

基于 UPQC 主电路容量最小的控制策略的研究

巫付专¹, 万健如², 沈虹³

(1. 中原工学院, 河南 郑州 450007; 2. 天津大学, 天津 300072; 3. 燕山大学, 河北 秦皇岛 066004)

摘要: 以统一电能质量控制器(UPQC)左串-右并主电路结构为研究对象, 从其基波稳态等效电路入手, 给出了在电压波动时并伴有相位跳变的相量图; 依据主电路总容量最小的原则导出了串联补偿电压的最优注入角; 基于瞬时无功理论及低通滤波器提取电源基波相电压初始相位及相位跳变角, 结合总容量最小时的最优注入角确定了目标电压函数, 使 UPQC 输出相应的补偿电压。通过仿真和实验验证了在主电路容量最小时确定串联补偿电压最优注入角的控制策略。

关键词: UPQC; 总容量最小; 最优注入角; 瞬时无功理论

Research of control strategy based on the UPQC minimum capacity method

WU Fu-zhuan¹, WAN Jian-ru², SHEN Hong³

(1. Zhongyuan University of Technology, Zhengzhou 450007, China; 2. Tianjin University, Tianjin 300072, China;
3. Yanshan University, Qinhuangdao 066004, China)

Abstract: The unified power quality conditioner (UPQC) with series on the left and parallel on the right of the main circuit is taken as an object of the study. Based on its base wave steady-state equivalent circuit, phasor diagram with phase angle jump during voltage fluctuation is given. According to the principle of total capacity minimal of main circuit, the optimization of the angle of injection voltage is analyzed. Based on the instantaneous reactive power theory and low-pass filter extracting power fundamental waves' phase voltage preliminary angle and phase jumping angle, the object voltage function is defined combining with the angle of injection voltage of total capacity minimal. This object voltage function makes UPQC putting out corresponding compensation voltage. Finally, control strategy is proved by simulation and experiment that determining series compensation voltage optimal injection angle when capacity of main circuit is minimal.

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

Key words: UPQC; minimum energy method; optimization of the angle of injection voltage; instantaneous reactive theory

中图分类号: TM71 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2010)11-0001-05

0 引言

随着电网中非线性负荷的增加, 电网污染日趋严重, 而自动控制等系统中的敏感器件对电能质量的要求却非常高。(Unified Power Quality Conditioner, UPQC)集电压型补偿装置、电流型补偿装置和储能装置于一体, 统一实现多重电能质量调节功能而备受关注。统一电能质量调节器由 DVR 和 APF 组成。DVR 通常采用最小能量补偿法, 是从串联变流器储能的观点来看, 通过引入无功功率来实现补偿, 采用与网侧电压有一个合适的相位超前的电压注入可以减少有功交换。它通过使补偿器

提供的有功功率最小化来实现电网提供的有功功率最大化, 使电网的功率因数增加, 补偿器的功率因数减少^[1]。文献对此讨论较多, 但他们主要针对 DVR 单独使用时进行的分析^[2-4]。显然对于由 DVR 和 APF 共同组成的 UPQC 并不完全适用。

本文在分析了统一电能质量调节器(UPQC)的工作原理基础上, 通过对注入电压角的优化分析, 使主电路总容量最小, 从而减少损耗, 提高了效率; 利用瞬时无功理论及低通滤波器提取电源基波相电压初始相位及相位跳变角, 确定目标电压函数, 并依据 UPQC 总容量最小的原则确定补偿最优角, 并最终计算出串联侧的补偿量。

1 UPQC 的工作原理

UPQC 通过一对串/并联变流器按照一定的联结方式组合而成。其结构形式有多种, 较常用的如

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(60874077); 高等学校博士学科点专项科研基金资助项目(20060056054); 国家质检总局公益性行业科研专项基金(200910097)

图 1 所示，为左串-右并结构。

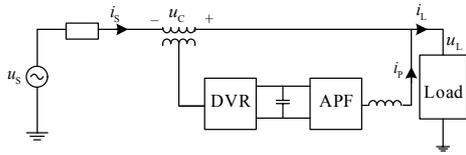


图 1 UPQC 主电路拓扑

Fig.1 Main circuit topology of UPQC

串联变流器用于补偿和调节负载端电压，抑制电源电压骤升、骤降等扰动；并联变流器则用于抑制负载电流谐波、补偿无功电流，同时维持两个变流器之间的直流电压恒定。对于图 1 所表示的 UPQC 主电路拓扑，其串联侧可以等效为一个可控的电压源，而并联侧部分可等效为一个受控电流源。补偿原理为当电源电压发生畸变、跌落、不平衡时，UPQC 检测实际电源电压与参考电压之间的差值，通过串联变压器注入一个相应的电压，以保持负载端电压为标准的正弦电压；同样针对负载端，UPQC 检测出负载电流中含有的谐波、无功成分，通过并联变流器注入与其相反的电流，从而保证源端电流为标准正弦波，抑制非负载产生的畸变电流对电网的污染，实现改善系统电能质量的目的^[5]。其单相等效电路如图 2 所示。

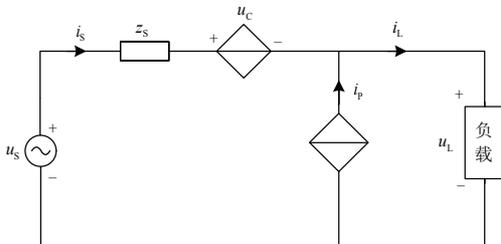


图 2 UPQC 单相等效电路图

Fig.2 Single-phase equivalent circuit of UPQC

1.1 最优注入角的确定

如图 1 所示，为了便于分析，现假定串联变压器为理想变压器；忽略 UPQC 的损耗；电源侧功率因数为 1。 U_{L1} 、 U_{S1} 和 U_{L2} 、 U_{S2} 分别表示电压跌落前后负载与电源电压； I_{L1} 、 I_{S2} 和 I_{L2} 、 I_{S2} 分别表示电压跌落前后负载与电源电流； I_p 表示并联变流器输出电流； φ 为负载等效功率因数角^[6]。则其基波相量图如图 3 所示，显然有：

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

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

$$U_{S1}I_{S1} = U_{S2}I_{S2} \quad (3)$$

$$I_{S2} = \frac{I_L \cos \varphi}{(1-d)} \quad (4)$$

其中： d 为电源电压波动率。

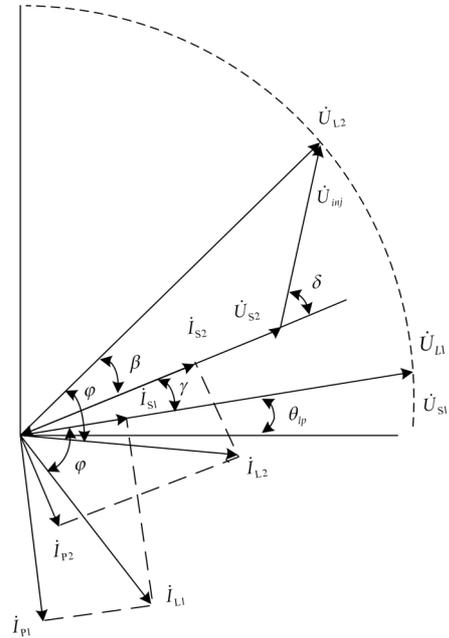


图 3 UPQC 相量图

Fig.3 Phasor diagram of UPQC

根据图 3 可推得串联变流器补偿电压为：

$$U_{inj} = \sqrt{U_{L2}^2 + U_{S2}^2 - 2U_{L2}U_{S2} \cos \beta} = U_L \sqrt{1 + (1-d)^2 - 2 \cos \beta(1-d)} \quad (5)$$

并联侧无功基波电流为：

$$I_{p2} = \sqrt{I_{L2}^2 + I_{S2}^2 - 2I_{L2}I_{S2} \cos(\varphi - \beta)} = \frac{I_L}{1-d} \sqrt{(1-d)^2 + \cos^2 \varphi - 2 \cos \varphi \cos(\varphi - \beta)(1-d)} \quad (6)$$

串联侧容量为：

$$S_C = U_{inj} I_{S2} = \frac{U_L I_L \cos \varphi}{1-d} \sqrt{1 + (1-d)^2 - 2 \cos \beta(1-d)} \quad (7)$$

同频率正弦电压与电流之间的能量关系为

$$S_{P1} = I_{p2} U_{L2} = \frac{U_L I_L}{1-d} \sqrt{(1-d)^2 + \cos^2 \varphi - 2 \cos \varphi \cos(\varphi - \beta)(1-d)} \quad (8)$$

若考虑在电流非正弦情况下, 不同频率的正弦电压与电流之间的能量关系, 则可得并联侧容量

$$S_p^2 = P_p^2 + Q_p^2 + D^2 = S_{p1}^2 + D^2 \quad (9)$$

式中: S_p 为并联侧电路容量; P_p 为并联侧有功功率; Q_p 为并联侧基波无功功率; D 为谐波电流产生的无功功率。公共电网中一般电压畸变很小, 在此作为纯正弦处理, 设电源电压的有效值为 U , 而负载电流畸变则可能很大, 则有:

$$D^2 = U^2 \sum_{n=2}^{\infty} I_n^2 \quad (10)$$

由此可得 UPQC 主电路总容量为

$$S = S_c + S_{p1} + D \quad (11)$$

可见总容量为 d, φ, β 的函数, 可表示为 $S = f(d, \varphi, \beta)$ 。 $\cos \varphi$ 为负载基波功率因数, 当负载一定时其为常数, 当电压波动率为 d 时, 只要选择合适的角 β 就可以是主电路总容量最小。上述方程直接求解比较困难, 我们采用计算机辅助求解得出 β 角, 根据不同的 $\cos \varphi$ 和 d 建立一个二维表, 在程序运行时进行查表, 这样的处理还可以提高程序的运行速度。对于本样机系统, 最大电压跌落为额定电压的 70%, 功率因数的角度范围从 0 到 60° 变化。按每 0.5% 的跌落和 1° 位移功率因数的角度构成一个 60×60 二维查询表来确定总容量最小时的最优角 β 。

1.2 控制策略

基于上述分析, 针对带相位跳变的电源电压波动情况, 采用瞬时无功理论求得电源电压初始相位与跳变角, 并依据 UPQC 总容量最小的原则确定补偿最优角, 确定目标电压函数, 并最终计算出串联侧的补偿量。其原理如图 4 所示。

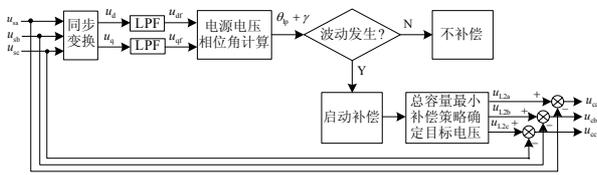


图 4 考虑相位跳变的总容量最小补偿算法原理图
Fig.4 Schematic diagram of total capacity minimum compensation algorithm considering phase jump

1.2.1 电压有效值和初始相位角计算

由瞬时无功功率理论可知, 在 abc 坐标系中的三相电压可以通过同步坐标变换变换到 dq0 坐标系中, 即:

$$\begin{bmatrix} u_d \\ u_q \\ 0 \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \cos \omega t & \cos(\omega t - \frac{2}{3}\pi) & \cos(\omega t + \frac{2}{3}\pi) \\ -\sin \omega t & -\sin(\omega t - \frac{2}{3}\pi) & -\sin(\omega t + \frac{2}{3}\pi) \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_{sa} \\ u_{sb} \\ u_{sc} \end{bmatrix} \quad (12)$$

经过同步坐标变换后, 三相电网电压负序和谐波分量仍为交流分量, 通过两个低通滤波器(LPF) 可将基波正序分量分别提取出来^[7]。 u_{df} 和 u_{qf} 在 dq0 空间的对应量为一直流分量, 且数值与 abc 系统中的电源电压的峰值 U_{ms} 、基波电压初相角 θ_{ip} 以及电源电压相位跳变角 γ 之间存在着如下关系:

$$\begin{cases} u_{sa} = U_{sm} \sin(\omega t + \theta_{ip} + \gamma) \\ u_{sb} = U_{sm} \sin(\omega t + \theta_{ip} + \gamma - \frac{2\pi}{3}) \\ u_{sc} = U_{sm} \sin(\omega t + \theta_{ip} + \gamma + \frac{2\pi}{3}) \end{cases} \quad (13)$$

$$\begin{cases} U_{sm} = \sqrt{\frac{2}{3}(u_{df}^2 + u_{qf}^2)} \\ \theta_{ip} + \gamma = -\arctan(\frac{u_{qf}}{u_{df}}) \end{cases} \quad (14)$$

1.2.2 目标电压函数求取

目标电压函数即负荷侧电压经过 UPQC 串联侧补偿后要达到的电压量。它是一个三角函数, 幅值为标准相电压幅值, 本文中设为 $220\sqrt{2}$ V, 相角是由电源电压波动前基波电压初相角 θ_{ip} 、波动引起的电源电压相位跳变角 γ 以及总容量最小补偿策略 β 角共同确定的。伴随相位跳变的电源电压波动时, 各电压电流相量之间关系如图 3 所示。

则三相目标电压函数为

$$\begin{cases} u_{L2a} = 220\sqrt{2} \sin(\omega t + \theta_{ip} + \gamma + \beta) \\ u_{L2b} = 220\sqrt{2} \sin(\omega t + \theta_{ip} + \gamma + \beta - \frac{2\pi}{3}) \\ u_{L2c} = 220\sqrt{2} \sin(\omega t + \theta_{ip} + \gamma + \beta + \frac{2\pi}{3}) \end{cases} \quad (15)$$

采用总容量最小补偿策略, 只需把波动后负荷端电压相量幅值补偿回波动前水平, 其相位可以改变。由图可见, 经过前面分析, 根据补偿单元提供能量最小的原则, 将不同情况下的 α 值代入式(13), 最终可求得 UPQC 串联侧需提供的补偿电压:

$$\begin{cases} u_{1a} = R_{1a}i_{1a} + L_{1a} \frac{di_{1a}}{dt} + \frac{N_1}{N_2}(u_{L2a} - u_{sa}) \\ u_{1b} = R_{1b}i_{1b} + L_{1b} \frac{di_{1b}}{dt} + \frac{N_1}{N_2}(u_{L2b} - u_{sb}) \\ u_{1c} = R_{1c}i_{1c} + L_{1c} \frac{di_{1c}}{dt} + \frac{N_1}{N_2}(u_{L2c} - u_{sc}) \end{cases} \quad (16)$$

式中： N_1 、 N_2 为串联侧变压器原边副边匝数。

2 仿真分析

搭建UPQC连接电网的Matlab仿真模型。仿真参数：三相电源相电压220 V，在0.04 s时电源电压发生带有相位跳变的电压跌落，跳变角为 30° ，幅值跌落到140 V。仿真结果如图5所示。

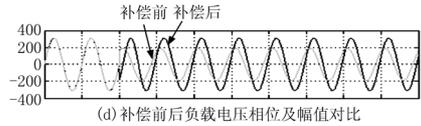
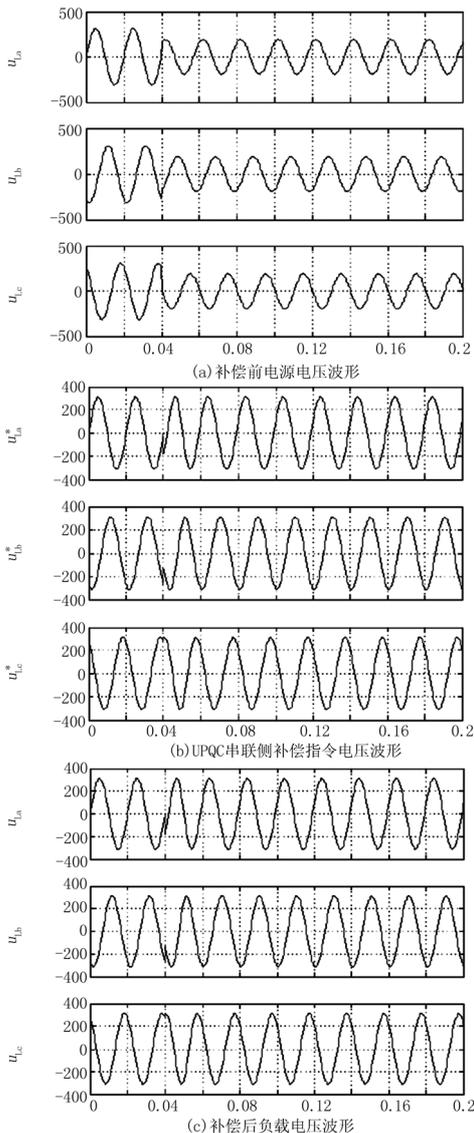


图5 采用基于瞬时无功理论考虑相位跳变的最小能量补偿法仿真结果

Fig.5 Simulation result of the minimum compensation algorithm considering phase jump based on the instantaneous reactive theory

经 Simulink 仿真验证，考虑相位跳变的总容量最小法在电压跌落和存在相角跳变的情况下，能准确检测计算出 UPQC 串联侧电压补偿信号并补偿到负载端，保持负载电压的稳定。

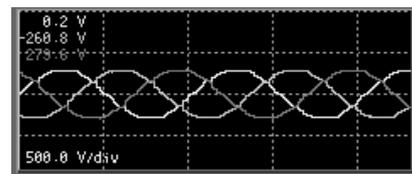
3 结果分析及实验验证

选择系统具体参数为：工频 50 Hz；相电压有效值 $U_L=220$ V；负载功率为 5.4 kW；负载相电流基波有效值为 $I_L=10.5$ A， $\cos\varphi = 0.8$ ；直流侧电压为 900 V。开关管的工作频率为 12.8 kHz，电源电压波动率 10%，即骤降到 198 V。

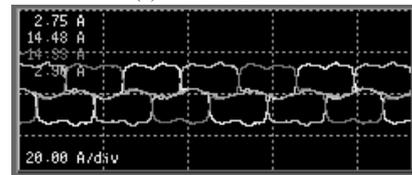
为验证容量计算的正确性，依据原理及计算结果构造实验样机，进行实验验证。

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，横坐标单位为 10 ms/格，纵坐标单位为 20 A/格。



(a) 三相负载电压波形



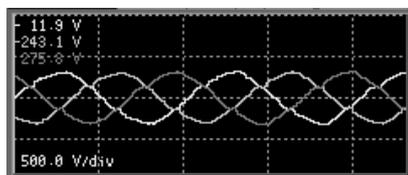
(b) 三相电源电流波形

图 6 补偿前负载电压及电源电流波形

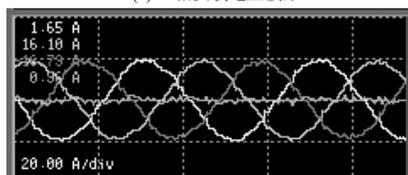
Fig.6 Load voltage and source current waveform before compensation

UPQC 补偿后三相负载电压及电源电流波形如

图 7 所示。其中图 7(a)为电源电压补偿后, 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 7(b)为补偿后三相电源电流, 横坐标单位为 10 ms/格, 纵坐标单位为 20 A/格。



(a) 三相负载电压波形



(b) 三相电源电流波形

图 7 补偿后负载电压及电源电流波形

Fig.7 Load voltage and source current waveform after compensation

从实验波形及测量结果可看出, 通过 UPQC 的补偿, 负载电压并没有由于电源电压的跌落受到影响, 依旧保持跌落前幅值。电源电流的 *THD* 值也从 25.1%, 24.8%, 26.2% 下降到 4.2%, 4.8%, 5.2%。实验结果证明, 串、并联侧功率流动分析以及基于最小能量补偿算法确定的主电路容量选取原则是正确可行的。

4 结论

由于统一电能质量控制器(UPQC)集电压型补偿装置、电流型补偿装置和储能装置于一体, 能实现多重电能质量的调节功能。因此其控制需要考虑 DVR 和 APF 的协调工作。本文首先从 UPQC 的工作原理出发, 以最常用左串-右并结构为例, 建立了其基波稳态等效电路; 基于瞬时无功理论及低通滤波器提取电源基波相电压初始相位及相位跳变角, 根据总容量最小的原则, 推导了电压的优化注入角。从而求取在电源电压波动情况下的补偿目标函数。并在 Simulink 仿真平台上进行了仿真, 在基于全控桥非线性负载由 DSP2812 控制样机系统上进行了验证。总容量最小的注入角, 使损耗减小, 提高了整体的效率; 基于瞬时无功理论考虑相位跳变的补偿方法在电压跌落和存在相角跳变的情况下, 能准确检测计算出 UPQC 串联侧电压补偿信号; 提高系统的可靠性和经济性。

参考文献

- [1] 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 restore[J]. Automation of Electric Power Systems, 2004, 28(21): 49-53.
- [2] 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.
- [3] 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. 1797-1802.
- [4] 肖湘宁, 徐永海, 等. 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 Hao. Research on the detection method of voltage sag characteristics[J]. Electric Power Automation Equipment, 2002, 22(1): 19-22.
- [5] Khadkikar V, Chandra A, et al. Conceptual study of unified power quality conditioner (UPQC)[C]//IEEE ISIE. 2006.1088-1093.
- [6] Kolhatkar Y Y, Das S P. Simulation and experimental investigation of an optimum UPQC with minimum VA loading[C]//IEEE PEDS. 2005.526-531.
- [7] 王兆安, 杨君, 等. 谐波抑制和无功功率补偿[M]. 北京:机械工业出版社, 1998.
WANG Zhao-an, YANG Jun, et al. Harmonic inhibition and reactive power compensation[M]. Beijing: China Machine Press, 1998.

收稿日期: 2009-11-26; 修回日期: 2010-04-02

作者简介:

巫付专 (1965-), 男, 副教授, 主要从事电力电子与电力传动的研究与教学工作; E-mail: lif_812@126.com

万健如 (1950-), 男, 教授, 博导, 主要从事电力电子与电力传动的研究与教学工作;

沈虹 (1978-), 女, 博士, 主要从事电力电子与电力传动的研究与教学工作。