

DOI:10.3969/j.issn.1001-4551.2014.05.019

# 统一电能质量调节器能量优化控制策略研究<sup>\*</sup>

费平平<sup>1</sup>, 江全元<sup>1\*</sup>, 严玉婷<sup>2</sup>

(1. 浙江大学 电气工程学院, 浙江 杭州 310027; 2. 深圳供电局有限公司, 广东 深圳 518020)

**摘要:**针对电力系统三相不平衡电压跌落故障,提出了一种统一电能质量调节器(UPQC)的能量优化控制策略。根据 UPQC 三相不平衡电压跌落故障下的基波相量图,分析了 UPQC 的最优稳态功率,推导了 UPQC 所需的补偿能量;依据 UPQC 主电路补偿能量最小的原则,采用粒子群算法(PSO)对串联补偿单元补偿电压的注入角  $\theta_a$ 、 $\theta_b$ 、 $\theta_c$  进行了优化,并通过对补偿电压注入角的控制实现了 UPQC 的能量优化控制。仿真结果表明,所提出的能量优化控制策略可以有效解决电能质量问题,同时可以减小 UPQC 的补偿能量,从而提高了补偿装置的经济性。

**关键词:**统一电能质量调节器;三相不平衡电压跌落;电能质量;能量优化

中图分类号:TM71

文献标志码:A

文章编号:1001-4551(2014)05-0629-05

## Energy optimization control strategy for unified power quality conditioner

FEI Ping-ping<sup>1</sup>, JIANG Quan-yuan<sup>1</sup>, YAN Yu-ting<sup>2</sup>

(1. College of Electrical Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China; 2. Shenzhen Power Supply Bureau, Shenzhen 518020, China)

**Abstract:** Aiming at the problem of three-phase unbalanced voltage sags in the power system, an energy optimization control strategy for a unified power quality conditioner(UPQC) was proposed. Based on the fundamental wave phasor diagram of UPQC during three-phase unbalanced voltage sags, the optimal steady-state power of UPQC was analyzed and the required compensation energy of UPQC was also derived. Based on the principle of minimum compensation energy of UPQC, the injection angle  $\theta_a$ 、 $\theta_b$ 、 $\theta_c$  of compensation voltage of the series compensation unit was optimized by particle swarm optimization algorithm, and energy optimization control of UPQC was realized by controlling the injection angle of compensation voltage. Simulation results confirm that, the proposed energy optimization control strategy can effectively solve power quality problems and can also reduce the compensation energy of UPQC, thereby the economy of the compensation device is improved.

**Key words:** unified power quality conditioner(UPQC); three-phase unbalanced voltage sags; power quality; energy optimization

## 0 引 言

电网中大量非线性负荷、冲击性负荷的不断增加,对电网电能质量的影响日益加重。而随着科技和工业的发展,电力用户对电能质量的要求越来越高。因此,如何提高电网的电能质量问题成为了电力系统研究领

域中的一个热点<sup>[1-3]</sup>。

统一电能质量调节器(UPQC)是一种基于现代电力电子技术的综合电能质量调节装置,它兼顾动态电压恢复器(DVR)和有源滤波器(APF)的功能,既能治理电网电压跌落、三相不平衡、谐波等电能质量问题,又能补偿负载引起的谐波、无功电流等问题<sup>[4-6]</sup>。现有

收稿日期:2013-12-25

基金项目:国家高技术研究发展计划(“863”计划)资助项目(2013A050104);国家科技支撑计划资助项目(2009BAG12A09)

作者简介:费平平(1987-),男,浙江桐乡人,主要从事配网电能质量方面的研究。E-mail:zjufpp@zju.edu.cn

通信联系人:江全元,男,教授,博士生导师。E-mail:jyq@zju.edu.cn

的 UPQC 控制策略根据负载电压补偿前、后的相位和直流侧提供的补偿能量的不同,可以分为同相位控制(UPQC\_P)<sup>[7-8]</sup>、纯无功功率补偿控制(UPQC\_Q)<sup>[9-10]</sup>和能量优化控制<sup>[11-13]</sup>等。同相位控制虽然在实际工程中得到了广泛应用,但是该控制方法的补偿电压与电源电压同相位,只能对电源电压进行幅值的补偿,不能补偿相角变化,仅适用于对相位跳变不敏感的负荷进行电压补偿。纯无功功率补偿控制是通过控制 UPQC 串联补偿单元输出补偿电压的相位与电网电流相垂直,来达到 UPQC 仅向电网注入无功功率而不消耗有功功率的目的。然而纯无功功率控制方法受限于 UPQC 串联补偿单元的电压补偿能力,仅适用于电网电压跌落较小的情况,当电网电压跌落较严重时,该控制方法无法完全补偿电网的电压跌落。文献[11-12]研究了 UPQC 的能量优化控制方法,但仅针对电网发生三相平衡电压跌落故障的情况,没有考虑电网在三相不平衡电压跌落情况下的能量优化问题。文献[13]研究了三相不平衡电压跌落故障下的 UPQC 能量优化问题,但仅考虑使 UPQC 串联补偿单元的有功功率最小,没有综合考虑 UPQC 串联补偿单元和并联补偿单元总补偿能量的最优化问题。

本研究对三相不平衡电压跌落故障情况下的 UPQC 能量优化问题进行研究,综合考虑 UPQC 串联补偿单元电压补偿和并联补偿单元电流补偿所需的总补偿能量;根据 UPQC 三相不平衡跌落故障下的基波相量图,分析 UPQC 的最优稳态功率,并依据 UPQC 主电路总补偿能量最小的原则,对串联补偿单元补偿电压的注入角  $\theta_a$ 、 $\theta_b$ 、 $\theta_c$  进行优化。

### 1 UPQC 拓扑结构和工作原理

UPQC 的拓扑结构图如图 1 所示。它主要由一个串联补偿单元和一个并联补偿单元组成,串联补偿单元和并联补偿单元共用一个直流母线电容。

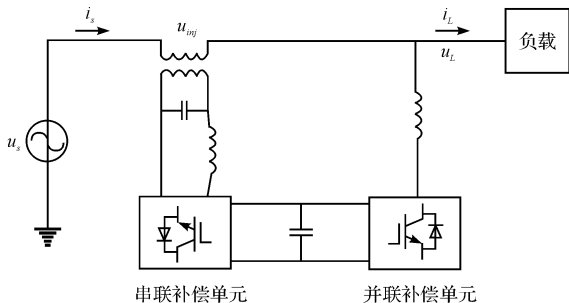


图 1 UPQC 拓扑结构图

串联补偿单元通过变压器串联在电网和负载之

间,主要用来补偿电网电压的谐波、电压跌落和不平衡等问题,保证负载侧的电压质量;并联补偿单元与负载并联连接,主要用来补偿负载侧的电流谐波和无功,保证电网侧的电流质量。UPQC 工作时,串联补偿单元可等效为一个受控电压源,而并联补偿单元可等效为一个受控电流源,其等效电路图如图 2 所示。

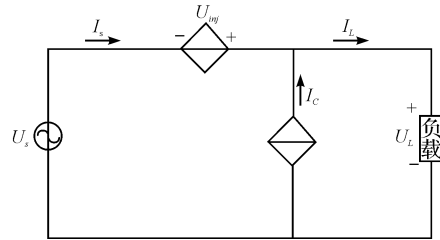


图 2 UPQC 等效电路图

### 2 UPQC 能量优化

电网发生带有相位跳变的三相不平衡电压跌落时的 UPQC 相量图如图 3 所示。

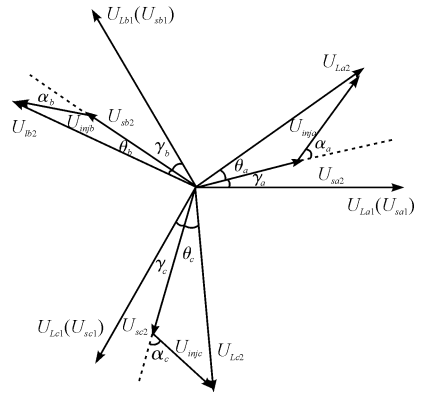


图 3 三相不平衡电压跌落下的 UPQC 相量图

$U_{La}, U_{Lb}, U_{Lc}$ —负载电压;  $U_{sa}, U_{sb}, U_{sc}$ —电网电压,其中下标 1、2 分别表示电网发生电压跌落前和发生电压跌落时;  $\gamma_a, \gamma_b, \gamma_c$ —电网电压跌落时电网电压的相位跳变角;  $\theta_a, \theta_b, \theta_c$ —电网电压跌落后的补偿后负载电压与电网电压之间的夹角;  $U_{inj}, U_{inj}, U_{inj}$ —UPQC 串联补偿单元输出的补偿电压;  $\alpha_a, \alpha_b, \alpha_c$ —补偿电压的相角

电网发生带有相位跳变的三相不平衡电压跌落时的 UPQC 能量优化即在经 UPQC 补偿后负载电压保持为额定幅值的三相平衡电压(相位可以和电压跌落前不同)的前提下,使得 UPQC 串联补偿单元和并联补偿单元消耗的总能量最小。

本研究以 UPQC 单相相量图来推导电网发生带有相位跳变的三相不平衡电压跌落时 UPQC 消耗的总能量,UPQC 单相相量图如图 4 所示。

通过 UPQC 的补偿作用,电网电压跌落前后负载侧的负载电压和负载电流将保持不变,有:

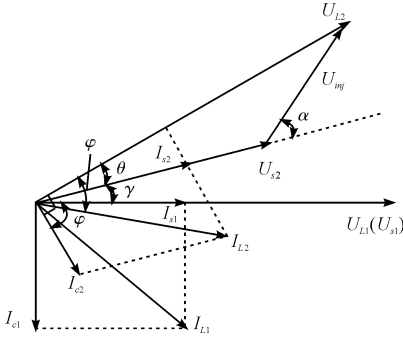


图4 三相不平衡电压跌落下的UPQC单相相量图

$U_{s1}, U_{L1}, I_{L1}, I_{s1}, I_{c1}, U_{s2}, U_{L2}, I_{s2}, I_{L2}, I_{c2}$ —电网电压跌落后的电网电压、负载电压、电网电流、负载电流、串联补偿单元补偿电流; $\varphi$ —负载功率因数角

$$U_{L1} = U_{L2} = U_L \quad (1)$$

$$I_{L1} = I_{L2} = I_L \quad (2)$$

电压跌落前电网电压和负载电压相同,所以有:

$$U_{s1} = U_{L1} = U_L \quad (3)$$

设其中一相电网电压的跌落量为  $x$  (标么值),即:

$$U_{s1} = (1 - x) U_L \quad (4)$$

则由图4可以推得UPQC串联补偿单元的补偿电压为:

$$U_{inj} = U_L \sqrt{1 + (1 - x)^2 - 2(1 - x) \cos\theta} \quad (5)$$

UPQC串联补偿单元的补偿电压的相角  $\alpha$  为:

$$\alpha = \theta + \arccos \frac{1 - (1 - x) \cos\theta}{\sqrt{1 + (1 - x)^2 - 2(1 - x) \cos\theta}} \quad (6)$$

由图4中  $I_{s2}, I_{L2}, I_{c2}$  相量之间的关系可推得电压跌落后的UPQC并联补偿单元的补偿电流和电源电流:

$$I_{c2} = -I_L \frac{\sin(\theta - \varphi)}{\cos\theta} \quad (7)$$

$$I_{s2} = I_L (\cos(\theta - \varphi) + \tan\theta \sin(\theta - \varphi)) \quad (8)$$

则三相不平衡电压跌落时UPQC串联补偿单元补偿的有功功率和无功功率为:

$$P_s = \sum_{i=a,b,c} U_{inj_i} I_{s2_i} \cos\alpha_i \quad (9)$$

$$Q_s = \sum_{i=a,b,c} U_{inj_i} I_{s2_i} \sin\alpha_i \quad (10)$$

则UPQC串联补偿单元补偿的能量为:

$$S_s = \sqrt{P_s^2 + Q_s^2} \quad (11)$$

UPQC并联补偿单元的补偿能量由基波补偿能量和谐波补偿能量两部分构成,基波补偿能量为:

$$S_{p1} = \sum_{i=a,b,c} U_L I_{c2_i} = U_L I_L \left( \frac{\sin(\varphi - \theta_a)}{\cos\theta_a} + \frac{\sin(\varphi - \theta_b)}{\cos\theta_b} + \frac{\sin(\varphi - \theta_c)}{\cos\theta_c} \right) \quad (12)$$

UPQC并联补偿单元谐波补偿能量为:

$$S_h = U_L \left( \sqrt{\sum_{n=2}^{\infty} I_{Lan}^2} + \sqrt{\sum_{n=2}^{\infty} I_{Lbn}^2} + \sqrt{\sum_{n=2}^{\infty} I_{Lcn}^2} \right) \quad (13)$$

所以并联补偿单元的补偿能量为:

$$S_p = S_{p1} + S_h =$$

$$U_L I_L \left( \frac{\sin(\varphi - \theta_a)}{\cos\theta_a} + \frac{\sin(\varphi - \theta_b)}{\cos\theta_b} + \frac{\sin(\varphi - \theta_c)}{\cos\theta_c} \right) + U_L \left( \sqrt{\sum_{n=2}^{\infty} I_{Lan}^2} + \sqrt{\sum_{n=2}^{\infty} I_{Lbn}^2} + \sqrt{\sum_{n=2}^{\infty} I_{Lcn}^2} \right) \quad (14)$$

则UPQC总的补偿能量为:  $S = S_s + S_p$ 。  $S$  为  $\theta_a, \theta_b, \theta_c$  的函数,所以UPQC的能量优化可以等价于变量为  $\theta_a, \theta_b, \theta_c$  的函数最优化问题,设UPQC串联补偿单元的补偿能力为  $0.5U_L$ ,则该优化问题可表示为:

$$\begin{cases} \min S(\theta_a, \theta_b, \theta_c) = S_s(\theta_a, \theta_b, \theta_c) + S_p(\theta_a, \theta_b, \theta_c) \\ \text{s. t.} & -180^\circ \leq \theta_a, \theta_b, \theta_c \leq 180^\circ \\ & \theta_a + \gamma_a = \theta_b + \gamma_b = \theta_c + \gamma_c \\ & U_{inj_a}, U_{inj_b}, U_{inj_c} \leq 0.5U_L \end{cases} \quad (15)$$

由式(15)可求得满足UPQC总补偿能量  $S$  最小时的  $\theta_a, \theta_b, \theta_c$ ,再通过式(5)和式(6)得到UPQC串联补偿单元所需提供的补偿电压值,从而实现UPQC的能量优化控制。

对式(15)所示的优化问题,可以通过粒子群算法(PSO)<sup>[14]</sup>进行求解。本研究为了实现对统一电能质量调节器的在线实时控制,首先通过PSO算法离线计算出300种不同三相不平衡电压跌落故障下的优化结果,再基于这300种优化结果利用Matlab工具箱中的自适应神经模糊推理系统(ANFIS)工具进行数据训练。实际控制中笔者根据三相不平衡电压跌落故障情况和ANFIS数据训练结果得到所需提供的补偿电压值,从而实现对统一电能质量调节器的在线控制。

### 3 UPQC控制策略

UPQC的控制策略包括串联补偿单元的控制和并联补偿单元的控制两个部分。

#### 3.1 串联补偿单元的控制

UPQC串联补偿单元的控制框图如图5所示,串联补偿单元的控制首先需要检测出电压跌落程度、相位跳变角和负载的功率因数角,再根据上述检测量通过UPQC能量优化模块计算出补偿能量最小时的补偿电压。其中,电网电压每一相的跌落程度和故障发生时相位跳变角的检测计算可以采用可用于单相电路的瞬时电压dq0变换方法<sup>[15]</sup>。该方法通过基于某一项电压构造出一个虚拟的三相系统,再根据三相电路瞬

时无功理论计算出该相电压的幅值和相位跳变角。

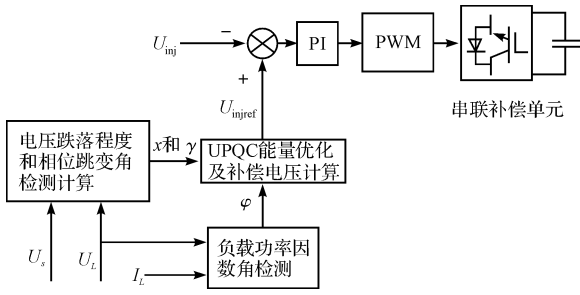


图 5 串联补偿单元控制框图

### 3.2 并联补偿单元的控制

UPQC 并联补偿单元的控制框图如图 6 所示, 并联补偿单元采用滞环电流控制, 滞环电流控制具有控制简单、动态响应快和对负载适应能力强的优点。并联补偿单元的控制包括谐波电流补偿和稳定 UPQC 直流母线电压两方面。

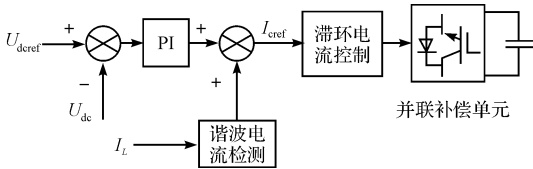


图 6 并联补偿单元控制框图

## 4 仿真结果

本研究在 PSCAD 仿真软件中搭建如图 1 所示的仿真系统。系统的仿真参数为: 电网相电压有效值  $U_s = 220 \text{ V}$ , 频率为  $50 \text{ Hz}$ , 负载相电流有效值  $I_L = 8 \text{ A}$ , 负载功率因数为  $0.8$ ; UPQC 串联补偿单元滤波电感为  $0.4475 \text{ mH}$ , 滤波电容为  $13.25 \mu\text{F}$ , 并联补偿单元滤波电感为  $6 \text{ mH}$ ; UPQC 直流母线电容  $5000 \mu\text{F}$ , 直流侧电压  $1500 \text{ V}$ 。

仿真系统中,  $0.1 \text{ s} \sim 0.2 \text{ s}$  时设置带有相位跳变的三相不平衡电压跌落故障: a 相电压跌落量  $x_a = 0.4$ , 相位跳变角  $\gamma_a = -10^\circ$ ; b 相电压跌落量  $x_b = 0.13$ , 相位跳变角  $\gamma_b = 10.05^\circ$ ; c 相电压跌落量  $x_c = 0.04$ , 相位跳变角  $\gamma_c = -12.16^\circ$ 。

本研究对上述故障条件下的 UPQC 进行能量优化并计算能量优化下所需的 UPQC 补偿能量和补偿电压, 与采用同相位控制 UPQC (UPQC\_P)、纯无功功率补偿控制 UPQC (UPQC\_Q) 和文献 [13] 中 UPQC 补偿方法时所需的 UPQC 补偿能量相比较, 比较结果如表 1 所示。由表 1 可以看出, 采用本研究能量优化控制所需的 UPQC 补偿能量比采用同相位控制 (UPQC\_P) 所需补偿能量少  $12.34\%$ , 比采用文献 [13] 中的串联补偿单元

表 1 三相不平衡电压跌落下 UPQC 补偿能量比较

控制方法	补偿能量 S/VA	补偿电压		
		a 相	b 相	c 相
本研究能量优化控制方法	4 749.48	$110 \angle 49.4584^\circ$	$29.7444 \angle 17.1253^\circ$	$91.8637 \angle 96.8742^\circ$
同相位控制方法	5 418.24	$88 \angle 0^\circ$	$28.6 \angle 0^\circ$	$8.8 \angle 0^\circ$
纯无功功率控制方法	4 615.68	$176 \angle 90^\circ$	$108.471 \angle 90^\circ$	$61.6 \angle 90^\circ$
文献 [13] 中控制方法	4 941.64	$97.4366 \angle 33.3712^\circ$	$35.6598 \angle -39.7547^\circ$	$61.6 \angle -90^\circ$

最小有功功率输出控制所需的补偿能量少  $3.89\%$ 。虽然采用纯无功功率控制时所需的 UPQC 补偿能量最小, 但是此时的 a 相补偿电压已经超过了 UPQC 串联补偿单元的补偿能力 ( $110 \text{ V}$ ), 在实际应用中是无法实现的。

UPQC 能量优化控制策略下的三相不平衡电压跌落和电流谐波治理仿真结果如图 7 ~ 10 所示。由图 7、图 8 可以看出, 采用本研究提出的 UPQC 能量优化控制策略, 通过 UPQC 串联补偿单元输出能量优化下相对应的补偿电压值, 使得负载电压在电网发生三相不平衡

电压跌落故障时能够维持为额定的电压幅值, 即负载电压不受电网电压跌落故障的影响。由图 9、图 10 可以看出, 通过 UPQC 并联补偿单元的作用, 使得电网电流基本不受非线性负载的影响, 总谐波畸变率由 UPQC 补偿前的  $27.42\%$  降为补偿后的  $2.26\%$ 。

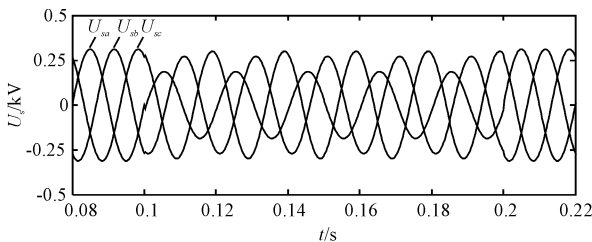


图 7 电网电压波形

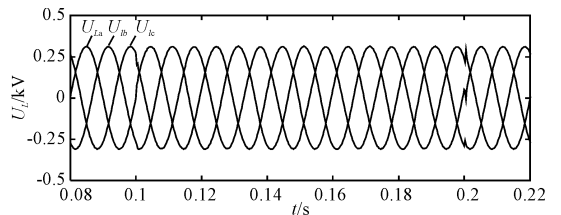


图 8 负载电压波形

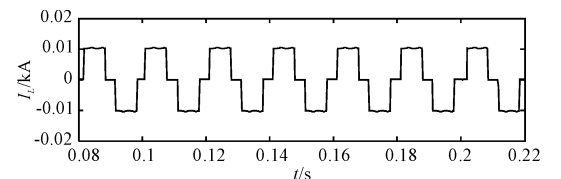


图 9 负载电流 (a 相) 波形

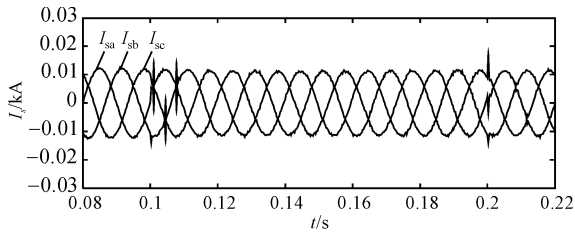


图10 电网电流波形

## 5 结束语

本研究提出了一种考虑三相不平衡电压跌落故障的UPQC能量优化控制策略。根据UPQC三相不平衡跌落故障下的基波相量图,笔者分析了UPQC的最优稳态功率,对UPQC串联补偿单元补偿电压的注入角进行了优化,并通过对补偿电压注入角的控制实现UPQC的能量优化控制。

仿真结果验证了本研究提出的能量优化控制策略在解决电能质量问题上的有效性,同时减小了UPQC的补偿容量,提高了补偿装置的经济性。

### 参考文献(References):

- [1] 李伟国,陈隆道. 模拟电压控制电流源在谐波补偿上的应用研究[J]. 机电工程,2012,29(3):365-368.
- [2] 刘书铭,李琼林,陈栋新,等. 中高压配电网非线性用户的电能质量特性研究[J]. 电力系统保护与控制,2012,40(15):150-155.
- [3] 杜逸,赵荣祥. 基于Delta逆变技术的不间断动态电压恢复器研究[J]. 机电工程,2007,24(10):61-63.
- [4] 童力,邹旭东,张允,等. 基于自适应滤波的单相统一电能质量控制器研究[J]. 中国电机工程学报,2011,31(24):9-18.
- [5] 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.

- [6] 梁祖权,束洪春. 新型UPQC直流电压的 $PI^{\wedge}D^{\mu}$ 控制[J]. 电工技术学报,2010,25(2):147-151.
- [7] 丁洪发,段献忠,朱庆春. 混合型电能质量调节器及其控制策略[J]. 中国电机工程学报,2006,26(8):33-38.
- [8] KHADKIKAR V, CHANDRA A, BARRY A O, et al. Analysis of Power Flow in UPQC During Voltage Sag and Swell Conditions for Selection of Device Ratings [C]//Canadian Conference on Electrical and Computer Engineering, IEEE, 2006:867-872.
- [9] KHADKIKAR V, CHANDRA A. A Novel Control Approach for Unified Power Quality Conditioner Q Without Active Power Injection for Voltage Sag Compensation [C]//International Conference on Industrial Technology, IEEE,2006:779-784.
- [10] 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 Generation, Transmission & Distribution**,2008,2(3):414-423.
- [11] 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.
- [12] ZHOU H, WAM J, LI S. Research on UPQC Energy Optimization Method under Three-phase Balance [C] //Second Pacific-Asia Conference on Circuits, Communications and System, IEEE,2010:291-294.
- [13] KUMAR G S, KUMAR B K, MISHRA M K. Mitigation of voltage sags with phase jumps by UPQC with PSO-based ANFIS [J]. **IEEE Transactions on Power Delivery**, 2011,26(4):2761-2773.
- [14] 曾建潮,介婧,崔志华. 微粒群算法[M]. 北京:科学出版社,2004.
- [15] 沈虹. UPQC电流谐波与电压跌落补偿技术研究[D]. 天津:天津大学电气与自动化工程学院,2009.

[编辑:李辉]

### 本文引用格式:

费平平,江全元,严玉婷. 统一电能质量调节器能量优化控制策略研究[J]. 机电工程,2014,31(5):629-633.

FEI Ping-ping, JIANG Quan-yuan, YAN Yu-ting. Energy optimization control strategy for unified power quality conditioner [J]. Journal of Mechanical & Electrical Engineering, 2014,31(5):629-633.

《机电工程》杂志: <http://www.meem.com.cn>