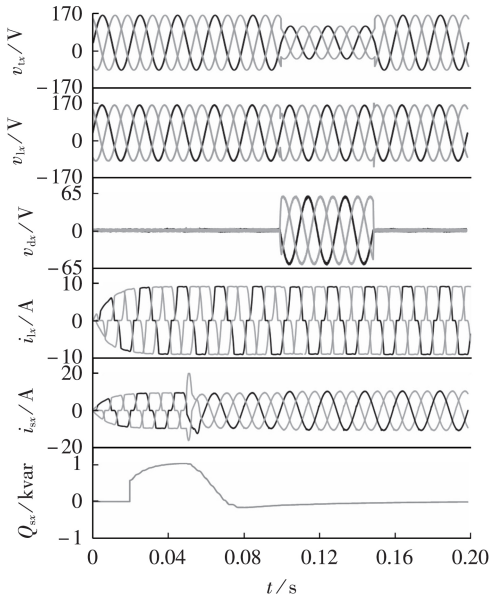


图6 系统仿真波形图

Fig.6 Simulative waveforms of system

表1 电源测电流主要次数谐波含量

Table 1 Harmonic content of main orders of source current

谐波次数	谐波含量/%		谐波次数	谐波含量/%	
	并联部分投入前	并联部分投入后		并联部分投入前	并联部分投入后
5	14.99	0.45	29	0.34	0.08
7	7.73	0.38	31	0.18	0.07
11	2.33	0.10	35	0.18	0.05
13	1.63	0.12	37	0.14	0.07
17	1.25	0.09	41	0.10	0.07
19	0.80	0.09	43	0.14	0.06
23	0.59	0.11	47	0.11	0.07
25	0.39	0.10	49	0.13	0.06

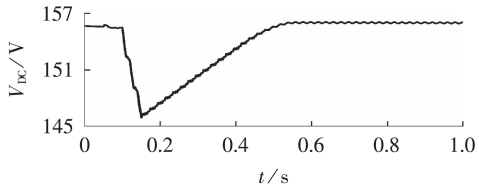


图7 直流侧电容电压

Fig.7 Voltage of DC capacitor

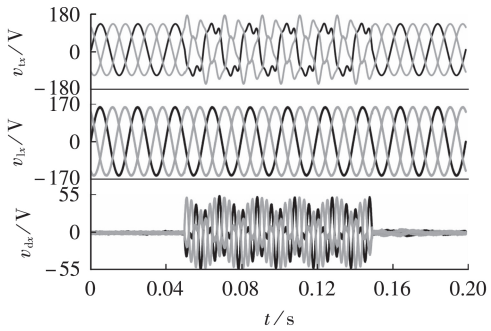


图8 电压谐波仿真波形图

Fig.8 Simulative waveforms of voltage harmonic

正序；5次谐波含量为15%，初始相角为35°，负序。可以看到在串联侧的补偿作用下，负载电压一直为标准正弦波。

以上的仿真结果表明在电压发生暂降，负载侧有谐波和无功分量的情况下，本文所提出的UPQC可以在比较低的直流侧电压下很好地解决这些电能质量问题。

4 结论

针对UPQC在运用中存在的直流侧电压幅值高、并联侧容量大和难以运用于较高电压等级等问题，本文提出一种在并联侧串联TCLC的新型UPQC结构，并着重分析了并联侧的原理，设计了TCLC和整体的控制方法。最后通过仿真分析，验证了这种结构在降低有源部分工作电压等级、直流侧电压以及减小有源部分容量等方面的可行性和有效性。

附录见本刊网络版(http://www.epae.cn)。

参考文献：

[1] 朱国锋，牟龙华. 多馈线型低压配电网分布式谐波治理的优化控制[J]. 电工技术学报，2016，31(9)：25-33.
ZHU Guofeng，MU Longhua. Optimal control of distributed harmonic compensation in low-voltage distribution network with multiple feeders[J]. Transactions of China Electrotechnical Society，2016，31(9)：25-33.

[2] 马宏忠，徐刚，宋树平，等. 配电网中谐波电流责任划分定量分析[J]. 电力自动化设备，2014，34(6)：44-49.
MA Hongzhong，XU Gang，SONG Shuping，et al. Quantitative analysis of harmonic current responsibility in distribution network[J]. Electric Power Automation Equipment，2014，34(6)：44-49.

[3] 张喆，李庚银，魏军强. 考虑分布式电源随机特性的配电网电压质量概率评估[J]. 中国电机工程学报，2013，33(13)：

150-156.
ZHANG Zhe, LI Gengyin, WEI Junqiang. Probabilistic evaluation of voltage quality in distribution networks considering the stochastic characteristic of distributed generators[J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(13): 150-156.
[4] 陈炜,艾欣,吴涛,等. 光伏并网发电系统对电网的影响研究综述[J]. 电力自动化设备,2013,33(2):26-32.
CHEN Wei, AI Xin, WU Tao, et al. Influence of grid-connected photovoltaic system on power network[J]. Electric Power Automation Equipment, 2013, 33(2): 26-32.
[5] AKAGI H. New trends in active filters for power conditioning [J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 1996, 32(6): 1312-1322.
[6] 何红玉,韩蓓,徐晨博,等. 交直流混合微电网一致性协调优化管理系统[J]. 电力自动化设备,2018,38(8):138-146.
HE Hongyu, HAN Bei, XU Chenbo, et al. Optimal management system of hybrid AC/DC microgrid based on consensus protocols[J]. Electric Power Automation Equipment, 2018, 38(8): 138-146.
[7] 杨健,唐飞,廖清芬,等. 考虑可再生能源随机性的微电网经济性与稳定性协调优化策略[J]. 电力自动化设备,2017,37(8):179-184,200.
YANG Jian, TANG Fei, LIAO Qingfen, et al. Microgrid economy and stability coordinated optimization considering randomness of renewable energy resource[J]. Electric Power Automation Equipment, 2017, 37(8): 179-184, 200.
[8] OOI B T, SALMON J C, DIXON J W, et al. A three-phase controlled-current PWM converter with leading power factor [J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 1987, 23(1): 78-84.
[9] BRENNA M, FARANDA R, TIRONI E, et al. A new proposal for power quality and custom power improvement: open UPQC [J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2009, 24(4): 2107-2116.
[10] CORREA M L F, AREDES M, PINTO J G, et al. Control algorithms based on the active and non-active currents for a UPQC without series transformers[J]. IET Power Electronics, 2016, 9(9): 1985-1994.
[11] MUNOZ J A, ESPINOZA J R, MORAN L A. Design of a modular UPQC configuration integrating a components economical analysis[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2009, 24(4): 1763-1772.
[12] KARANKI S B, GEDDADA N, MISHRA M K. A modified three-phase four-wire UPQC topology with reduced DC-link voltage rating[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2013, 60(9): 3555-3566.
[13] HAN B, BAE B, BAEK S, et al. New configuration of UPQC for medium-voltage application[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2006, 21(3): 1438-1444.
[14] 黄晓明,范志华,刘子文,等. 基于有功和无功功率协调分配的统一电能质量调节器控制策略[J]. 电力自动化设备,2018,38(3):177-183.
HUANG Xiaoming, FAN Zhihua, LIU Ziwen, et al. Control strategy of UPQC based on active and reactive power coordination distribution[J]. Electric Power Automation Equipment, 2018, 38(3): 177-183.
[15] WANG L, LAM C, WONG M. Unbalanced control strategy for a thyristor-controlled LC-coupling hybrid active power filter in three-phase three-wire systems[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2017, 32(2): 1056-1069.
[16] AKAGI H, KANAZAWA Y, NABAE A. Instantaneous reactive power compensators comprising switching devices without energy storage components[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 1984, 20(3): 625-630.

作者简介:

谭　真

谭　真(1994—),男,湖北利川人,硕士研究生,主要研究方向为电能质量综合治理(**E-mail**:310446605@qq.com);

罗隆福(1962—),男,湖南常德人,教授,博士研究生导师,博士,研究方向为现代电器设备的设计、优化及仿真、高压直流输电新技术和电能质量管理等(**E-mail**:llf_hnu@163.com);

崔贵平(1986—),男,湖南衡阳人,博士研究生,研究方向为电能质量综合治理(**E-mail**:stefaniecui@126.com)。

(编辑　王欣竹)

UPQC with coupled controllable reactors

TAN Zhen, LUO Longfu, CUI Guiping, HONG Weicheng, TIAN Ye
(College of Electrical and Information Engineering, Hunan University, Changsha 410000, China)

Abstract: Aiming at the problem that traditional UPQC (Unified Power Quality Controller) is difficult to adapt to high voltage network, a novel topology and control method of UPQC are proposed. The thyristor control reactor in parallel with capacitor are connected between the grid and the active part of the parallel side through TCLC (Thyristor-Controlled LC-coupling). By controlling the equivalent impedance of TCLC, reactive power is compensated and active power is balanced on the parallel side. The active part of the parallel side only needs to compensate the harmonic component. Finally, the correctness and effectiveness of the proposed UPQC structure are verified by simulation examples. The simulative results show that the proposed structure can greatly reduce the capacity of the active inverter on the parallel side, the working voltage level of the active side, the requirements of the switch tube, the loss during operation, and the manufacturing and operation costs of the device.

Key words: UPQC; thyristor control reactor; harmonic analysis; reactive power; dynamic voltage restorer

附录

在图 2（b）中，由基尔霍夫定理：

$$I_{\mathrm{caf}}+I_{\mathrm{cbf}}+I_{\mathrm{ccf}}=\frac{V_{\mathrm{laf}}-V_{\mathrm{h}}}{jX_{\mathrm{af}}}+\frac{V_{\mathrm{lbf}}-V_{\mathrm{h}}}{jX_{\mathrm{bf}}}+\frac{V_{\mathrm{lcf}}-V_{\mathrm{h}}}{jX_{\mathrm{cf}}}=0 \tag{A1}$$

其中，I_{cxf}、V_{lxf}、V_{h}、X_{xf} 分别为三相补偿电流、耦合点三相电压、公共点电压和 TCLC 等效阻感，由电压叠加定理。

$$V_{\mathrm{h}}=\frac{X_{\mathrm{bf}}X_{\mathrm{cf}}}{N}V_{\mathrm{laf}}+\frac{X_{\mathrm{af}}X_{\mathrm{cf}}}{N}V_{\mathrm{lbf}}+\frac{X_{\mathrm{af}}X_{\mathrm{bf}}}{N}V_{\mathrm{lcf}} \tag{A2}$$

$$N=X_{\mathrm{af}}X_{\mathrm{bf}}+X_{\mathrm{bf}}X_{\mathrm{cf}}+X_{\mathrm{cf}}X_{\mathrm{af}} \tag{A3}$$

由式（A1）、（A2）可得：

$$\begin{bmatrix} I_{\mathrm{caf}} \\ I_{\mathrm{cbf}} \\ \mathrm{I}_{\mathrm{ccf}} \end{bmatrix}=\frac{j}{N}\begin{bmatrix} -(X_{\mathrm{bf}}+X_{\mathrm{cf}}) & X_{\mathrm{cf}} & X_{\mathrm{bf}} \\ X_{\mathrm{cf}} & -(X_{\mathrm{af}}+X_{\mathrm{cf}}) & X_{\mathrm{af}} \\ X_{\mathrm{bf}} & X_{\mathrm{af}} & -(X_{\mathrm{af}}+X_{\mathrm{bf}}) \end{bmatrix}\begin{bmatrix} V_{\mathrm{laf}} \\ V_{\mathrm{lbf}} \\ V_{\mathrm{lcf}} \end{bmatrix} \tag{A4}$$

假设 TCLC 部分补偿的功率 $S_{\mathrm{cxf}}=P_{\mathrm{cxf}}+jQ_{\mathrm{cxf}}$，$P_{\mathrm{cxf}}$、$Q_{\mathrm{cxf}}$ 分别为补偿的有功功率和无功功率，且 $S_{\mathrm{cxf}}=V_{\mathrm{lxf}}I_{\mathrm{cxf}}^{*}$，$I_{\mathrm{cxf}}^{*}$ 为 I_{cxf} 的共轭，由此可得：

$$\begin{bmatrix} I_{\mathrm{caf}} \\ I_{\mathrm{cbf}} \\ I_{\mathrm{ccf}} \end{bmatrix}=\begin{bmatrix} \left[\left(P_{\mathrm{caf}}+jQ_{\mathrm{caf}}\right)/V_{\mathrm{laf}}\right]^{*} \\ \left[\left(P_{\mathrm{cbf}}+jQ_{\mathrm{cbf}}\right)/V_{\mathrm{lbf}}\right]^{*} \\ \left[\left(P_{\mathrm{ccf}}+jQ_{\mathrm{ccf}}\right)/V_{\mathrm{lcf}}\right]^{*} \end{bmatrix} \tag{A5}$$

负载侧三相电压的实时方根均值为：$\overline{V}_{\mathrm{laf}}^{2}=\overline{V}_{\mathrm{lbf}}^{2}=\overline{V}_{\mathrm{lcf}}^{2}=\sqrt{v_{\mathrm{laf}}^{2}+v_{\mathrm{lbf}}^{2}+v_{\mathrm{lcf}}^{2}}\Big/\sqrt{3}$ [16]。因为要补偿全部的无功功率且三相有功功率要平衡，即：

$$\begin{cases} P_{\mathrm{caf}}=-\left[P_{\mathrm{La}}-\left(P_{\mathrm{La}}+P_{\mathrm{Lb}}+P_{\mathrm{Lc}}\right)/3\right] \\ P_{\mathrm{cbf}}=-\left[P_{\mathrm{Lb}}-\left(P_{\mathrm{La}}+P_{\mathrm{Lb}}+P_{\mathrm{Lc}}\right)/3\right] \\ P_{\mathrm{ccf}}=-\left[P_{\mathrm{Lc}}-\left(P_{\mathrm{La}}+P_{\mathrm{Lb}}+P_{\mathrm{Lc}}\right)/3\right] \end{cases} \tag{A6}$$

$$Q_{\mathrm{cxf}}=-Q_{\mathrm{L}x} \tag{A7}$$

其中，$Q_{\mathrm{L}x}$ 和 $P_{\mathrm{L}x}$ 分别为负载侧的无功功率和有功功率。