

无隔离环节三相 UPQC 的故障限流保护的仿真研究

胡家为¹, 李国杰², 马锋²

(1. 紫光测控有限公司, 北京 100084; 2. 清华大学电机系电力系统国家重点实验室, 北京 100084)

摘要: 用户与供电公司都对电能质量水平提出了较高的要求。统一电能质量控制器 (UPQC) 正是由于兼有电压补偿和电流补偿的功能, 越来越受到人们的重视。而无隔离环节的三相统一电能质量控制器, 由于无需变压器等隔离环节, 因而环节少、成本低, 且克服了隔离变压器带来的一系列问题。在以前研究成果的基础上, 针对负载侧短路时引起的过流问题, 进行了研究, 提出了相应的控制策略, 从而限制了故障电流。最后通过 PSCAD/EMTDC 软件进行了仿真研究并取得仿真结果。

关键词: 无隔离环节; 三相统一电能质量控制器; 故障限流

Protection simulation study of over current for a three-phase unified power quality controller without isolating circuit

HU Jia-wei¹, LI Guo-jie², MA Feng²

(1. Unisplendour M&C Co., Ltd, Beijing 100084, China; 2. State Key Lab of Power Systems, Dept of Electrical Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

Abstract: Both of the power grid and the electrical consumer need high quality of power supply. The united power quality conditioner (UPQC) is an idea for the above purpose. The three-phase UPQC without isolating circuit has advantages in no isolating transformers. Based on the precious studies, current limiting control strategy is proposed to limit fault current when faults happen at the load side. Simulation studies under PSCAD/EMTDC are given to verify the validity of the proposed control strategies.

This project is supported by Beijing Natural Science Foundation Patent (No. 3073021).

Key words: no isolating circuit; 3-phase unified power quality conditioner (UPQC); fault current limited

中图分类号: TM711 文献标识码: A 文章编号: 1673-3415(2008)15-0014-04

0 引言

随着高科技工业的迅速发展, 对电能质量水平的要求也越来越高。一方面用户希望电网的电压稳定; 另一方面, 电网也希望用户不要产生谐波电流。统一电能质量控制器^[1-4] (UPQC) 正是由于同时具有电压补偿器和电流补偿器两者的功能, 改善负载侧的电压质量和电源侧的电流质量, 备受大家的青睐。在传统的 UPQC 拓扑中, 一般采用变压器隔离^[3,4], 也有采取直流单元进行隔离的方法^[5]。文献[6]介绍了一种新型的三相统一电能质量控制器的拓扑设计, 它既没有隔离变压器, 又无需在直流环节进行隔离, 且不存在交流短路、直流电容直通问题; 并提出了其并联单元与串联单元的控制方法, 从而改善了负载侧的电压质量和电源侧的电流质量。

文献[7]分析了串联型的动态电压补偿器的故

障限流作用, 但该文侧重于故障时电压电流的分析、计算及储能蓄电池的容量, 没有提出相应的控制策略。本文在以前研究成果^[5]的基础上, 针对负载侧短路时引起的过流问题, 提出了无隔离三相统一电能质量控制器的限流控制策略, 从而限制了负载侧故障时的电流, 保护了 UPQC 及用户设备。最后通过 PSCAD/EMTDC 软件进行了仿真研究并取得仿真结果。

1 三相 UPQC 的拓扑结构

本文研究的三相 UPQC 拓扑结构如图 1 所示^[5]。其中, C_1 和 L_1 分别为串联单元滤波电容和滤波电感; 左边半桥臂的两个绝缘门双极晶体管 (IGBT) 构成串联单元的逆变桥, 右边半桥臂的两个 IGBT 构成并联单元逆变桥; C_{dc} 为直流电容; L_2 是并联单元与系统间的滤波电感。

从图 1 看出, 无隔离环节三相 UPQC 的串并联

单元,通过具有对称性的相间组合,实现了无隔离变压器的目的;也不需要增加直流隔离环节。这样,它既实现了串联补偿电压的功能,使得用户端电压不受源电压跌落、骤升等影响,提高了用户端电压的质量;同时,它具有并联补偿负载谐波的功能,

使电网不受负载谐波电流的影响,改善了电网的电能质量。另外,由于跨相组合,即使发生单相电压 100% 跌落时,无隔离环节三相 UPQC 也能输出相应的电压量补偿电压跌落,从而保护用户端负载。

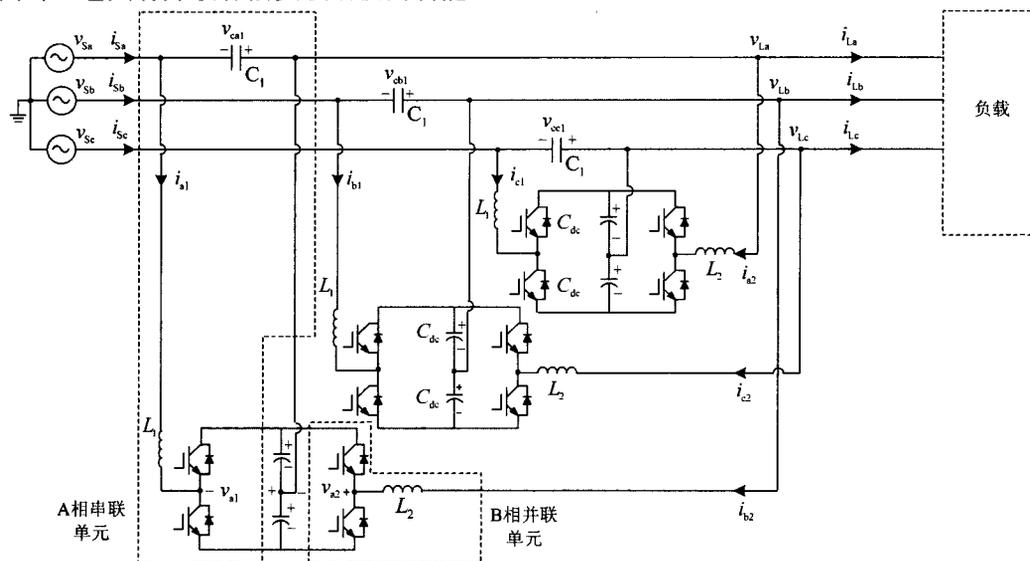


图 1 无隔离环节三相 UPQC 拓扑结构

Fig.1 Topology of the three-phase UPQC without isolating circuit

2 UPQC 限流控制

无隔离三相统一电能质量控制器由串联单元与并联单元构成。通常,串联单元是为了补偿源电压的电压波动、跌落、骤升等而输出相应的电压;并联单元输出电流以补偿负载的谐波电流。本文的串联单元是为了限制负载侧故障时的电流而输出与源电压反向的电压,从而限制故障电流,其控制策略

将与补偿源电压的不同。本文将首先分析故障限流时并联单元与串联单元的控制策略,最后分析系统的稳定性。

2.1 UPQC 的并联单元控制策略

并联单元是为了补偿负载电流产生的谐波,从而改善电源侧的电流质量。B 相控制策略框图如图 2 所示。

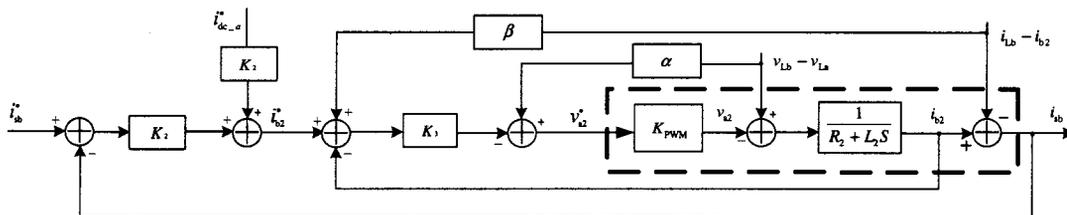


图 2 并联单元控制框图

Fig.2 Control block diagram for parallel VSC of UPQC module at phase B

图 2 中, R_2 是并联侧滤波电感的电阻, i_{Sb} 为源电流, i_{Sb}^* 为源电流参考值, $i_{dc_a}^*$ 为直流电压调节参考电流。为了考虑负载电压、电流扰动对补偿效果的影响,引入了电压扰动 $v_{Lb}-v_{La}$ 、电流扰动 $i_{Lb}-i_{b2}$ 两个量,具体关系如下:

$$i_{Sb} = G_3 i_{Sb}^* + G_4 i_{dc_a}^* + G_5 (v_{Lb} - v_{La}) + G_6 (i_{Lb} - i_{b2}) \quad (1)$$

G_3, G_4, G_5, G_6 分别是参考源电流 i_{Sb}^* 、直流电压调节参考电流 $i_{dc_a}^*$ 、电压扰动 $v_{Lb}-v_{La}$ 、电流扰动 $i_{Lb}-i_{b2}$ 到源电流 i_{Sb} 的闭环传递函数。

$$G_3 = \frac{K_2 K_3 K_{PWM}}{L_2 s + (R_2 + K_3 K_{PWM} + K_2 K_3 K_{PWM})} \quad (2)$$

$$G_4 = \frac{K_2 K_3 K_{PWM}}{L_2 s + (R_2 + K_3 K_{PWM} + K_2 K_3 K_{PWM})} \quad (3)$$

$$G_5 = \frac{1 - K_{PWM} \alpha}{L_2 s + (R_2 + K_3 K_{PWM} + K_2 K_3 K_{PWM})} \quad (4)$$

$$G_6 = \frac{L_2 s + R_2 + K_3 K_{PWM} - \beta K_3 K_{PWM}}{L_2 s + (R_2 + K_3 K_{PWM} + K_2 K_3 K_{PWM})} \quad (5)$$

其中: K_{PWM} 是将 PWM 换流站等效成一线形放大器的增益系数^[8]。为了补偿负载电压与电流扰动对源电流的影响, 加入前向因子 $\alpha=1/K_{PWM}$ 与 $\beta=(L_2 s + R_2)/K_3 K_{PWM} + 1$ 。

2.2 UPQC串联单元限流控制策略

负载侧故障时, 通过对负载电流的检测, 判断出负载侧发生故障。这时让串联单元输出与源电压反向的电压, 从而限制故障电流。故障期间, 控制框图如图3所示。

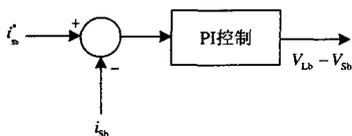


图3 故障限流控制框图

Fig.3 Control block diagram to limit fault current

从图3中, 得到

$$(V_{Lb} - V_{Sb}) = (k_p + \frac{k_i}{s})(i_{Sb}^* - i_{Sb}) \quad (6)$$

2.3 UPQC 故障限流稳定性分析

将式(6)代入式(1)中, 得到:

$$[1 + G_5(k_p + \frac{k_i}{s})]i_{Sb} = [G_3 + G_5(k_p + \frac{k_i}{s})]i_{Sb}^* + G_4 i_{dc-a}^* + G_5(V_{Sb} - V_{La}) + G_6(i_{Lb} - i_{b2}) \quad (7)$$

因此, 从 i_{Sb}^* 到 i_{Sb} 的闭环传递函数为:

$$G_3^* = \frac{sG_3 + G_5(sk_p + k_i)}{s + G_5(sk_p + k_i)} = \frac{k_2 k_3 k_{PWM}}{sL_2 + (R_2 + k_3 k_{PWM} + k_2 k_3 k_{PWM})} = G_3 \quad (8)$$

因此, 由于并联控制单元中的前向因子 $\alpha=1/K_{PWM}$ 的作用, 故障限流时的 PI 控制不对系统稳定性产生影响。从式(8)中看出, 当 $R_2 + k_3 k_{PWM} + k_2 k_3 k_{PWM} > 0$ 时, 传递函数 G_3 的极点将位于左半平面。

3 仿真结果

采用 PSCAD/EMTDC 仿真软件对所提出的三相新型 UPQC 及其控制策略作数值仿真。各参数如下:

电源线电压额定值: 380 V, 50 Hz

系统等值内阻抗: 0.001+j0.003 Ω

串联滤波器: $R_1=0.005 \Omega, L_1=2 \text{ mH}, C_1=20 \mu\text{F}$

并联单元滤波电感: $L_2=1 \text{ mH}, R_2=0.0025 \Omega$

储能单元: $C_{dc}=3000 \mu\text{F}, U_{dref}=1100 \text{ V}$

串联单元限流控制器参数: $k_p=20, k_i=1$;

并联单元控制器参数: $K_{PWM}=1, K_2=15, K_3=10$

3.1 三相故障

仿真期间, 负载侧在 0.5 s 发生三相故障, 接地阻抗为 $0.5 + j0.628 \Omega$ 。图4、图5分别为故障无限流与故障限流的仿真研究结果。通过比较得知, 无限流措施时, 故障电流很大, 约为正常运行时的 10 倍。采取限流控制后, 故障电流得到有效地限制。

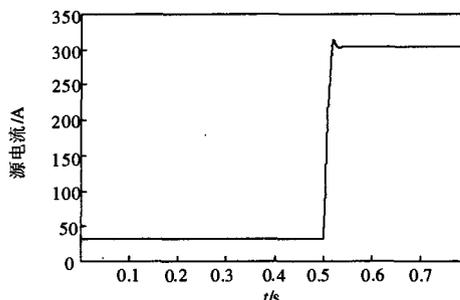


图4 故障无限流

Fig.4 Fault current without limiting

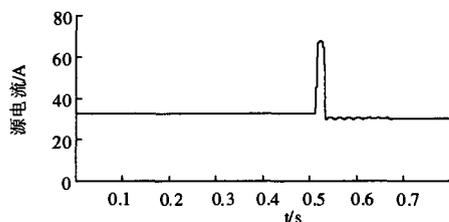


图5 故障限流

Fig.5 Fault current limited

3.2 其它故障分析

由于无隔离三相统一电能质量控制器的三相结构对称, 并联单元独立补偿谐波电流, 串联单元独立补偿负荷侧故障电流(当然, 还能补偿电源侧电压跌落及浪涌, 这里不作讨论)。通过 DSP 对三相电流分别进行快速检测, 做出独立判断并补偿相应的相电流, 如单相接地故障时仅补偿故障的一相

电流、另外两相串联单元开关不动作;两相故障时,仅补偿故障的两相电流、另外一相串联单元开关不动作。因此,无隔离三相统一电能质量控制器,对每相故障限流功能来说,它只检测、判断该相电流是否正常,是否需要补偿,每相具有独立补偿的功能,不需进行故障类型分析,每相补偿策略与故障类型无关。

4 结语

本文在以前研究成果的基础上,针对负载侧短路时引起的过流问题,进行了研究,并提出了相应的控制策略。经过分析表明,故障期间所采取的限流措施并没有影响系统并联单元的稳定性。最后通过 PSCAD/EMTDC 软件进行了仿真研究,仿真结果表明所提出的控制策略能有效地限制故障电流,从而克服了负载侧故障时 UPQC 装置只能采取旁路的缺陷。

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] 李国勇,刘汉奎,徐殿国,等.统一电能质量调节器的研究[J].电力电子技术,2003,37(1):74-78.
LI Guo-yong, LIU Han-kui, XU Dian-guo, et al. Study on Unified Power Quality Conditioner[J]. Power Electronics, 2003, 37 (1): 74-78.
- [3] 朱鹏程,李勋,康勇,等.统一电能质量控制器控制策略的研究[J].中国电机工程学报,2004,24(8):67-73.
ZHU Peng-cheng, 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.
- [4] 汤其彩,刘惠康,周华忠.统一电能质量调节器(UPQC)的补偿控制策略研究[J].继电器,2007,35(12):32-

35.

- TANG Qi-cai, LIU Hui-kang, ZHOU Hua-zhong. Research on Compensation Control Strategy of Unified Power Quality Conditioner[J]. Relay, 2007, 35 (12): 32-35.
- [5] 张秀娟,姜其荣,韩英铎.一种新型的单相统一电能质量调节器[J].电力系统自动化,2004,28(23):76-80.
ZHANG Xiu-juan, JIANG Qi-rong, HAN Ying-duo. A Novel Single Phase Unified Power Quality Conditioner[J]. Automation of Electric Power Systems, 2004, 28 (23): 76-80.
- [6] 张谢平,李国杰,孙元章.一种无隔离环节的三相统一电能质量控制器[J].电力系统自动化,2006,30(20):59-67.
ZHANG Xie-ping, LI Guo-jie, SUN Yuan-zhang. A Three-phase Unified Power Quality Controller Without Isolating Circuit[J]. Automation of Electric Power Systems, 2006, 30 (20): 59-67.
- [7] Choi S S, T. Wang X, Vilathgamuwa D M. A Series Compensator with Fault Current Limiting Function[J]. IEEE Trans on Power Delivery, 2005, 20(3): 2248-2256.
- [8] Vilathgamuwa D M, Wijekoon H W, Choi S S. A Novel Technique to Compensate Voltage Sags in Multi-line Distribution System—the Inter Line Dynamic Voltage Restorer[J].IEEE Trans on Indus Electron,2006, 53(5): 1603-1611.

收稿日期:2008-03-04; 修回日期:2008-04-08

作者简介:

胡家为(1965-),男,副研究员,从事电力系统保护、监控及电力电子等领域的研究;E-mail: hujiawei@mail.tsinghua.edu.cn

李国杰(1965-),男,副教授,从事电能质量、电力系统分析与控制及新能源的研究;

马锋(1983-),男,硕士研究生,从事电能质量、电力系统分析与控制的研究。

(上接第13页 continued from page 13)

- [9] 段建东,张保会,周艺.利用电流行波进行超高压输电线路故障类型识别的研究[J].中国电机工程学报,2005,25(7):58-62.
DUAN Jian-dong, ZHANG Bao-hui, ZHOU Yi. Study of Fault-type Identification Using Current Traveling-waves in Extra-high-voltage Transmission Lines[J]. Proceedings of the CSEE, 2005, 25(7): 58-62.

- [10] 张纬钺,何金良,高玉明.过电压防护与绝缘配合[M].北京:清华大学出版社,2002.

收稿日期:2007-11-21; 修回日期:2008-04-03

作者简介:

周健(1972-),男,硕士,工程师,从事电网规划及电网建设工程管理工作。E-mail:mmzjcpu@sina.com