

统一电能质量调节器串联注入变压器建模分析与设计

沈虹^{1,2}, 万健如³

(1. 燕山大学电气工程及自动化学院, 河北 秦皇岛 066004; 2. 河北省电力电子节能与传动控制重点实验室, 河北 秦皇岛 066004; 3. 天津大学自动化学院, 天津 300072)

摘要: 针对目前串联注入变压器尚无相应的国家标准, 进行设计时具有一定的盲目性的问题, 在分析其工作原理的基础上, 建立注入变压器等效电路并推导传递函数, 据此分析注入变压器各个参数对统一电能质量调节器(UPQC)补偿特性的影响。以串联侧提供能量最小为前提提出注入变压器容量、变比、损耗和阻抗压降等参数的选取原则, 为UPQC研究人员和变压器制造商提供了参考理论依据。通过变电成本分析和实验验证了该选取原则的可行性与合理性。

关键词: UPQC; 注入变压器; 传递函数; 参数选取

Modeling analysis and design of series injection transformer in UPQC

SHEN Hong^{1,2}, WAN Jian-ru³

(1. Institute of Electrical Engineering, Yanshan University, Qinhuangdao 066004, China; 2. Hebei Key Laboratory of Power Electronics Energy-saving and Transmission Control, Qinhuangdao 066004, China; 3. College of Automation, Tianjin University, Tianjin 300072, China)

Abstract: In order to get rid of the blindness in series injection transformer design because of lacking of national standards, this paper, based on the analysis of the work principle of injection transformer, establishes equivalent circuit and deduces transfer function and analyses the effect of parameters of injection transformer on the compensation characteristic of the unified power quality conditioner(UPQC). The selection principle of parameters including injection transformer capacity, ratio, loss and impedance voltage drop based on minimum energy provided by series side is proposed, which provides reference and theoretic basis for UPQC researchers and transformer manufacturer. Finally, product cost analysis and experimental results verify the feasibility and rationality of the principle.

This work is supported by National Natural Science Foundation of China (No. 50707028 and No. 60874077).

Key words: UPQC; injection transformer; transfer function; parameters selection

中图分类号: TM774 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2011)03-0067-07

0 引言

电力系统中存在的非线性负荷, 大功率负载投切等造成电网电压、电流发生畸变, 其中主要包括闪变、谐波、三相电压不对称、电压骤升、骤降等。随着电力电子技术的发展, 利用高性能电力电子装置提高电能质量已成为可能。统一电能质量调节器(Unified Power Quality Conditioner, UPQC)集电电压型补偿装置、电流型补偿装置和储能装置于一体,

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(50707028, 60874077); 国家质检总局公益性行业科研专项经费项目(200910097); 河北省科技厅科学技术研究与发展计划项目(10213943); 河北省高等学校科学研究计划项目(2010161); 秦皇岛市科学技术研究与发展项目(201001A080)

统一实现多重电能质量调节功能而备受关注。其串联侧部分主要为解决用户端供电电压畸变问题而设计^[1-2]。通过调节串联注入变压器改变原副边电压与电流, 使串联变流器的型号选择更加灵活; 同时变压器还起到隔离变流器和电网的作用。但是变压器的参数设计比较复杂, 确定其容量、变比、损耗、阻抗压降等参数需要考虑负荷容量、电压骤降(骤升)特征、变流器参数、储能单元容量、补偿策略以及成本等因素^[3]。这些因素决定了串联注入变压器的设计与普通电力变压器有所不同。目前针对UPQC的研究主要集中于拓扑、补偿策略以及先进的控制算法等方面, 例如文献[4-7]研究了UPQC的控制方法, 文献[8]对直流侧电压控制建模进行了深入探讨, 文献[9-12]则主要讨论了电压波动补偿策略。而串联注入变压器参数选取及设计等方面则少

有文献涉及，文献[13]介绍了一种仅考虑损耗优化的注入变压器设计方法，对于变压器的容量、变比、阻抗压降等其他重要参数的选取与确定未作说明。文献[14]则只讨论注入变压器过饱和抑制问题。由于还没有串联注入变压器的国家标准，给设计工作带来了一定的盲目性。本文在阐述注入变压器在 UPQC 串联侧的工作原理基础上，推导变压器传递函数，并依此分析变压器参数对 UPQC 性能的影响，从而提出注入变压器参数的选取原则并进行实验验证。

1 UPQC 的工作原理

UPQC 通过一对串、并联型变流器按照一定的联结方式组合而成，其结构形式有多种，多采用左串-右并结构，如图 1 所示。

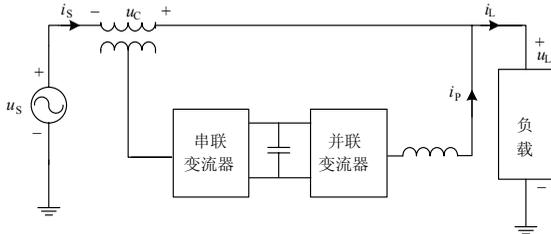


图 1 UPQC 主电路拓扑
Fig.1 Topology of UPQC

并联变流器用于补偿负载电流中的谐波、无功电流分量，抑制非线性负载引起的电流畸变对电源侧的污染，保证线路电流为标准的正弦波。同时给直流电容充电，保持直流侧电压值恒定。串联变流器用于补偿和调节负载端电压，抑制电源电压的波动对负载电压的影响。当电源电压发生骤降（骤升）时，串联变流器检测实际电源电压与参考电压之间的差值，通过串联注入变压器注入一个和差值反相的电压量与之相抵消，以保持负载端电压为参考正弦电压，实现改善系统电能质量的目的。注入变压器根据具体情况可采用升压型也可选择降压型。若将接入电源的一侧作为副边，当电源电压较低，波动率较小时可选择降压变压器，降低开关管的电流、减少损耗、提高控制精度；当电源电压较高，相对波动率较大时，选择升压变压器，从而降低直流侧电容的电压，便于开关管与直流电容的选取与安全运行。通常的分析常将注入变压器理想化，实际上变压器的阻抗大小将直接影响补偿的效果。另外注入变压器的损耗大小不仅影响其本身的寿命，也会关系用户的经济效益。因此注入变压器的合理选择与设计显得非常重要^[14]。

2 变压器工作状态分析及建模

2.1 注入变压器两种工作状态

UPQC 串联侧注入变压器和常规电力变压器相比较，它们的工作状态有很大差别。注入变压器串联在电源和被保护的敏感负荷中间，当电源发生电压骤降（骤升）时刻，注入补偿电压使得负荷侧电压变化在规定的范围内。其工作状态有两种，如图 2 所示。

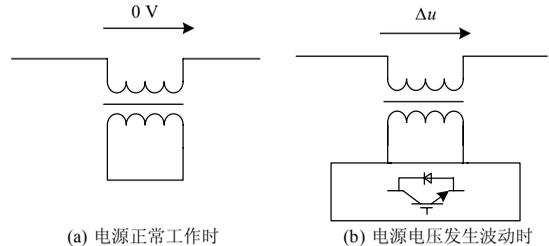


图 2 UPQC 串联侧的两种工作状态

Fig.2 Two kinds of operating mode in series of UPQC

图 2 (a) 为电源正常供电情况下，串联变流器零电压注入。此时可以等效为线路中串入了变压器的漏抗。变压器原边短路运行，副边流通电源电流，此时处于额定负载运行状态。原边电压几乎为零，励磁电流很小，因此空载损耗也很小，和负载损耗相比可以忽略。图 2 (b) 为电源侧发生电压骤降（骤升）的情况。串联变流器控制系统检测到电压骤降（骤升）发生后，根据控制策略注入相应的补偿电压。此时，注入变压器除有负载损耗外，还增加了与注入电压大小相关的空载损耗。它与电压骤降（骤升）的发生频率、持续时间（典型时间为 200 ms）、骤降（骤升）程度（绝大部分电压骤降（骤升）幅度不超过 30%）有密切关系，在总损耗中占一定比例。考虑到串联变流器的整个运行过程中，注入变压器的负载损耗在总损耗中占有绝大部分份额，因此降低负载损耗是串联注入变压器提高效率设计的出发点。

2.2 变压器模型

对 UPQC 原理分析时通常假设变压器为理想状态，但是实际变压器存在电阻与漏抗，这势必会对系统造成影响。实际注入变压器的等效电路如图 3 所示。图中， u_c 为串联变流器输出电压； u_s 为电源电压； u_L 为负载电压； Δu 为串联变压器副边电压， i_1 为变压器原边电流； i_s 为电源电流， i_0 为变压器励磁电流； i_L 为负载电流； R_1 、 R_2 分别为变压器原、副边等效电阻； L_1 、 L_2 分别为变压器原、副边等效漏抗； R_m 、 L_m 分别为变压器等效励磁电阻、等效励磁电抗； z_L 为负载阻抗。

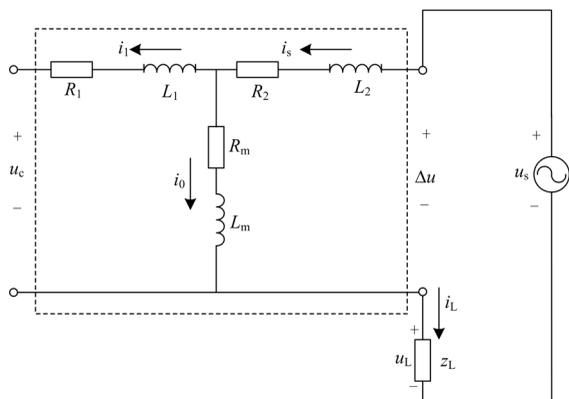


图3 UPQC 串联侧注入变压器等效电路图

Fig.3 Equivalent circuit of injection transformer in series of UPQC

由图3列电压、电流回路方程,可得到以下关系式:

$$u_c + z_1 i_1 = u_m \quad (1)$$

式中,原边等效阻抗 $z_1 = R_1 + j\omega L_1$ 。

$$u_m + z_2 i_s = \Delta u \quad (2)$$

式中,副边等效阻抗 $z_2 = R_2 + j\omega L_2$ 。

$$u_m = z_m i_0 \quad (3)$$

式中,变压器等效励磁阻抗 $z_m = R_m + j\omega L_m$ 。

$$i_1 = i_s - i_0 \quad (4)$$

$$u_s + \Delta u = u_L \quad (5)$$

由于 $i_s = i_L$, 因此有

$$i_s = \frac{u_L}{z_L} = \frac{-u_s - \Delta u}{z_L} \quad (6)$$

式中, $z_L = R_L + j\omega L_L$ 。

由式(1)、(2)可推得

$$\Delta u = z_2 i_s + u_c + z_1 i_1 \quad (7)$$

由式(1)、(3)和式(4)可推得

$$i_1 = \frac{z_m i_s - u_c}{z_m + z_1} \quad (8)$$

将式(6)、(8)带入公式(7),可得到

$$\begin{aligned} \Delta u &= z_2 i_s + u_c + \frac{z_1 z_m i_s - z_1 u_c}{z_m + z_1} = \\ &= \frac{(z_m + z_1) z_2 + z_1 z_m}{z_m + z_1} i_s + u_c - \frac{z_1 u_c}{z_m + z_1} = \\ &= \frac{((z_m + z_1) z_2 + z_1 z_m) u_s}{(z_m + z_1) z_L} \end{aligned}$$

$$\frac{((z_m + z_1) z_2 + z_1 z_m) \Delta u}{(z_m + z_1) z_L} + \frac{z_m u_c}{z_m + z_1} \quad (9)$$

整理等号两边 Δu , 得到

$$\Delta u = \frac{z_m (z_1 + z_2) + z_1 z_2}{z_1 z_2 + z_L z_1 + z_m (z_1 + z_2 + z_L)} u_s + \frac{z_m z_L}{z_1 z_2 + z_L z_1 + z_m (z_1 + z_2 + z_L)} u_c \quad (10)$$

若仅考虑 Δu 与 u_c 之间的传递关系,同时考虑到 $z_m \gg z_1, z_2$, 可以有以下模型简化公式:

$$G(j\omega) \approx \frac{R_L + j\omega L_L}{R_1 + R_2 + R_L + j\omega(L_1 + L_2 + L_L)} \quad (11)$$

$$|G(j\omega)| \approx \frac{\sqrt{R_L^2 + \omega^2 L_L^2}}{\sqrt{(1 + \frac{R_1}{R_L} + \frac{R_2}{R_L})^2 R_L^2 + \omega^2 L_L^2 (1 + \frac{L_1}{L_L} + \frac{L_2}{L_L})^2}} \quad (12)$$

$$\angle G(j\omega) = \arctg(\frac{\omega L_L}{R_L}) - \arctg(\frac{\omega(L_1 + L_2 + L_L)}{R_1 + R_2 + R_L}) \quad (13)$$

如果变压器的漏抗和导线电阻很小,即 $L_L \gg L_1, L_2$; $R_L \gg R_1, R_2$, 则有 $|G(j\omega)|=1$, $\angle G(j\omega)=0$, 此时变压器不发生幅值衰减和相移。因此在设计变压器时要尽量减小导线电阻与漏抗。

3 变压器参数设计

串联侧输出补偿电压是经过串联变压器注入系统实施补偿的,它在很大程度上影响着电压补偿的质量。变压器的主要参数有:容量、变比、电压等级、温升、损耗、阻抗压降等。对系统影响最大的是容量、变比、损耗和阻抗压降。

3.1 变压器容量计算

为了便于分析先假设电网为单位功率因数、忽略开关管的损耗、变压器为理想变压器。图4为UPQC单相基波等效电路,图5为其对应的相量图。

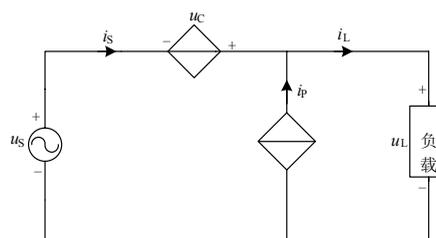


图4 UPQC 单相等效电路图

Fig.4 Single-phase equivalent circuit of UPQC

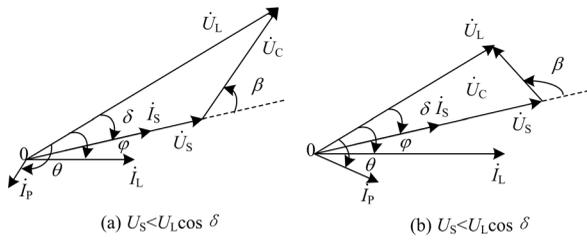


图 5 电网电压波动时 UPQC 单相基波相量图

Fig.5 Single-phase fundamental wave vectogram of UPQC when the power grid voltage fluctuates

根据图 5 相量图，串联侧的复功率：

$$\bar{S}_C = P_C + jQ_C \quad (14)$$

其中：串联侧有功功率 $P_C = U_C I_S \cos \beta$ ；无功功率 $Q_C = U_C I_S \sin \beta$ 。

可推得串联侧提供有功功率和无功功率：

$$\begin{cases} |P_C| = |I_S U_C \cos \beta| = |I_S (U_L \cos \delta - U_S)| \\ |Q_C| = I_S U_L \sin \delta \end{cases} \quad (15)$$

串联侧的容量为：

$$\begin{aligned} S_C &= \sqrt{P_C^2 + Q_C^2} = \\ &= I_S \sqrt{(U_L \cos \delta - U_S)^2 + (U_L \sin \delta)^2} = \\ &= I_S \sqrt{U_L^2 + U_S^2 - 2U_S U_L \cos \delta} = \\ &= \frac{U_L I_L}{U_S} \cos \varphi \sqrt{U_L^2 + U_S^2 - 2U_S U_L \cos \delta} \quad (16) \end{aligned}$$

(1) 当 $U_S < U_L \cos \delta$ 时，取 $\delta = \varphi$ ，串联侧提供有功最小，可实现最小能量补偿。此时串联侧单相电路容量为：

$$S_C = \frac{U_L I_L}{U_S} \cos \varphi \sqrt{U_L^2 + U_S^2 - 2U_S U_L \cos \varphi} \quad (17)$$

(2) 当 $U_S \geq U_L \cos \delta$ 时，取 $\delta = 0$ 。串联侧提供有功最小，可实现最小能量补偿。此时串联侧单相电路容量为：

$$S_C = \frac{U_L I_L}{U_S} \cos \varphi |U_L - U_S| \quad (18)$$

由于

$$|U_L - U_S| \geq \sqrt{U_L^2 + U_S^2 - 2U_S U_L \cos \varphi} \quad (19)$$

因此按 $U_S < U_L \cos \varphi$ 情况下的串联侧电路容量公式 (17) 计算即可，在此基础上还应考虑变压器本身的损耗。

3.2 变压器变比的确定

变压器一方面将变流器串入负载电路，补偿电

源电压跌落；另一方面，它又使变流器与负载电路相隔离。除此之外，它还起到变换参数的作用。如果变压器变比为 $n:1$ （连接在变流器一侧为变压器的原边），当 n 大于 1 时，变流器电流为电源电流的 $1/n$ ，从而降低对开关器件的电流要求。但是，变流器需要产生的补偿电压增大为电源电压跌落的 n 倍，这就使变流器直流侧电压也相应增高，从而使器件承受的电压变大。当 n 小于 1 时，情况则相反。因此，可结合电源电压波动的情况，对变压器变比进行选择。串联注入变压器的变比主要取决于串联侧的补偿范围、直流电压和输出最大补偿电压时的调制度。设 PWM 变流器的最大调制度（考虑基波情况）为 M ；直流侧电压为 U_{dc} 。

串联变流器能输出的最大补偿电压为：

$$U_{cmax} = \frac{MU_{dc}}{\sqrt{2}} \quad (20)$$

若电源最大波动范围为 d_{max} ，要将其全部补偿则应有：

$$U_{cmax} \geq nU_L d_{max} \quad (21)$$

由以上两式可得变压器的变比为：

$$n \leq \frac{MU_{dc}}{\sqrt{2}U_L d_{max}} \quad (22)$$

上述分析是在忽略变流器开关损耗、变压器损耗以及阻抗压降等理想情况下得出的。考虑上述因素的影响在实际选择变压器时应留有一定余量。

3.3 阻抗压降计算

根据图 3 可得变压器的阻抗压降为：

$$\Delta U' = I_S \sqrt{(R_1 + R_2)^2 + (L_1 + L_2)^2 \omega^2} \quad (23)$$

为维持负荷侧电压稳定，需尽量降低注入变压器的阻抗压降。可根据控制算法和电压 THD (Total Harmonic Distortion) 限值及电压波动率确定。

3.4 损耗计算

变压器损耗的确定同 20 年变电成本 C 有关：

$$C = C_0(1+p)^{20} + [T_0 P_0 + T_k P_k] \times e \times [(1+p)^{20} + (1+p)^{19} + \dots + (1+p)] \quad (24)$$

式中： C_0 为变压器售价； p 为年利率； T_0 为空载损耗运行等效时间； P_0 为空载损耗； T_k 为负载等效运行时间； P_k 为负载损耗； e 为每度电费。

对于普通电力变压器来说，只要通电不管是否达到额定状态，空载损耗都存在，所以 $T_0=8600$ h，即相当于空载率为 100%。而负载率一般为 25%，

所以 $T_k=2\ 200\ h$ 。对于 UPQC 中的注入变压器,工作情况根据前述分析则有很大不同,其负载率为 100%,负载损耗应比同容量电力变压器要低。而空载率要视电源波动频率而定。对于波动频繁电源,其空载率高,空载损耗宜选取小,反之可适当增大。本文负载损耗参照同容量电力变压器的 1/4 选取,空载损耗参照同容量电力变压器 2~3 倍选取。

4 实验验证与分析

具体参数为:工频 50 Hz;电源相电压有效值 $U_s=220\ V$;负载功率为 5.4 kW;负载相电流有效值 $I_L=10.5\ A$; $\cos\varphi=0.8$;直流侧电压 $U_{dc}=900\ V$ 。开关管工作频率为 12.8 kHz,输入电压波动率 $d=30\%$ 。

可求得变压器容量:

$$S_s = 3I_s \sqrt{U_L^2 + U_s^2 - 2U_L U_s \cos\varphi} = \frac{3U_L I_L \cos\varphi}{U_s} \sqrt{(U_L - U_s)^2 + 2U_L U_s (1 - \cos\varphi)} = 4\ 818\ VA \quad (25)$$

根据 GBT10228-2008 标准^[15],普通电力变压器容量小于 30 kVA 的空载损耗大于 0.73%,负载损耗大于 3%,可计算出 UPQC 串联侧注入变压器空载损耗:

$$P_0 = 5000 \times 0.9\% \times 2.6 = 117\ W \quad (26)$$

注入变压器负载损耗:

$$P_k = 5000 \times 3.5\% / 4 = 44\ W \quad (27)$$

考虑注入变压器损耗以及变流器本身损耗的 UPQC 串联侧容量取 5 kVA。

$$\text{变比为 } n \leq \frac{MU_{dc}}{\sqrt{2}U_L d_{\max}} = 5 \text{。此时调制度 } M=0.6 \text{。}$$

综合考虑阻抗压降取 1%,其影响可通过补偿算法进行调整。

参照 GBT10228-2008 标准设计一款容量为 5 kVA,电压等级为 220/44、连接方式为 Yyn0 的普通电力变压器,同时依据本文提出的参数选取原则设计同款 UPQC 串联注入变压器。将二者设计结果对比列表,如表 1 所示。

表中计算变电成本采用的数据具体如下:利息 (2.25%)、铜线 (58 元/kg)、硅钢片 (37.5 元/kg)、电费 (0.6 元/度),均以当前价格为准。从表 1 可看出,注入变压器的设计结果符合本文提出的变压器参数选取原则,其阻抗压降小于同容量普通电力变压器的相应值,成本也略低。

表 1 普通电力变压器与注入变压器设计结果比较

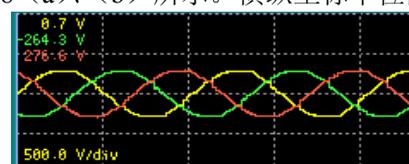
Tab.1 Comparison of general electric power transformer and injection transformer

参数	普通电力变压器	注入变压器
负载损耗 / W	147	42
空载损耗 / W	52	112
阻抗压降 / %	3.5	0.97
磁通密度 / T	1.66	1.52
铁心直径 / mm	60	90
窗高及中心距 / mm	200/130	200/150
原/副边电流密度 / (A/mm ²)	2.01/2.03	0.875/0.97
原/副边线圈匝数 / 匝	250/50	120/24
原边导线规格 / mm	1.12×3.55/1.57×4	1.9×4.75/2.35×5.2
副边导线规格 / mm	2×9.5/2.45×9.95	3×13.2/3.45×13.65
绕组铜重 / kg	15.5	21
铁心材料	DQ-147	DQ-147
铁心重 / kg	24.4	57
20 年变电成本 / 元	19 287	12 987

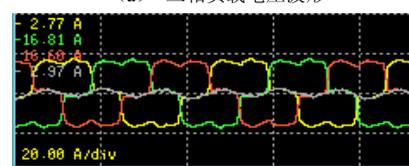
为验证注入变压器参数选择原则的合理性,构造 UPQC 实验样机,进行实验验证。UPQC 补偿前三相负载电压及电源电流波形如图 6 所示。其中图 6 (a) 为电源电压跌落前三相负载电压波形,横坐标单位为 10 ms/格,纵坐标单位为 500 V/格。图 6 (b) 为含有谐波及无功成分的三相电源电流波形,横坐标单位为 10 ms/格,纵坐标单位为 20 A/格。

UPQC 补偿前负载电压与电源电流测量结果如图 7 所示。

UPQC 补偿后三相负载电压及电源电流波形分别如图 8 (a)、(b) 所示。横纵坐标单位同图 6。



(a) 三相负载电压波形



(b) 三相电源电流波形

图 6 补偿前负载电压及电源电流波形

Fig. 6 Waveform of load voltage and source current without compensation

U	rms [V]	peak+[V]	peak-[V]	THD [%]
ch1	218.6	301.7	-301.4	5.9
ch2	214.2	293.1	-293.0	5.7
ch3	216.9	301.2	-301.1	5.4
ch4	-----	-----	-----	-----

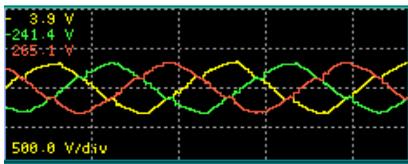
I	rms [A]	peak+[A]	peak-[A]	ITHD [%]
ch1	11.33	15.19	-15.60	25.4
ch2	11.19	15.24	-15.41	24.9
ch3	10.93	14.72	-14.64	26.5
ch4	-----	-----	-----	-----

	P [W]	S [VA]	Q [var]	PF
ch1	-2.358k	2.477k	-0.759k	-0.952
ch2	-2.289k	2.397k	-0.711k	-0.955
ch3	-2.255k	2.371k	-0.733k	-0.951
sum	-6.90k	7.25k	-2.20k	-0.953

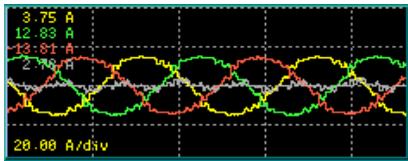
Uave [V]	Iave [A]
216.5	11.17

图 7 补偿前三相负载电压与电源电流测量结果

Fig.7 Measurement result of three-phase load voltage and source current without compensation



(a) 三相负载电压波形



(b) 三相电源电流波形

图 8 补偿后负载电压及电源电流波形

Fig.8 Waveform of load voltage and source current with compensation

UPQC 补偿后负载电压与电源电流测量结果如图 9 所示。

从实验波形及测量结果可看出，注入变压器很好地实现了 UPQC 串联侧的电压补偿，负载电压并没有受到电源电压跌落的影响，依旧保持跌落前幅

U	rms [V]	peak+[V]	peak-[V]	THD [%]
ch1	218.2	329.5	-330.0	6.8
ch2	213.9	323.1	-323.9	6.9
ch3	217.0	326.8	-327.6	6.9
ch4	-----	-----	-----	-----

I	rms [A]	peak+[A]	peak-[A]	ITHD [%]
ch1	10.73	20.27	-20.31	4.3
ch2	10.25	19.83	-19.52	4.7
ch3	10.31	20.12	-19.85	5.3
ch4	-----	-----	-----	-----

	P [W]	S [VA]	Q [var]	PF
ch1	-2.329k	2.341k	-0.237k	-0.995
ch2	-2.179k	2.192k	-0.302k	-0.994
ch3	-2.224k	2.237k	-0.241k	-0.994
sum	-6.73k	6.77k	-0.78k	-0.994

Uave [V]	Iave [A]
216.4	10.43

图 9 补偿后负载电压与电源电流测量结果

Fig.9 Measurement result of three-phase load voltage and source current with compensation

值。电源电流的 THD 值也从 25.4%、24.9%、26.5% 下降到 4.3%、4.7%、5.3%。实验结果证明，注入变压器各个参数的选取原则是合理可行的。UPQC 串联侧的补偿电压通过注入变压器及时补偿到负载端，同时，基于 20 年变电成本的原则提高了注入变压器的性价比。

5 结语

UPQC 因集电压型补偿装置、电流型补偿装置和储能装置于一体，实现多重电能质量调节功能而备受关注。串联侧注入变压器是其重要的组成部分，性能优劣直接影响串联侧的补偿效果。本文首先阐述了注入变压器在 UPQC 串联侧的作用，论证了注入变压器与一般电力变压器不同。在建立注入变压器等效电路的基础上，着重推导其传递函数，分析影响注入变压器性能的几个关键参数，并给出了这些参数的选取原则。实验结果表明，本文提出的串联注入变压器参数选取原则是合理的、可行的，不仅满足了 UPQC 改善电能质量的需要，而且实现了低成本高性能的宗旨。

参考文献

- [1] Fujita H, Akagi H. The unified power quality conditioner: the integration of series-and shunt-active filters[J]. IEEE Trans on Power Electronics, 1998, 13 (2): 315-322.
- [2] 胡家为, 李国杰, 马锋. 无隔离环节三相UPQC的故障限流保护的仿真研究[J]. 电力系统保护与控制, 2008, 36 (15):14-17.
HU Jia-wei, LI Guo-jie, MA Feng. Protection simulation study of over current for a three-phase unified power quality controller without isolating circuit[J]. Power System Protection and Control, 2008, 36 (15):14-17.
- [3] 王同勋, 薛禹胜, CHOI S S. 动态电压恢复器研究综述[J]. 电力系统自动化, 2007, 31(9):101-107.
WANG Tong-xun, XUE Yu-sheng, CHOI S S. Review of dynamic voltage restorer[J]. Automation of Electric Power Systems, 2007, 31(9):101-107.
- [4] 万健如, 裴玮, 张国香. 统一电能质量调节器同步无差拍控制方法研究[J]. 中国电机工程学报, 2005 (13): 63-67.
WAN Jian-ru, PEI Wei, ZHANG Guo-xiang. Research on synchronization deadbeat control algorithm for unified power quality conditioner[J]. Proceedings of the CSEE, 2005(13): 63-67.
- [5] 巫付专, 万健如, 沈虹. 基于UPQC主电路容量最小的控制策略的研究[J]. 电力系统保护与控制, 2010, 38 (11):1-5.
WU Fu-zhuan, WAN Jian-ru, SHEN Hong. Research of control strategy based on the UPQC minimum capacity

- method[J]. Power System Protection and Control, 2010, 38 (11):1-5.
- [6] Tey L H, So P L, Chu Y C. Unified power quality conditioner for improving power quality using ANN with hysteresis control[C]. //International Conference on Power System Technology. 2004(2): 1441-1446.
- [7] 张志超, 魏富建, 王义峰. 单周期控制策略在统一电能质量调节器中的应用研究[J]. 电力系统保护与控制, 2009, 37 (22): 28-33.
ZHANG Zhi-chao, WEI Fu-jian, WANG Yi-feng. Applied research on one-cycle control method of unified power quality conditioner[J]. Power System Protection and Control, 2009, 37 (22):28-33.
- [8] 张辉, 刘进军, 黄新明, 等. 通用电能质量控制器直流侧电压控制建模与分析[J]. 电工技术学报, 2007, 22(4): 144-149.
ZHANG Hui, LIU Jin-jun, HUANG Xin-ming, et al. Modeling and analysis of DC link voltage control for universal power quality controllers[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2007, 22(4): 144-149.
- [9] 周晖, 齐智平. 动态电压恢复器检测方法和补偿策略综述[J]. 电网技术, 2006, 30(6): 23-29.
ZHOU Hui, QI Zhi-ping. A survey on detection algorithm and restoring strategy of dynamic voltage restorer[J]. Power System Technology, 2006, 30(6): 23-29.
- [10] Etxeberria-Otadui I, Viscarret U, Bacha S, et al. Evaluation of different strategies for series voltage sag compensation[C]. //IEEE Power Electronics Specialists Conference. 2002, 4: 1797-1802.
- [11] 袁川, 杨洪耕. 动态电压恢复器的改进最小能量控制[J]. 电力系统自动化, 2004, 28(21): 49-53.
YUAN Chuan, YANG Hong-geng. Advanced minimum-energy control of dynamic voltage restorer[J]. Automation of Electric Power Systems, 2004, 28(21): 49-53.
- [12] 肖湘宁, 徐永海, 刘连光. 考虑相位跳变的电压凹陷动态补偿控制器研究[J]. 中国电机工程学报, 2002, 22(1): 64-69.
XIAO Xiang-ning, XU Yong-hai, LIU Lian-guang. Research on mitigation methods of voltage sag with phase angle jump[J]. Proceedings of the CSEE, 2002, 22(1): 64-69.
- [13] 尹忠东, 陈安源. 动态电压调节器串联注入变压器的一种设计方法[J]. 变压器, 2005, 42(9): 14-19.
YIN Zhong-dong, CHEN An-yuan. A design method of dynamic voltage restorer with series connection of injection transformer[J]. Transformer, 2005, 42(9):14-19.
- [14] 尹忠东, 张卫华, 韩民晓. 动态电压恢复器注入变压器过饱和抑制[J]. 电力系统自动化, 2004, 28(24): 28-31.
YIN Zhong-dong, ZHANG Wei-hua, HAN Min-xiao. Over-saturation suppression to dynamic voltage restorer injection transformer[J]. Automation of Electric Power Systems, 2004, 28(24): 28-31.
- [15] 中国国家标准化管理委员会. GBT 10228-2008 干式电力变压器技术参数和要求[S]. 2008.
SAC Standardization Administration of China. GBT 10228-2008 specification and technical requirements for dry-type power transformers[S]. 2008.

收稿日期: 2010-02-11; 修回日期: 2010-04-20

作者简介:

沈虹 (1978-), 女, 讲师, 主要研究方向为电能质量补偿与智能控制; E-mail: shenhong@ysu.edu.cn

万健如 (1950-), 男, 教授, 博导, 主要研究方向为电梯技术, 计算机控制。

(上接第 66 页 continued from page 66)

- [12] 宋联庆, 张锋, 晁勤, 等. 并网风电场穿透功率极限确定方法探讨[J]. 可再生能源, 2009, 27 (3): 36-39.
SONG Lian-qing, ZHANG Feng, CHAO Qin, et al. Discussion on the penetration limit of the wind farm in grid[J]. Renewable Energy Resources, 2009, 27 (3): 36-39.
- [13] SAAD-SAOUD Z, JENKINS N. Models for predicting flicker induced by large wind turbines[J]. IEEE Trans on Energy Conversion, 1999, 14 (3): 743-748.
- [14] CASTRO R M G, FERREIRA DE, JESUS J M. A wind park reduced-order model using singular perturbations theory[J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 1996, 11 (41): 735-741.
- [15] 李强, 张洋, 宋晓凯. 风电场接入电力系统容量的研究[J]. 电力系统保护与控制, 2008, 36 (16): 20-24.
LI Qiang, ZHANG Yang, SONG Xiao-kai. Researches on the capacity of wind power integration into power system[J]. Power System Protection and Control, 2008, 36 (16): 20-24.

收稿日期: 2010-02-22; 修回日期: 2010-04-06

作者简介:

张俊 (1985-), 男, 硕士研究生, 研究方向为电力系统稳定与控制; E-mail: f2f_tele@sina.com

晁勤 (1959-), 女, 教授, 博士生导师, 主要从事电力系统综合自动化和并网风力发电系统稳定性等方面的研究和教学;

段晓田 (1984-), 女, 硕士研究生, 研究方向为电气系统优化与设计。