

具有谐波抑制功能的综合电能质量控制系统设计

常亮亮，涂春鸣，罗 安，帅智康，杨晓峰，兰 征
(湖南大学电气与信息工程学院，湖南省长沙市 410082)

摘要：传统电压无功装置在调节时大都不考虑谐波因素的影响，而实际工程中谐波会带来很大危害。提出了一种具有谐波抑制功能的综合电压无功电能质量调节装置，并分析了系统谐波放大产生的原因及其抑制策略。此外，采用了多目标的电压无功谐波优化控制，同时考虑电压质量、无功、网损和谐波畸变率等多个优化目标，建立了多目标优化模型，实现对电压无功谐波的最优控制策略。仿真和实验证明了该装置及所得控制策略的有效性。

关键词：电能质量；电压无功控制；多目标；复合控制

0 引言

随着中国电力系统的快速发展，用户对供电质量和可靠性的要求越来越高。目前国内的许多变电站中装设了用于电压无功调节的有载调压变压器(OLTC)和并联补偿电容器组(TSC)。有载调压变压器可以在带负荷的情况下切换分接头，它是多电压级网络中进行电压控制和无功功率流动的重要手段，也是降低网络有功功率和无功功率损耗的重要途径之一。并联补偿电容器组除可以改善系统的功率因素，降低电网中的电能损耗，提高系统的经济性，还可以调整系统电压，维持负荷点的电压水平，提高供电质量^[1]。

文献[2-3]介绍了新型的电压无功控制(VQC)系统，对传统的和改进的控制系统进行了分析，但还只是在传统基础上采用了新的控制算法，对系统性能没有更高的提升。文献[4]介绍了有源电力滤波器(APF)与其他无功补偿设备的联合运行，仅仅是对无功和谐波的叠加补偿，并没有考虑变压器的调节手段，没有充分利用现有变电站的电压无功调节设备，增加了运行的成本。

由于传统的 VQC 并没有考虑谐波的影响，而在有载调压变压器的分接头调节和电容器投切中都会产生谐波，再加上系统的背景谐波和负载谐波，不仅对电网的电能质量有严重的影响，还会引起继电保护和自动装置的误动作，使电能计量出现混乱，最严重的是在变压器调压时很可能会产生多个谐振点，从而使谐波放大、电容器拒动作，引起严重事故。

本文提出一种新型的具有谐波抑制功能的综合 VQC 电能质量调节装置，有源部分不仅能够消除谐波，还可以动态地调节谐波阻抗，避免电网局部发生谐振。

1 电路拓扑结构

本文提出的综合 VQC 电能质量调节装置如图 1 所示，由有载调压变压器、并联补偿电容器组和注入式并联有源电力滤波器(HAPF)组成。有源部分通过耦合变压器与由 L_1, C_1 构成的串联谐振支路并联再与注入支路 C_2 串联接入电网。利用 L_1 和 C_1 在基频处发生串联谐振时阻抗很小的特点，将电网基波电压加在注入电容 C_2 上，而有源部分只承受很小的谐波电压，从而有效降低有源部分的容量，在很大程度上克服了有源电力滤波器的容量限制，使其适用于中高压电网，并可通过有载调压变压器和并联补偿电容器组进行电压调节和无功的分级补偿，更易实现综合 VQC 电能质量调节装置的大功率应用，并降低系统成本^[5-7]。

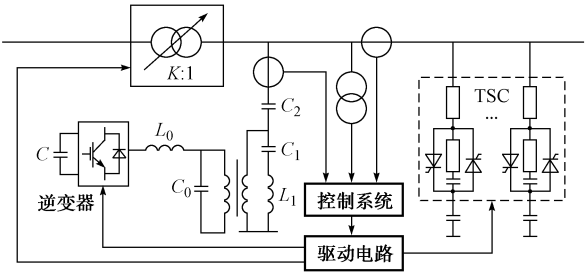


图 1 综合 VQC 电路原理
Fig. 1 Integrated VQC circuit diagram

2 电网谐波放大及谐振点的分析

电容器对谐波电流的放大作用不仅危害电容器

收稿日期：2010-06-22；修回日期：2010-09-29。
国家自然科学基金资助项目(50907019)；国家高技术研究发展计划(863 计划)资助项目(2008AA05Z211)。

本身,而且会危及电网中其他电气设备,严重时会造成电气设备损坏,甚至破坏电网的正常运行。一般电容器组都会串接电抗器用于限制合闸涌流,减轻电网电压波形畸变和防止发生系统谐波谐振,但是由于负载的变化会引起谐振点发生变化,使得电容器组易与电网发生谐振,而有源滤波器可动态调节电网谐波阻抗,就可以避免谐振点的出现。

系统 n 次谐波电流分布等效图如图 2 所示。图中: I_n 为等效负载谐波源; I_{sn} 和 I_{cn} 分别为流入系统支路和电容器支路的 n 次谐波电流; $nX_s(1+\lambda)$ 为系统 n 次谐波等效阻抗, X_s 为系统支路电抗, λ 为变压器分接头变化百分比; X_L 为电容器组串接的电抗器; K_L 为串抗率,满足 $K_L = X_L/X_C$, X_C 为电容器支路电抗; k 为电容器投切组数。

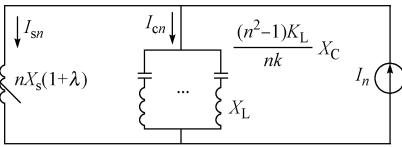


图 2 VQC 谐波电流分布

Fig. 2 Harmonic current distribution of VQC

由图 2 可得系统谐波电流放大倍数为:

$$F(n) = \frac{I_{sn}}{I_n} = \frac{nX_L - \frac{X_C}{n}}{knX_s(1+\lambda) + nX_L - \frac{X_C}{n}} = \frac{1}{1 + \frac{kn^2 X_s(1+\lambda)}{(n^2 K_L - 1)X_C}} \quad (1)$$

$F(n)$ 的值决定了电容器对系统支路谐波电流的放大情况。

图 3 中反映了当变压器变换挡位和电容器分级投切时的谐波放大波形。在进行分接头调节和电容器投切时都有可能出现谐振点,如果不及时调整就可能造成严重事故。

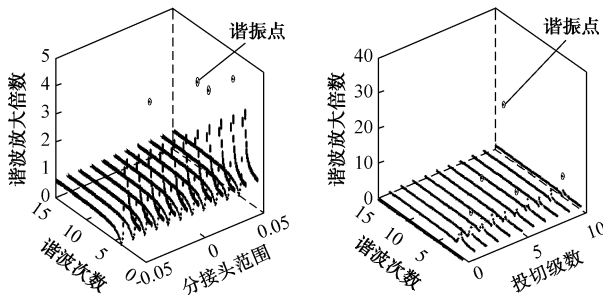


图 3 挡位和级数变化时的谐波放大波形

Fig. 3 Harmonic amplification wave

文献[8]给出了混合有源滤波器的单相等效电路,采用复合控制策略后等效模型如图 4 所示。

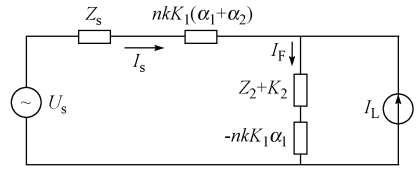


图 4 复合控制策略系统等效电路

Fig. 4 System circuit based on compound control

图中各变量的具体含义见文献[8],流入系统支路的电流 I_s 为:

$$I_s = \frac{K_2 + Z_2 - nkK_1 \alpha_1}{nkK_1 \alpha_2 + K_2 + Z_s + Z_2} I_L + \frac{U_s}{nkK_1 \alpha_2 + K_2 + Z_s + Z_2} \quad (2)$$

通过控制有源滤波器的控制系数可动态调节电网谐波阻抗 $nkK_1(\alpha_1 + \alpha_2)$,避免谐振的发生。

3 综合 VQC 补偿装置的控制策略

3.1 多目标电压无功谐波优化算法

该算法不再追求单一性能的最优,而是着眼于从全局进行系统优化,从而提高系统的经济性和可靠性。一方面,以系统运行可靠性为基础,把电压合格、无功达标、网损、电压波动和谐波畸变率等各指标的目标限值作为目标要求,运用优化方法,得出其控制参数的最优解;另一方面,以变压器分接头、并联补偿电容器和有源电力滤波器为控制变量,建立配电网多目标电压无功谐波优化模型[9]。

在多目标优化设计中,其设计目标是计算系统的可靠度 R :

$$R = \int_{g(x) > 0} f_X(x) dx \quad (3)$$

式中: $f_X(x)$ 为联合概率密度函数; $x = [x_1, x_2, \dots, x_n]^T$, 为基本随机参数向量; $g(x)$ 为状态函数,可以表示为综合 VQC 系统的 2 种状态: $g(x) < 0$ 为控制不合格, $g(x) > 0$ 为控制合格。

极限状态方程 $g(x) = 0$ 是 n 维曲面,称为极限状态表面。当基本随机参数向量 x 服从正态分布时,可用失效点处状态表面的切平面近似地模拟极限状态表面,由此得到可靠度的一阶估计量为:

$$\phi(\beta) = \phi\left(\frac{u_g}{\sigma_g}\right) = \phi\left(\frac{E(g(x))}{\sqrt{D(g(x))}}\right) \quad (4)$$

式中: $\phi(\cdot)$ 为标准正态分布函数; β 为可靠性指标; u_g, σ_g 分别为状态函数的均值和标准差, $u_g = \bar{g}$ 。

配电网多目标优化模型可表示为:

$$\begin{cases} \min f(x) = w_1 f_1(x) + w_2 f_2(x) + w_3 f_3(x) + w_4 f_4(x) \\ \text{s. t. } T_{\min} \leq T_1 \leq T_{\max} & 0 \leq Q_c \leq Q_{\max} \\ 0 \leq \lambda_{\text{THD}_1} \leq \lambda_{\text{THD}_{\max}} \end{cases} \quad (5)$$

式中: $\omega_1, \omega_2, \omega_3, \omega_4$ 分别为电压、无功、损耗和谐波函数的加权因子,其值取决于各分目标函数的数量级及重要程度; $f_1(x)$ 为全网电压合格情况、节点电压偏差指标; $f_2(x)$ 为电压波动性指标; $f_3(x)$ 为全网网损指标; $f_4(x)$ 为电网谐波指标; T_1, Q_c 分别为变压器分接头和并联补偿电容器无功出力; λ_{THD_1} 为有源电力滤波器补偿后的电网电流畸变率。

3.2 复合电流的模糊 PI 控制

图 5 所示为注入式有源电力滤波器复合控制框图。谐波电流基准信号来自电网电流 I_s 、负载电流 I_L 和优化得到的谐波治理系数 K ,也就是控制 $I_c^* = (k_1 I_{Lh} + k_2 I_{Sh})K$ 。这种控制方式下,可对负载中的谐波电流进行较好的补偿,而且使系统具有更好的动态性能和稳定性^[10-12]。

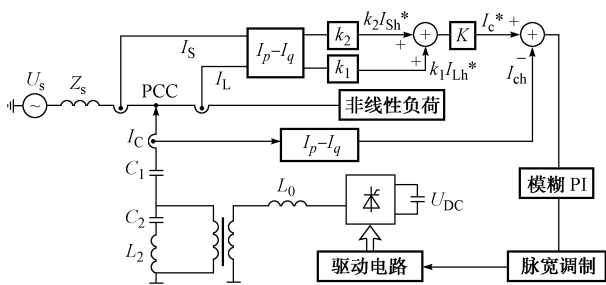


图 5 系统复合电流闭环控制
Fig. 5 Combination current closed-loop control

模糊比例积分(PI)控制器的结构框图如图 6 所示。控制器的输入是电网侧和负载侧的谐波参考值与实际值的偏差 e 以及偏差变化 Δe 。令 $e = I_c^* - I_c$,则 $\Delta e = \Delta(I_c^* - I_c)$,运用模糊推理进行模糊运算,便可得到该时刻的 ΔK_P 和 ΔK_I ,实现 PI 参数的最佳调整。根据最大的变化范围确定输入 $e, \Delta e$ 和输出 $\Delta K_P, \Delta K_I$ 相应的论域空间均为 $[-6, -5, -4, -3, -2, -1, 0, 1, 2, 3, 4, 5, 6]$;在论域内分别定义输入和输出参考模糊集为 $e, \Delta e, \Delta K_P$ 和 ΔK_I 。

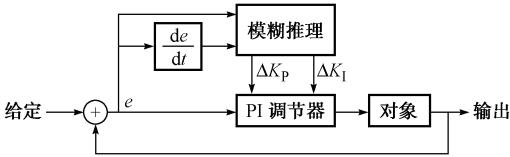


图 6 模糊 PI 控制器结构
Fig. 6 Block diagram of fuzzy-PI controller

将输入、输出变量的语言值均分为 7 个,即 $\{\text{NB}, \text{NM}, \text{NS}, 0, \text{PS}, \text{PM}, \text{PB}\}$,隶属度函数采用灵敏性高的高斯函数。对输入的 e 和 Δe ,在取得相应的语言值后,根据整定规则表,并经公式法模糊决策,分别得出 2 个修正参数的 $\Delta K_P, \Delta K_I$ 的模糊量,再由模糊 PI 控制器整定的 2 个修正参数进行去模

糊化,从而取得精确量以计算输出控制量。

4 仿真和实验研究

根据图 1 所示的结构搭建仿真模型,仿真参数根据某变电站实际测量数据等效:三相电源电压为 35 kV,频率为 50 Hz;5 次、7 次、11 次、13 次谐波电流分别为 108.9 A,56.8 A,80.3 A 和 44.5 A。

表 1 中,单一目标优化分别以电压合格、无功达标、网损最小、畸变率最低为目标函数得到结果。

表 1 优化前后各目标值比较
Tab. 1 Comparison of the target value before and after optimization

目标量	电压合格	无功达标 (功率因数)	网损/ %	谐波电压 畸变率/%
目标限值	0.9~1.1	0.95~1.00	0~3	0~4
单一目标	1.0	0.92	5	5
优化	1.1	1.00	1	6
	1.2	-0.98	0	7
	0.9	0.93	5	0
综合优化	1.0	0.95	1	3

从表 1 中可以得到,应用常规的单一目标设计方法只能使某一种目标达到理想要求,其他目标不能得到保证,从而使得运行达不到各方面的要求;而运用综合优化算法后得到的控制目标将考虑到运行的实际问题,电压、无功、网损和畸变都综合在内使之达到预定目标。此外,优化函数还可以进行调整,使其达到稳定性与经济性的统一。

图 7 对综合 VQC 设备投入前后的电流波形进行了对比,电流畸变率从 18.6% 到接近正弦波的 2%,谐波治理效果显著。

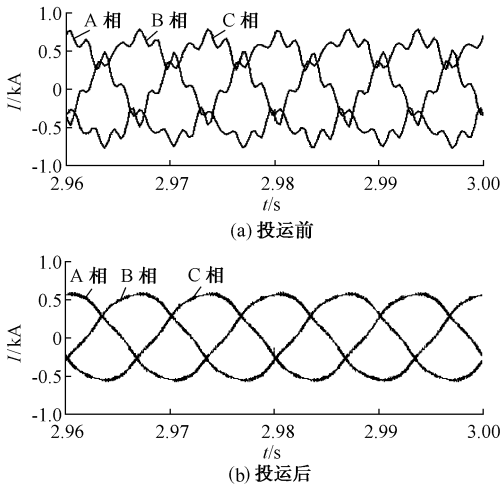


图 7 综合 VQC 设备投运前后的电流波形
Fig. 7 Current waveform before and after integrated VQC devices operation

图 8 对进行电压无功谐波优化控制前后的电压

波形进行了对比, V_{pu1} 是未投入装置时的电压波动情况, V_{pu2} 是投入装置后的电压波动情况。可以看出: 采用电压无功谐波优化算法时的效果明显好于未采用优化时的效果, 未优化之前装置依靠传统的控制策略补偿, 在调节上对电压的波动较大, 响应时间也较慢, 特别是在电压无功调节的盲区, 设备无法确定控制方式, 导致调节时间延长; 而优化后的控制策略明确了设备的具体操作步骤, 响应时间缩短, 稳定性提高。

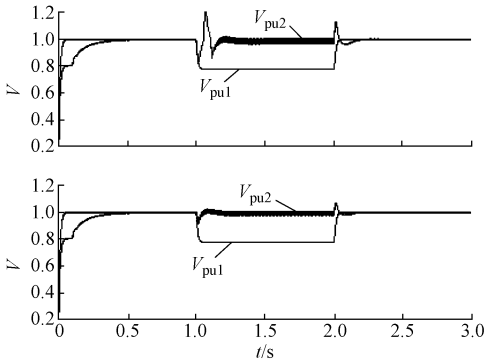


图 8 电压无功谐波优化前后的电压波形

Fig. 8 Voltage waveform before and after voltage reactive power and harmonic optimization

为验证系统的可靠性, 根据上述思想搭建了实验室简易低压综合 VQC 系统, 其投运前后 35 kV I 母电压、电流、功率因数波形如图 9 所示。

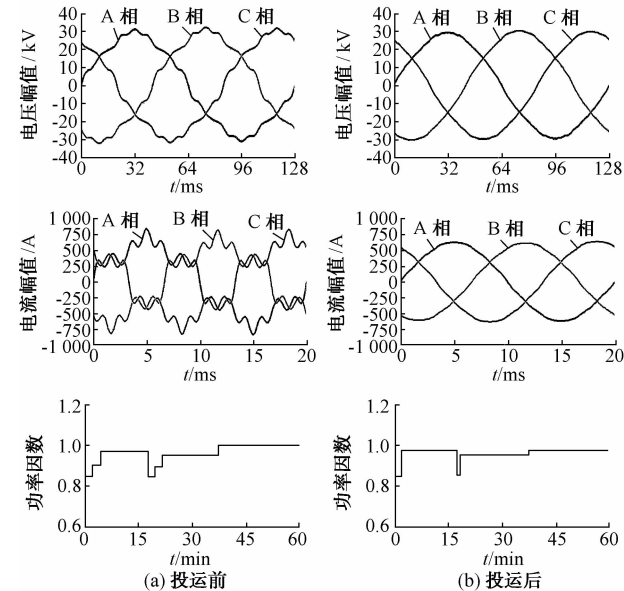


图 9 装置实验波形

Fig. 9 Experimental waveforms of the equipment

从上位机获得的电压、电流和功率因数波形来看, 与仿真研究得到的波形一致, 从而更好地证明了该思路的正确性与可靠性, 为工程应用奠定了基础。

5 结语

本文对具有谐波抑制功能的新型 VQC 结构进行了分析, 并在此基础上建立了电压无功谐波优化控制模型和基于模糊 PI 控制的复合电流控制策略。

采用电压无功谐波优化控制, 同时考虑电压质量、无功、网损和谐波等多个优化目标, 建立多目标电压无功优化模型, 提高了系统的控制精度, 减少了控制装置的盲区, 并有利于系统稳定。复合电流模糊自适应 PI 控制可对负载中的谐波电流进行较好的补偿, 而且使系统具有更好的动态性能和稳定性, 有效限制误差电流, 改善滤波器性能, 提高直流侧电压利用率, 抑制了电网调节过程中可能发生的谐振现象。

通过仿真和实验研究证明了本装置和优化算法的可行性和优越性。

参考文献

- [1] 王兆安, 杨君, 刘进军. 谐波抑制与无功补偿[M]. 北京: 机械工业出版社, 1998.
- [2] 陈树恒, 李兴源, 刘群英. 基于变电站逻辑自适应的主站电压/无功控制系统[J]. 电力自动化设备, 2009, 29(5): 57-60.
CHEN Shuheng, LI Xingyuan, LIU Qunying. Development of master station voltage/reactive power automatic control system based on adaptive substation logic [J]. Electric Power Automation Equipment, 2009, 29(5): 57-60.
- [3] 白钟. 新型电压无功控制装置的设计与应用[J]. 电力系统自动化, 2004, 28(1): 85-87.
BAI Zhong. Design and application of a new type of voltage and reactive power control device[J]. Automation of Electric Power Systems, 2004, 28(1): 85-87.
- [4] 邓礼宽, 姜新建, 朱东起, 等. APF 和 SVC 联合运行的稳定控制[J]. 电力系统自动化, 2005, 29(18): 29-32.
DENG Likuan, JIANG Xinjian, ZHU Dongqi, et al. Stability control of a combined system of APF and SVC[J]. Automation of Electric Power Systems, 2005, 29(18): 29-32.
- [5] 朱桂萍, 王树民. 电能质量控制技术综述[J]. 电力系统自动化, 2002, 26(19): 28-40.
ZHU Guiping, WANG Shumin. A survey on power quality control technology[J]. Automation of Electric Power Systems, 2002, 26(19): 28-40.
- [6] 陈保刚, 赵书强, 杨颖. 考虑谐波因素的变电站电压无功自动控制研究[J]. 电力自动化设备, 2006, 4(26): 43-46.
CHEN Baogang, ZHAO Shuqiang, YANG Ying. VQC in substation considering harmonic wave [J]. Electric Power Automation Equipment, 2006, 4(26): 43-46.
- [7] 罗安, 付青, 王丽娜, 等. 变电站谐波抑制与无功补偿的大功率混合型电力滤波器[J]. 中国电机工程学报, 2004, 24(9): 115-123.
LUO An, FU Qing, WANG Lina, et al. High-capacity hybrid power filter for harmonic suppression and reactive power compensation in the power substation[J]. Proceedings of the CSEE, 2004, 24(9): 115-123.
- [8] 范瑞祥, 罗安, 周柯, 等. 并联混合型有源电力滤波器建模和控制策略分析[J]. 中国电机工程学报, 2006, 26(12): 55-61.
FANG Ruixiang, LUO An, ZHOU Ke, et al. The modeling

- and the control strategy analysis of shunt hybrid active power filters[J]. Proceedings of the CSEE, 2006, 26(12): 55-61.
- [9] 石嘉川,刘玉田. 计及分布式发电的配电网电压优化控制[J]. 电力系统自动化,2007,13(31):47-51.
- SHI Jiachuan, LIU Yutian. Multi-objective voltage control in distribution networks with distributed generation [J]. Automation of Electric Power Systems, 2007, 13(31): 47-51.
- [10] SENINI S, WOLFS P J. Analysis and design of a multiple-loop control system for a hybrid active filter[J]. IEEE Trans on Industrial Electronics, 2002, 49(6): 1283-1292.
- [11] 曾国宏,郝荣泰. 有源滤波器滞环电流控制的矢量方法[J]. 电力系统自动化,2003,27(5):31-35.
- ZENG Guohong, HAO Rongtai. A novel phase-correlating hysteresis current control method for active power filter[J]. Automation of Electric Power Systems, 2003, 27(5): 31-35.
- [12] 帅智康,罗安,范瑞祥,等. 注入式混合有源电力滤波器的注入支路设计[J]. 电力系统自动化,2007,31(3):57-60,75.

SHUAI Zhikang, LUO An, FAN Ruixiang, et al. Injection branch design of injection type hybrid active power filter[J]. Automation of Electric Power Systems, 2007, 31(3): 57-60, 75.

常亮亮(1983—),男,通信作者,硕士研究生,主要研究方向:电力电子在电力系统的应用。E-mail: cll150@163.com

涂春鸣(1976—),男,教授,主要研究方向:电力电子技术、谐波抑制及无功功率补偿。E-mail: chunming_tu@263.net

罗安(1957—),男,教授,博士生导师,主要研究方向:电力有源滤波、无功补偿、控制理论和技术等。E-mail: an_luo@hnu.cn

Design of Integrated Power Quality Control System with Harmonic Suppression

CHANG Liangliang, TU Chunming, LUO An, SHUAI Zhikang, YANG Xiaofeng, LAN Zheng
(Hunan University, Changsha 410082, China)

Abstract: Traditional voltage quality control devices do not consider the harmonic factors in the regulation, but excessive harmonics may cause great damages in the actual project. An integrated VQC power quality regulating devices with harmonic suppression is proposed, the causes of harmonic amplification and suppression strategies are discussed. Furthermore, a multi-objective optimal control model is designed, considering power quality, reactive power, power losses and harmonics at the same time. Simulation and experimental results prove the effectiveness of the device and the control strategy.

This work is supported by National Natural Science Foundation of China (No. 50907019) and National High Technology Research and Development Program of China (863 Program) (No. 2008AA05Z211).

Key words: power quality; voltage and reactive power control; multi-objective; compound control