

DOI: 10.7667/PSPC152081

# 统一电能质量控制器容量优化设计及控制

张新闻<sup>1</sup>, 同向前<sup>2</sup>

(1. 北方民族大学, 宁夏 银川 750021; 2. 西安理工大学, 陕西 西安 710048)

**摘要:** 为实现统一电能质量控制器(Unified Power Quality Conditioner, UPQC) 容量在串并联单元之间的合理分配, 提高 UPQC 补偿效率, 给出了一种 UPQC 容量优化设计及控制方法。利用矢量图方法分析了 UPQC 稳态运行特性, 建立了 UPQC 容量与电源电压暂降/骤升幅度、负载容量、负载功率因数和负载电压变化相角之间的关系模型, 将其作为 UPQC 串并联单元容量选择的依据。根据补偿后负载电压相角可控的特点, 采用神经网络对负载电压相角进行优化估计, 降低 UPQC 实时补偿功率。仿真结果证明, 所提方法能有效减小 UPQC 设计容量, 优化动态补偿效果。

**关键词:** 统一电能质量控制器; 电压暂降/骤升; 矢量图分析; 神经网络; 容量优化

## Capacity optimization design and control of unified power quality conditioner

ZHANG Xinwen<sup>1</sup>, TONG Xiangqian<sup>2</sup>

(1. Beifang University of Nationality, Yinchuan 750021, China; 2. Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China)

**Abstract:** In order to realize the rational distribution for the reactive power between the series and parallel units of unified power quality conditioner a (UPQC) and improve its compensation efficiency, a new method that is capacity optimization and control is promoted. The steady characteristics of UPQC are analyzed by using vector diagram, and the relationship model among capacity, voltage sag/swell amplitude, load capacity, load power factor angel and variation of load voltage phase angle is established. According to the load voltage phase which is controlled after compensation, the online estimation method based on neural network is proposed, which can reduce the real-time compensation power. At last, the circuit simulation result shows that the proposed method can effectively reduce the UPQC design capacity and improve the efficiency of UPQC dynamic compensation.

This work is supported by the Scientific Research Fund of State Ethnic Affairs Commission (No. 14BFZ010).

**Key words:** unified power quality conditioner; voltage sag/swell; vector analysis; neural network; capacity optimization

## 0 引言

现代配电系统中, 广泛使用的电力变压器、交流电机等设备从电网吸收了大量无功功率, 不断接入电网的新能源发电装备使电压暂降、聚升等电能质量问题发生更为频繁<sup>[1-3]</sup>, UPQC 作为一种综合性的电能质量控制装置<sup>[4-7]</sup>, 由于具有全面的电能质量调节能力, 被认为是最有发展前景的一种配电柔性交流输电系统元件<sup>[8]</sup>。

UPQC 解决电压暂降、聚升这类问题时控制策

略也不尽相同<sup>[9-16]</sup>。根据其串联单元补偿电压相位大小, 具体分为同相位控制, 即有功控制(UPQC-P)<sup>[9-11]</sup>, 串联补偿电压与电源电流同相位; 垂直相位控制, 即无功控制(UPQC-Q)<sup>[12-13]</sup>, 串联补偿电压与电源电流正交; 最小容量控制(UPQC-VA<sub>min</sub>)<sup>[14-15]</sup>, 串联补偿电压与电源电流有一定的相位差。以上方法中, UPQC-P 补偿电压幅值最小且补偿前后负载电压大小和相位不变, 但其串联单元向电网注入功率为与电压暂变程度成正比的有功功率<sup>[16]</sup>, 并联单元补偿负载全部无功功率并保持直流环节电压稳定, 无疑增大了并联单元容量; UPQC-Q 补偿无有功需求, 但其补偿电压幅值与补偿前后负载电压相位变化最大, 这不仅会对相位变化敏感的负载产生影响, 还

**基金项目:** 国家民委科研基金项目(14BFZ010); 北方民族大学科研项目(2014XBZ05)

会出现无功过补偿的现象; UPQC-VA<sub>min</sub> 方式介于 UPQC-P 和 UPQC-Q 之间, 但补偿电压最优相位计算需要采用粒子群等迭代计算方法, 耗时且有可能无解<sup>[17]</sup>。此外, 文献[18]提出最小有功功率控制方法, 其思想是 UPQC 串联补偿电压相位固定, 没有考虑负载无功功率的动态变化。本文通过矢量图分析法, 对 UPQC 串并联单元设计容量进行了优化, 为实际应用中 UPQC 串并联单元容量选择提供理论依据, 提出的负载电压变化相位实时估计方法, 有效减小了 UPQC 动态补偿容量。

### 1 拓扑结构

UPQC电路拓扑结构比较丰富, 文中采用的拓扑结构如图1所示。UPQC串联单元和并联单元通过直流电容器C<sub>dc</sub>结为一体。当电源电压u<sub>s</sub>发生暂降/骤升时, 串联单元通过串联变压器吸收或释放一定功率, 维持负载电压u<sub>L</sub>稳定, 并联单元补偿负载无功, 维持电源侧单位功率因数运行。

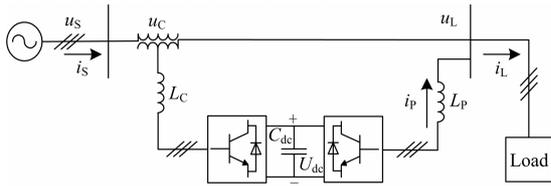


图1 统一电能质量控制器主回路拓扑结构

Fig. 1 Main topology structure of UPQC

### 2 矢量图分析

为简化问题分析, 假设电源电压暂降/骤升前后相位不变, 工业负载一般呈阻感特性, 设φ<sub>L</sub>为负载功率因数角。当电源电压变为u<sub>Svar</sub>, UPQC串联单元工作, 其补偿电压为u<sub>C</sub>, 并联单元补偿电流为i<sub>p</sub>, 负载电压与电流分别为u<sub>Lvar</sub>与i<sub>Lvar</sub>。以u<sub>S</sub>相位作参考, 图2与图3分别给出了电源电压暂降和骤升时系统电气参数矢量图, 图中虚实线段分别表示UPQC串联单元工作前后电压电流, δ表示补偿后负载电压相位变化大小, 类似于同步发电机的功角。

经UPQC完全补偿后, 可知

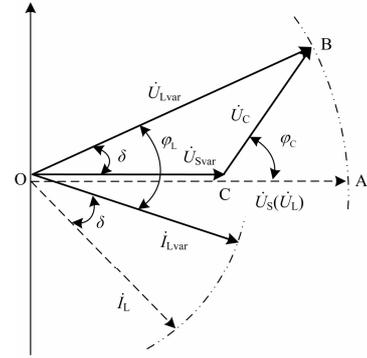
$$U_L = U_{Lvar} = U_S \quad (1)$$

$$U_L I_L \cos \varphi_L = U_{Lvar} I_{Lvar} \cos \varphi_L \quad (2)$$

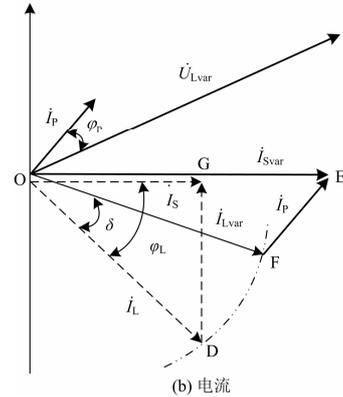
为分析方便, 定义电源电压暂降/骤升幅度系数k, 其表达式为

$$k = \frac{U_S - U_{Svar}}{U_S} \quad (3)$$

忽略UPQC损耗, 电源向负载提供的有功功率不变, 即



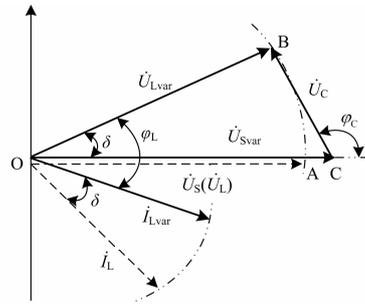
(a) 电压



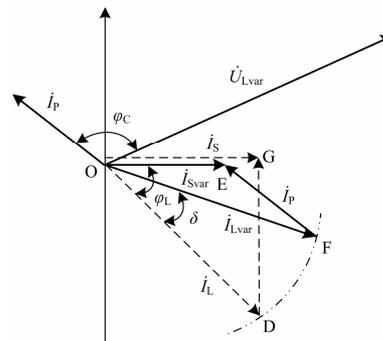
(b) 电流

图2 电压暂降参数矢量图

Fig. 2 Vector diagram of UPQC when voltage sag



(a) 电压



(b) 电流

图3 电压骤升电压电流矢量图

Fig. 3 Vector diagram of UPQC when voltage swell

$$U_S I_S = U_{Svar} I_{Svar} \quad (4)$$

结合式(2)~式(4), 可得

$$I_{Svar} = \frac{I_L}{1-k} \cos \varphi_L \quad (5)$$

由图2和图3可知, 电源电压暂降或骤升时串联单元补偿电压幅值 $U_C$ 为

$$U_C = U_L \sqrt{1 + (1-k)^2 - 2(1-k) \cos \delta} \quad (6)$$

其相角在电源电压暂降/骤升时分别为

$$\varphi_C = \arcsin \frac{\sin \delta}{\sqrt{k^2 + 2(1-k)(1-\cos \delta)}} \cos \varphi_L \quad (7)$$

$$\varphi_C = \pi - \arcsin \frac{\sin \delta}{\sqrt{k^2 + 2(1-k)(1-\cos \delta)}} \cos \varphi_L \quad (8)$$

并联单元补偿电流 $I_P$ 为

$$I_P = \frac{I_L}{1-k} \sqrt{(1-k + \cos \varphi_L)^2 - 2(1-k)(1-\cos(\varphi_L - \delta))} \cos \varphi_L \quad (9)$$

其相角在电源电压暂降/骤升时分别为

$$\varphi_P = \arcsin \frac{(1-k) \sin(\varphi_L - \delta)}{\sqrt{(1-k + \cos \varphi_L)^2 - 2(1-k)(1+\cos(\varphi_L - \delta))} \cos \varphi_L} - \delta \quad (10)$$

$$\varphi_P = \pi - \delta - \arcsin \frac{(1-k) \sin(\varphi_L - \delta)}{\sqrt{(1-k + \cos \varphi_L)^2 - 2(1-k)(1+\cos(\varphi_L - \delta))} \cos \varphi_L} \quad (11)$$

设负载容量为 $S_L$ , 由上述分析可得UPQC串并联单元容量 $S_C$ 和 $S_P$ 分别为

$$S_C = \frac{S_L \cos \varphi_L}{1-k} \sqrt{1 + (1-k)(1-k - 2 \cos \delta)} \quad (12)$$

$$S_P = \frac{S_L \sqrt{(1-k + \cos \varphi_L)^2 - 2(1-k)(1+\cos(\varphi_L - \delta))} \cos \varphi_L}{1-k} \quad (13)$$

UPQC容量 $S$ 由 $S_C$ 与 $S_P$ 组成,  $S$ 与 $k$ 、 $S_L$ 、 $\varphi_L$ 和 $\delta$ 有关, 其中 $\delta$ 为唯一可控变量,  $\delta$ 的变化影响着负载无功功率在UPQC串并联单元之间的分配, 同时也改变着流经并联单元的有功功率大小。

### 3 容量设计

UPQC容量设计目标是串并联单元满足各工况补偿要求时的 $S$ 最小。

电源电压发生暂降时, 要求

$$\delta_{\max} = \min(\varphi_L, \arccos(1-k)) \quad (14)$$

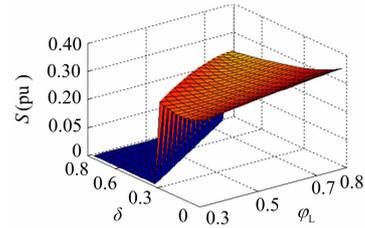
当 $\delta = \arccos(1-k)$ , 即 $\varphi_C = \pi/2$ , 串联单元向负载提供其最大无功支撑, 负载无功功率缺额由并联单元完成; 当 $\delta = \varphi_L$ 表征负载无功功率完全由串联单元完成。

电源电压发生骤升时, 有

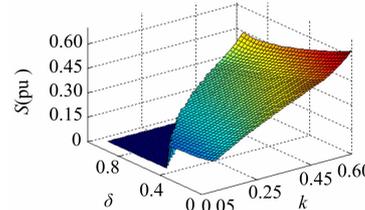
$$\delta_{\max} = \varphi_L \quad (15)$$

$\delta_{\max}$ 从一定程度限制了串联单元补偿电压相角的大小, 减小了负载电压相角变化对负载造成的冲击。

假设负载容量 $S_L$ 恒定并以其为基准, 下面分别对电压暂降/骤升幅度与负载功率因数对UPQC容量的影响进行分析, 图4(a)(b)分别给出了电压暂降 $k=0.3$ 和 $\varphi_L = \pi/3$ 时 $S(\delta, \varphi_L)$ 和 $S(\delta, k)$ 的三维图。结合式(12)和式(13), 分析图4(a)可知, 对每一个 $\varphi_L$ 总存在一个 $\delta_{\text{opti}}$ 使 $S(\delta_{\text{opti}})$ 最小; 图4(b)中 $S(k)$ 随 $k$ 单调递增, 当 $k < 1 - \cos \varphi_L$ 时 $S(\delta)$ 单调递减, 当 $k \geq 1 - \cos \varphi_L$ 时存在一个 $\delta_{\text{opti}}$ 使 $S(\delta_{\text{opti}})$ 最小。



(a)  $k=0.3$ 时 $S(\delta, \varphi_L)$



(b)  $\varphi_L = \pi/3$ 时 $S(\delta, k)$

图4 不同电压暂降条件下 $S$ 曲线

Fig. 4  $S$  curves of voltage sag under different conditions

图5(a)(b)分别给出了电压骤升 $k=-0.3$ 和 $\varphi_L = \pi/3$ 时 $S(\delta, \varphi_L)$ 和 $S(\delta, k)$ 的三维图。分析图5(a)可知 $S(\delta)$ 单调递增; 图5(b)中 $S(k)$ 单调递减,  $\delta \in [0, \varphi_L]$ 时总存在一个 $\delta_{\text{opti}}$ 使 $S(\delta_{\text{opti}})$ 最小。

综上, UPQC优化补偿容量应为

$$S(\delta_{\text{opti}}) = S_C(\delta_{\text{opti}}) + S_P(\delta_{\text{opti}}) \quad (16)$$

此外, 对比图4和图5, 负载既定情况下电源电压暂降/骤升幅度越大, UPQC容量也越大, 电压暂降所需补偿容量比同幅度电压骤升大, 同时结合式(12)和(13)分析可知,  $S_C(\delta_{\text{opti}}) \geq S_C(0)$ ,  $S_P(\delta_{\text{opti}}) \leq S_P(0)$ 。因此, 设 $k_{\max}$ 为最大电压变化幅度,  $\varphi_{L, \min}$ 为负载最小功率因数角, UPQC串并联单元设计容量应为

$$S_C = \frac{S_L \cos \varphi_{L, \min}}{1-k_{\max}} \sqrt{1 + (1-k_{\max})(1-k_{\max} - 2 \cos \delta_{\text{opti}})} \quad (17)$$

$$S_P = \frac{S_L}{1 - k_{\max}} \sqrt{(1 - k_{\max})^2 + \cos^2 \varphi_{L,\min} (1 - 2(1 - k_{\max}))} \quad (18)$$

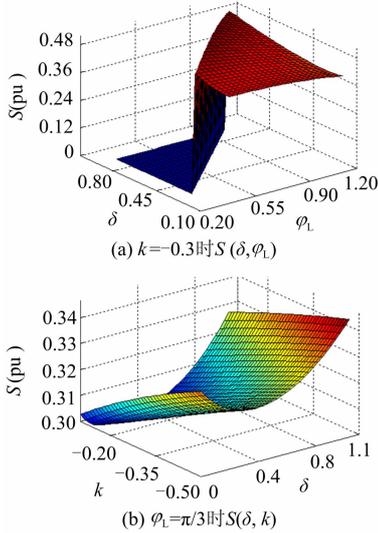


图5 不同电压聚升条件下S曲线

Fig. 5  $S$  curves of voltage swell under different conditions

## 4 容量优化控制

由于电源电压变化幅度和负载功率因数随机变化, 为使UPQC实时补偿容量最小, 需要连续计算 $\delta_{\text{opti}}$ 。由于 $\delta_{\text{opti}}$ 与 $k$ 、 $\varphi_L$ 都有关, 其关系非常复杂, 文中用 $\delta_{\text{opti}}(k, \varphi_L)$ 表示 $\delta_{\text{opti}}$ 与 $k$ 、 $\varphi_L$ 的映射关系。一般情况下, 寻优算法在线计算实时性不够理想, 神经网络结构简单、学习能力强、预测精度高, 尤其适用于复杂的非线性系统, 文中通过 $\delta_{\text{opti}}(k, \varphi_L)$ 样本离线训练神经网络, 利用其强大的泛化能力实现 $\delta_{\text{opti}}(k, \varphi_L)$ 的实时估计。

### 4.1 神经网络设计

Hornik等人证明, 具有一个非线性隐层的前馈网络就能以任意精度逼近任意复杂的函数。为此, 本文研究了基于BP神经网络的 $\delta_{\text{opti}}(k, \varphi_L)$ 求解。图6是文中采用的由输入层、一个隐层和输出层组成的3层BP神经网络, 输入层、隐层和输出层神经元个数依次为2、10和1, 输入层、隐层和输出层的神经元作用函数均选用S型函数(Sigmoid函数), 以完成输入模式到输出模式的非线性映射。

### 4.2 优化估计与控制

设 $k_{\max} = 0.5$ , 根据式(16)通过寻优方法找到一组 $\delta_{\text{opti}}(k, \varphi_L)$ 数据作为神经网络的训练样本, 具体如表1所示。

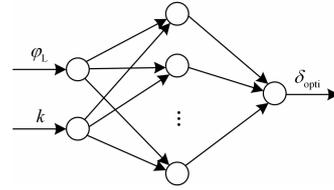


图6 BP神经网络结构

Fig. 6 Structure of BP neural network

表1 神经网络训练样本

Table 1 Training samples of neural network

$\delta_{\text{opti}}(k, \varphi_L)$	$\pi/9$	$\pi/6$	$2\pi/9$	$5\pi/18$	$\pi/3$	$7\pi/18$	$4\pi/9$
-0.5	0.09	0.13	0.22	0.22	0.27	0.31	0.38
-0.4	0.08	0.11	0.16	0.19	0.24	0.28	0.35
-0.3	0.06	0.09	0.13	0.16	0.19	0.22	0.30
-0.2	0.05	0.08	0.09	0.13	0.16	0.19	0.23
-0.1	0.03	0.05	0.06	0.25	0.13	0.035	0.05
0.1	0.28	0.45	0.45	0.45	0.45	0.45	0.45
0.2	0.22	0.44	0.64	0.64	0.64	0.64	0.64
0.3	0.20	0.38	0.63	0.79	0.79	0.79	0.79
0.4	0.20	0.35	0.53	0.84	0.93	0.93	0.93
0.5	0.20	0.35	0.50	0.75	1.04	1.04	1.04

据表1样本对图6所示的神经网络进行训练, 将训练好的神经网络融入下图7所示的控制逻辑框图中, 实现 $\delta_{\text{opti}}(k, \varphi_L)$ 的在线优化估计。图7上部表示UPQC串联单元控制逻辑结构, 通过abc-dq变换得到的电源电压dq轴分量计算电压暂变幅度 $k$ , 再由训练好的BP神经网络根据 $k$ 与 $\varphi_L$ 的输入值对 $\delta$ 作最优估计, 最后, 暂变电压指令计算模块依据相关参数计算值, 将得到的dq坐标系下补偿电压指令值再与其dq轴分量作差, 经PI控制器产生串联单元逆变器PWM调制信号 $u_{C,PWM}$ ; 下部为UPQC并联单元控制逻辑结构, 直流环节电压给定值与其实际值的差值经PI控制器转换, 产生维持其恒定的dq坐标系下并联单元有功电流指令值,  $i_L$ 通过dq变换得到并联单元无功电流指令值, 最后, dq坐标

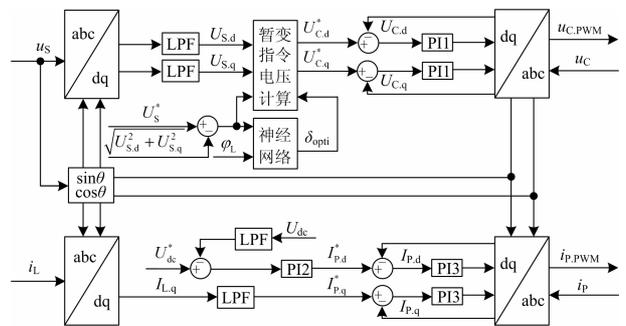


图7 统一电能质量控制器控制逻辑框图

Fig. 7 Control logical diagram of UPQC

系下并联单元指令电流与补偿电流作差,经 PI 控制器产生并联单元逆变器 PWM 调制信号  $i_{P,PWM}$ ; 中间部分为锁相环节,为串并联单元接入电源提供锁相同步信号。

### 5 仿真验证

根据图 1 所示 UPQC 电路拓扑,利用 PSIM 和 MATLAB 软件搭建仿真电路。相关元件取值及仿真参数设置如表 2 所示,由此估计得到  $\delta_{opti}=0.11\pi$ 。

表 2 统一电能质量控制系统仿真参数  
Table 2 Simulation parameters of UPQC

符号	参数说明	数值
$u_s$	电源电压	380V/50Hz
$C_{dc}$	直流电容	5600 $\mu$ F
$U_{dc}$	直流电容电压给定	800V
$L_C$	串联电感及等值电阻	2mH, $R_C=10\%\omega L_C$
$L_P$	并联电感及等值电阻	1mH, $R_P=10\%\omega L_P$
$k_{max}$	电源电压最大暂变幅度	$ \pm 0.5 $
$\varphi_{min}$	负载最小功率因数角	$\pi/6$
$I_L$	负载额定电流	150A

根据  $\delta_{opti}$  按式(17)、式(18)计算的 UPQC 优化设计容量和相同工况下仿真容量如表 3 所示,采用优化算法的 UPQC 仿真容量为设计容量的 84%,冗余容量主要分布于并联单元,这为电源电压无暂降/骤升时并联单元补偿负载无功提供了充足的冗余。

表 3 UPQC 优化设计容量与仿真实验容量

Table 3 Capacities of optimization design and simulation			
容量/pu	设计容量	实验容量	占设计容量百分比
$S$	1.90	1.60	84%
$S_C$	0.90	0.83	92%
$S_P$	1.00	0.77	77%

为说明神经网络优秀的泛化能力,用表1中的样本数据训练设计的神经网络,以 $k=\pm 0.35, \varphi_L=\pi/4$ 对 $\delta_{opti}$ 实时估计, $k=0.35$ 时 $\delta_{opti}=0.21\pi, k=-0.35$ 时 $\delta_{opti}=0.05\pi$ 。假设电源电压在0.1~0.2s发生电压暂降、0.3~0.4s发生电压聚升,以A相为例,UPQC工作前后系统电压电流波形分别如图9(a)(b)所示。图中,UPQC串并联单元动态跟踪和稳态补偿性能都较好,补偿电压电流经过大约0.25个周波跟踪上其指令值,超调较小。

为了说明 $S(\delta_{opti})$ 的优劣,表4给出了 $\delta$ 取其它值时的容量,以便比较。与负载电压其它相位变化角 $\delta$ 相比, $\delta$ 取 $\delta_{opti}$ 对应UPQC补偿容量最低。例如,与UPQC-P补偿容量为基准并与其比较,电源电压暂降时其补偿容量减小25%,电源电压聚升时减少11%。

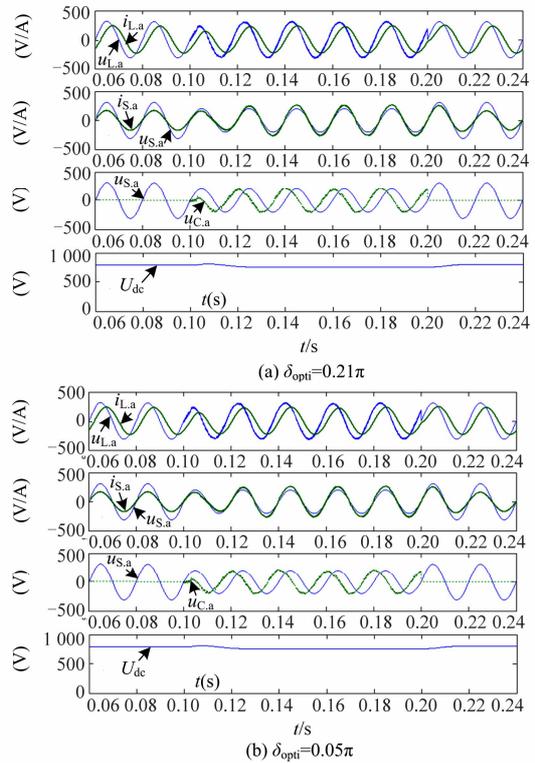


图 8  $k=\pm 0.35$  和  $\varphi_L=\pi/4$  的参数波形

Fig. 8 Parameter waveforms when  $k=\pm 0.35$  and  $\varphi_L=\pi/4$

表 4  $k=\pm 0.35$  和  $\varphi_L=\pi/4$  时  $S(\delta)$   
Table 4  $S(\delta)$  when  $k=\pm 0.35$  and  $\varphi_L=\pi/4$

容量/pu	$\delta_{opti}=0.21\pi(k=0.35)$			$\delta_{opti}=0.05\pi(k=-0.35)$		
	0	$\delta_{opti}$	$\varphi_L$	0	$\delta_{opti}$	$\varphi_L$
$S$	1.17	0.95	1.03	0.91	0.81	0.92
$S_C$	0.33	0.63	0.74	0.18	0.26	0.69
$S_P$	0.84	0.32	0.29	0.73	0.55	0.23

### 6 结论

采用矢量图分析方法,建立了UPQC补偿容量与负载容量、电源电压变化幅度、负载功率因数和负载电压相位变化之间关系模型,研究了UPQC串并联单元容量选择和补偿容量实时优化的控制方法。理论分析得到了电路仿真的结果验证,得出如下结论:(1)建立的UPQC容量选择计算模型能够有效减小装置容量冗余;(2)基于BP神经网络的负载电压变化相位最优估计方法能够降低UPQC实时补偿容量,提高补偿效率。

### 参考文献

[1] 陈琦,熊良根,刘述军. 基于双 dq 变换软件锁相的动态电压恢复器研究[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(4): 88-92.

- dynamic voltage restorer based on double dq synchronous software phase-locked loop[J]. *Power System Protection and Control*, 2015, 43(4): 88-92.
- [2] 施焯, 吴在军, 窦晓波, 等. 单相动态电压恢复器复合控制技术[J]. *电工技术学报*, 2015, 30(17): 85-95.  
SHI Ye, WU Zaijun, DOU Xiaobo, et al. Study on compound control technology of single-phase dynamic voltage restorer[J]. *Transactions of China Electrotechnical Society*, 2015, 30(17): 85-95.
- [3] 赵莹, 赵川, 叶华, 等. 应用主成分分析约简电压暂降扰动源识别特征的方法[J]. *电力系统保护与控制*, 2015, 43(3): 105-110.  
ZHAO Ying, ZHAO Chuan, YE Hua, et al. Method to reduce identification feature of different voltage sag disturbance source based on principal component analysis[J]. *Power System Protection and Control*, 2015, 43(3): 105-110.
- [4] 王浩, 刘进军, 梅桂华. 配网统一电能质量控制器直流电容的容量计算与分析[J]. *电力系统保护与控制*, 2014, 42(9): 14-19.  
WANG Hao, LIU Jinjun, MEI Guihua. Calculation and analysis of DC capacitance in distribution UPQC Power quality conditioner[J]. *Power System Protection and Control*, 2014, 42(9): 14-19.
- [5] 朱鹏程, 李勋, 康勇, 等. 统一电能质量控制器控制策略研究[J]. *中国电机工程学报*, 2004, 24(8): 67-73.  
ZHU Pengcheng, LI Xun, KANG Yong, et al. Study of control strategy for a unified power quality conditioner[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2004, 24(8): 67-73.
- [6] 冯兴田, 孙添添, 马文忠. 配电网电能质量调节装置集散配置策略[J]. *电力系统保护与控制*, 2015, 43(24): 33-39.  
FENG Xingtian, SUN Tiantian, MA Wenzhong. Centralized and dispersed allocation strategy of power quality regulating devices in distribution network[J]. *Power System Protection and Control*, 2015, 43(24): 33-39.
- [7] 谭智力, 朱冬姣, 陈坚, 等. 一种三相四线统一电能质量调节器的零稳态误差控制策略[J]. *电工技术学报*, 2011, 26(10): 77-83.  
TAN Zhili, ZHU Dongjiao, CHEN Jian, et al. A new zero steady-state error control strategy used in three-phase four-wire UPQC[J]. *Transactions of China Electrotechnical Society*, 2011, 26(10): 77-83.
- [8] 韩英铎, 严干贵, 姜齐荣, 等. 信息电力与 FACTS 及 DFACTS 技术[J]. *电力系统自动化*, 2000, 24(19): 1-7.  
HAN Yingduo, YAN Gangui, JIANG Qirong, et al. Electric power in information society and FACTS & DFACTS[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2000, 24(19): 1-7.
- [9] KESLER M, OZDEMIR E. Synchronous-reference-frame-based control method for UPQC under unbalanced and distorted load conditions[J]. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2011, 58(9): 3967-3975.
- [11] MOHAMMADI H R, VARJANI A Y, MOKHTARI H. Multi-converter unified power-quality conditioning system: MC-UPQC[J]. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 2009, 24(3): 1679-1686.
- [12] BASU M, DAS S P, DUBEY G K. Investigation on the performance of UPQC-Q for voltage sag mitigation and power quality improvement at a critical load point[J]. *IET Generat, Transmiss, and Distrib*, 2008, 2(1): 414-423.
- [13] KHADKIKAR V, CHANDRA A. A novel control approach for unified power quality conditioner Q without active power injection for voltage sag compensation[C] // *IEEE Int Conf Ind Technol (ICIT)*, Dec, 2006: 779-784.
- [14] KOLHATKAR Y Y, DAS S P. Experimental investigation of a single-phase UPQC with minimum VA loading[J]. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 2007, 22(1): 373-380.
- [15] 侯世英, 嵇丽明, 庾元科. 单相统一电能质量调节器的能量优化控制策略及仿真[J]. *电力自动化设备*, 2009, 29(7): 56-59.  
HOU Shiyong, JI Liming, TUO Yuanke. Energy optimal control strategy of single-phase unified power quality conditioner and simulation[J]. *Electric Power Automation Equipment*, 2009, 29(7): 56-59.
- [16] 黄永红, 徐俊俊, 孙玉坤. 基于最小能量补偿控制的微网动态电压恢复器[J]. *电工技术学报*, 2014, 29(12): 128-136.  
HUANG Yonghong, XU Junjun, SUN Yukun. Dynamic voltage restorer in micro-grid based on a minimum energy compensation control scheme[J]. *Transactions of China Electrotechnical Society*, 2014, 29(12): 128-136.
- [17] KHADKIKAR V, CHANDRA A. UPQC-S: a novel concept of simultaneous voltage sag/swell and load reactive power compensations utilizing series inverter of UPQC[J]. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 2011, 26(9): 2414-2425.
- [18] LEE W C, LEE D M. New control scheme for a unified power-quality compensator-Q with minimum active power injection[J]. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 2010, 25(2): 1068-1076.

收稿日期: 2015-11-29; 修回日期: 2016-03-04

作者简介:

张新闻(1976-), 男, 博士, 副教授, 研究方向为电能质量的分析与控制; E-mail: cindazm@126.com

同向前(1961-), 男, 博士, 教授, 主要研究方向为无功补偿、电力谐波抑制和柔性直流输电技术。

(编辑 张爱琴)