

DOI:10.3969/j.issn.1001-4551.2017.04.016

TSC 无功补偿控制策略研究及仿真分析^{*}

邓得洋,张振国^{*},李树娟,叶玉曜
(上海理工大学 光电信息与计算机工程学院,上海 200093)

摘要:针对工厂中负载功率因数较低、电网向负载传输的无功功率较大,而导致电网电能损耗增大,电网电压不稳定的问题,对 TSC 动态无功补偿的原理和传统控制策略的弊端进行了研究,对基本控制策略、九域图控制策略、模糊控制策略进行了归纳,提出了一种基于模糊控制的改进型九域图无功补偿模糊控制策略,利用 Matlab 构建仿真模型,对用电负荷大小和功率因数发生突变时改进型控制策略的实时监测和控制性能进行了仿真。研究结果表明,以晶闸管投切电容器作为无功补偿方式的改进型无功补偿控制策略能实时快速地监测电网状态变化,并精准完成电容器投切动作,电网参数在一个电压周期内调整完毕并趋于稳定,功率因数波动幅度小,无过补偿,无投切振荡,系统反应迅速灵敏。

关键词:TSC 无功补偿;控制策略;仿真

中图分类号:TM714.3

文献标志码:A

文章编号:1001-4551(2017)04-0403-05

Research and simulation of TSC reactive power compensation control strategy

DENG De-yang, ZHANG Zhen-guo, LI Shu-juan, YE Yu-yao

(School of Optical-Electrical and Computer Engineering, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China)

Abstract: Aiming at the problem of increase of the power loss and instability of grid voltage resulting from low load power factor of factory and the increase of reactive power which flow from grid to load, the principle of TSC dynamic reactive power compensation and the disadvantages of the traditional control strategy were studied. In addition, basic control strategy, "JiuYu diagram method" control strategy and fuzzy control strategy were summarized. A new control method based on the combination of fuzzy control strategy and improved "JiuYu diagram method" control strategy was put forward and simulated in Matlab. The results indicate that the improved control strategy based on the TSC which used in the whole working process of reactive power compensation can accurately and rapidly cast or cut capacitor and avoid oscillation and super compensation.

Key words: TSC reactive power compensation; control strategies; simulation

0 引言

随着各种工业设备如电缆车、车床等大量投入使用,工厂用电负荷中异步电机所占比例越来越大,而异步电机工作特性为感性,电流滞后于电压,无功功率需

求量较大,这将使负荷功率因数偏低,如果无功功率不能就地补偿,用户负荷所需要的无功功率就要全靠发电、配电设备长距离提供,这就会使输电、配电线路无功电流增大,最终导致输、配电线路发热损耗和线路电压降增大,供电质量恶化,严重时可能会使系统电压崩溃,造成大面积停电事故。然而传统无功补偿控制策

收稿日期:2016-10-11

基金项目:沪江基金资助项目(31402/D1402)

作者简介:邓得洋(1990-),男,湖北孝感人,硕士研究生,主要从事电力电子与电力传动方面的研究. E-mail:2466848612@qq.com

通信联系人:张振国,男,副教授. E-mail:l3030@126.com

略不能实时应对各种负荷变化情况,而且投切方式不合理,容易发生“投切振荡”现象^[1],因此改进无功补偿控制策略十分关键。

本研究将介绍几种基本 TSC 无功补偿控制策略并分析其弊端^[2-3],同时引入改进型九域图模糊控制策略^[4],分析其原理并用 Matlab 进行仿真,以验证该控制策略的可行性和优越性。

1 无功补偿基本控制策略

根据检测量的不同,无功补偿基本控制策略可以分为电压控制法、电流控制法、功率因数控制法和无功功率控制法 4 种类型。

1.1 电压控制法

电压控制法是将检测系统电压作为控制的输入量,根据实际情况设定电压的上下限值 $U_{\max}$ 和 $U_{\min}$,某一时刻检测到电网电压 U_{RL} ,当 $U_{\text{RL}} > U_{\max}$ 时补偿装置从电网上切除电容,当 $U_{\text{RL}} < U_{\min}$ 时,投入电容, U_{RL} 随负载的变化而变化,然而电压控制法只检测电压量,并不能准确保证无功功率平衡。

1.2 电流控制法

与电压控制法类似,电流控制法检测量为系统电流,同样设定电网电流上限值 $I_{\max}$ 和下限值 $I_{\min}$,实际检测电网电流 I_{RL} , $I_{\text{RL}} > I_{\max}$ 时切除电容减少补偿的容性电流, $I_{\text{RL}} < I_{\min}$ 时投入电容,用容性电流补偿负载的感性电流。电流控制法缺点在于电流检测不准确,速度慢,电网中冲击电流还会造成该控制法的误动作。

1.3 功率因数控制法

功率因数控制法是同时检测电网电压和电流并计算出功率因数 $\cos\varphi$,根据用电指标来设定允许的功率因数范围,通过判断实际电网功率因数与设定功率因数范围的关系来决定电容器的投或切动作,功率因数控制法将电网最终需要达到指标作为控制输入量,可以灵活地应对负载的变化,但其缺点是容易引起“投切振荡”,如果投入一组电容器,功率因数超过上限值,而切下这组电容器,功率因数又低于下限值,这将导致反复投切,即引起“投切振荡”。

1.4 无功功率控制法

无功功率控制是检测三相电网电压和电流并计算无功功率,再由设定的功率因数值计算出无功缺额并向电网投切电容器,补偿无功功率,实现电源侧无功功率在允许的范围内,其缺点是容易引起“投切

振荡”。

2 改进型九域图模糊控制策略

TSC 无功补偿的实际应用中都是采用一组容量不等的电容器构成离散的有级调节系统,而这些固定容量电容器应对复杂多样的负荷变化的能力是有限的,而模糊控制策略是模仿人脑的思维对模糊对象进行识别和判决,该方法符合 TSC 的特点,也解决了传统九域图中部分区域容易出现投切振荡的问题。

2.1 九域图控制策略

“九域图”采用二维输入量电网电压和系统无功功率来控制电容器投切,由电压和无功功率的上下限值把系统运行区域分为 9 个区域, Q_H 和 Q_L 分别为电网向负载提供的无功功率上限值和下限值,对应的功率因数为 $\cos\varphi_L$ 和 $\cos\varphi_H$, U_H 和 U_L 分别为负载端电压上限值和下限值,当系统运行的区域电压和功率因数均为正常值时,系统无投切电容器动作,保持运行状态,当系统运行在其他区域时,每个区域设置相应的模糊控制策略,从而决策出投或切一定容量的电容器,让系统尽量保持在稳定工作区。

2.2 模糊控制策略

传统控制策略通常用于解决确定的可以用数学语言精确描述的系统,而对于复杂控制系统,往往采取简化系统以达到控制目的,而在简化过程中因忽略原系统某些特性,从而使最终控制效果不尽理想,因此本研究尝试用模糊控制策略解决这类问题。

2.2.1 TSC 无功补偿数学模型建立

无功补偿的目的在于通过晶闸管投切电容器实现电网电压在允许的范围内波动,同时最大程度降低流入电网的无功功率,提高功率因数。其数学模型为:

$$U_{\min} \leq U \leq U_{\max} \quad (1)$$

$$\cos\varphi_{\min} \leq \cos\varphi \leq 1 \quad (2)$$

$$Q_{\min} \leq Q \leq Q_{\max} \quad (3)$$

$$\min \{K_1(U - U_o)^2 + K_2(Q_L + Q_C - Q_o)^2\} \quad (4)$$

式中: U —靠近负荷端电压, U_o —设定电压值, Q_o —设定的无功功率, Q_L —负荷端无功功率, K_1 —电压权系数, K_2 —无功功率权系数。

2.2.2 无功补偿模糊控制模型

系统输入量为电网电压和电流,经数据采集模块转换后得到模糊控制器的两个输入量电压偏差 e_u 和

功率因数偏差 e_φ , 输出量为无功功率补偿量 e_Q 。无功补偿模糊控制模型如图 1 所示。

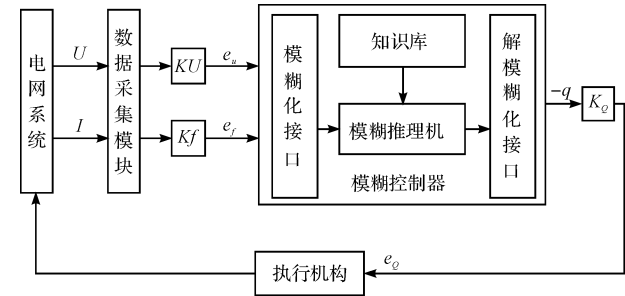


图 1 无功补偿模糊控制系统框图

将 e_u 、 e_φ 和 e_Q 的映射区间均表示为 $\{-6, -5, -4, -3, -2, -1, 0, 1, 2, 3, 4, 5, 6\}$, 若测得电压偏差实际取值范围为 $[e_{u1}, e_{u2}]$, 功率因数偏差的实际取值范围为 $[e_{\varphi1}, e_{\varphi2}]$, 则二者映射到区间 $[-6, 6]$ 可得: $K_u = 12/(e_{u2} - e_{u1})$, $K_\varphi = 12/(e_{\varphi2} - e_{\varphi1})$ 。

在实际应用中, 假设对于 10 kV 的变电站的母线电压最大波动范围为 $\pm 7\%$, 即 $[9.3 \text{ kV}, 10.7 \text{ kV}]$, 则偏差波动范围为 $[-0.7 \text{ kV}, +0.7 \text{ kV}]$, 而无功补偿设备电压检测点位于变压器二次侧, 其标准线电压为 380 V, 则二次侧电压偏差波动范围为 $[-26.6 \text{ V}, +26.6 \text{ V}]$, 由模糊论域范围 $[-6, 6]$ 可知量化因子 $K_u = 0.23$ 。

对于功率因数, 不同的电网有着不同的要求^[5], 工业用电允许的功率因数最低值为 0.8, 农业用电允许的功率因数最低值为 0.7, 而对于变电站, 理想的功率因数为 0.9 以上, 假设功率因数偏差波动范围为 $[-0.2, +0.2]$, 由模糊论域范围 $[-6, 6]$ 可知量化因子 $K_\varphi = 30$, 假设电容器组容量均分, 则 $K_Q = 1$, 则 e_u 、 e_φ 和 e_Q 的模糊子集为: $\{\text{NB}, \text{NM}, \text{NS}, \text{ZE}, \text{PS}, \text{PM}, \text{PB}\}$ ^[6]。

2.2.3 隶属函数

隶属函数一般是由某一控制领域实际经验总结出来的近似函数。一般三角形隶属函数就可以解决大部分问题^[7], 如下式:

$$F(x,a,b,c)=\begin{cases}0 & x\leq a\cup x\geq c \\ \frac{x-a}{b-a} & a\leq x\leq b \\ \frac{c-x}{c-b} & b\leq x\leq c\end{cases}\quad (5)$$

式中: a, c —三角形底角; b —三角形顶角。

函数值 $\mu_A(x)$ 越接近 1 元素 x 属于模糊集合 A 的程度越大, 由此可以分别求出电压偏差, 功率因数偏差和无功功率补偿量隶属度函数。

2.2.4 模糊关系求解

模糊控制器的模糊控制规则形式如下语句:

If A and B then C

例如在无功补偿模糊控制中, 电压偏差和功率因数均为负大时, 则应投入较大电容, 用模糊控制规则表达如下,

If e_u is PB and e_φ is PB then e_Q is NB

2.3 改进型九域图模糊控制策略

在 TSC 无功补偿过程中, 电容器投入时, 容性功率增大, 电网无功减小, 功率因数增大, 电网电压上升; 而电容器切除时, 容性功率减小, 电网无功增大, 功率因数减小, 电网电压下降。电压功率因数模糊控制器的模糊控制规则如表 1 所示。

表 1 模糊控制规则表

$e_Q \backslash e_\varphi$		e_u						
		NB	NM	NS	ZE	PS	PM	PB
NB	PB	PM	PS	0	NM	NB	NB	NB
NM	PB	PM	PS	0	NM	NB	NB	NB
NS	PM	PS	PS	0	NS	NM	NB	NB
ZE	PB	PM	PS	0	NS	NM	NB	NB
PS	PB	PM	PS	0	NS	NB	0	0
PM	PB	PB	PM	0	NS	NM	NB	NB
PB	PB	PB	PM	0	NS	NB	NB	NB

将模糊控制规则表划分为十一个区域^[8], 改进型九域图模糊控制区域图如图 2 所示。

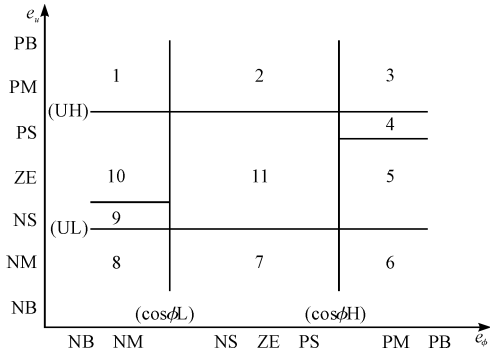


图 2 改进型九域图模糊控制区域图

在区域 1, $e_u \in \{\text{PM PB}\}$, $e_\varphi \in \{\text{NB NM}\}$, 此时电压超过上限值, 功率因数低于下限值, 该区域应该通过调压, 同时投入较多电容。在区域 2, $e_u \in \{\text{PM PB}\}$, $e_\varphi \in \{\text{NS ZE PS}\}$, 此时电压超过上限值, 功率因数处于合理区, 该区域应该切除电容器。在区域 3, $e_u \in \{\text{PM PB}\}$, $e_\varphi \in \{\text{PM PB}\}$, 此时电压超过上限值, 功率因数过补偿, 该区域应该按标准切除电容器, 使电压降低。在区域 4, $e_u \in \{\text{PS}\}$, $e_\varphi \in \{\text{PM PB}\}$, 此时电压在合理区, 功率因数过补偿, 该区域为防止投入电容引起

投切振荡,应保持原投切状态或投入小容量分补电容器。在区域 5, $e_u \in \{NS ZE\}$, $e_\varphi \in \{PM PB\}$, 此时电压在合理区, 功率因数过补偿, 该区域无功功率欠补偿, 需投入电容器。在区域 6, $e_u \in \{NB NM\}$, $e_\varphi \in \{PM PB\}$, 此时电压低于下限值, 功率因数过补偿, 该区域需切除较多电容器, 使功率因数减小, 以免过补偿。在区域 7, $e_u \in \{NB NM\}$, $e_\varphi \in \{NS ZE PS\}$, 此时电压低于下限值, 功率因数处于合理区, 该区域需强投电容器, 使电压值回到合理区。在区域 8, $e_u \in \{NB NM\}$, $e_\varphi \in \{NB NM\}$, 此时电压低于下限值, 功率因数低于下限值, 该区域需强投电容器, 使电压值和功率因数都回到合理区。在区域 9, $e_u \in \{NS\}$, $e_\varphi \in \{NB NM\}$, 此时电压处于合理区, 功率因数低于下限值, 该区域为防止投入电容引起投切振荡, 应保持原投切状态或投入小容量分补电容器。在区域 10, $e_u \in \{ZE PS\}$, $e_\varphi \in \{NB NM\}$, 此时电压处于合理区, 功率因数低于下限值, 该区域无功功率过补偿, 应切除电容器。在区域 11, $e_u \in \{NS ZE PS\}$, $e_\varphi \in \{NS ZE PS\}$, 此时电压处于合理区, 功率因数处于合理区, 该区域无动作, 保持原投切状态。

2.4 改进型九域图模糊控制仿真分析

本研究以 Simulink 为仿真环境, 搭建仿真模型, 验证硬件设计方案的可行性^[9]。

仿真模型中采用反馈控制结构, 电源为 10 kV 三相交流电, 经变压器降压至 380 V, TSC 无功补偿系统通过实时检测电网相电压和相电流, 运用有功、无功功率计算模块得出电网有功功率、无功功率, 二者经数学计算模块可得功率因数值, 模糊控制模块使用 Matlab 提供的模糊逻辑工具箱, 设置模糊工具箱中的模糊推理编辑器、隶属度函数编辑器、规则编辑器, 解模糊后的输出量根据指令投切函数向 5 组 TSC 发出驱动触发信号实现电容的投切, 从而实现无功补偿的目标。系统负载包含两组负荷功率因数不相同的三相 Y 型连接的感性负载, 从仿真起始 0 s ~ 0.06 s 这段时间两组负载均接入电网, 在 0.06 s 时刻, 通过定时器触发理想开关, 将其中一组负载从电网中切除, 从而人为制造了一个负荷变化事件, 以此观察改进型九域图模糊控制系统在面对负载突变时的控制效果。

从图 3 中可看出, 未进行无功补偿时在负荷变化前(仿真时间 0 ~ 0.06 s)电流峰值较大, 电流与电压相位差明显, 而负荷变化后(仿真时间 0.06 s ~ 0.12 s)电流峰值减小, 电流与电压相位差变大, 对比

图 4 可以发现引入改进型九域图模糊控制无功补偿后, 不论负荷变化前还是负荷变化后, 电流与电压的相位差明显减小, 从电流波形可以看出, 在仿真开始时刻和负载变化时刻, 晶闸管投切电容器执行了投切动作, 电流波形经过一个周期的调整从畸变的波形恢复到正弦波形, 从而保持电压电流相位几乎一致。电网相电压、相电流在无功补偿前与无功补偿后的波形如图 3、图 4 所示。

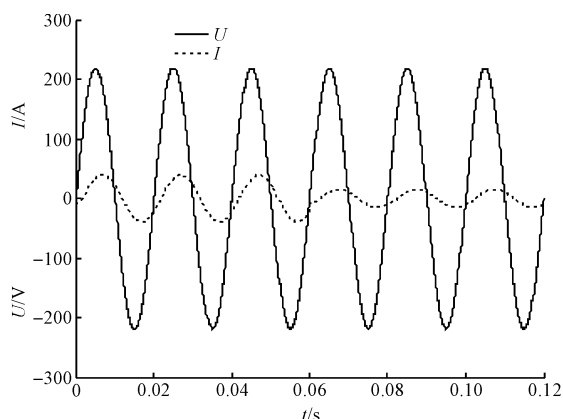


图 3 无功补偿前单相相电压、相电流波形图

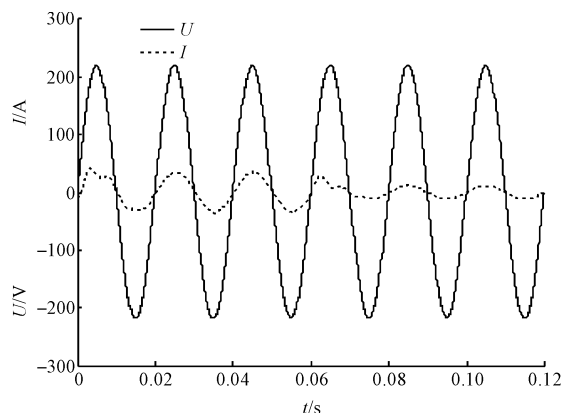


图 4 无功补偿后单相相电压、相电流波形图

功率因数在无功补偿前和无功补偿后的变化情况如图 5、图 6 所示。

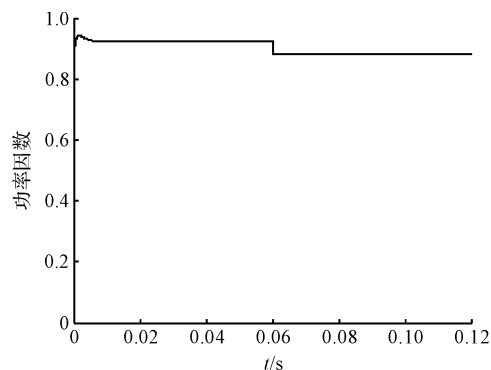


图 5 无功补偿前功率因数波形图

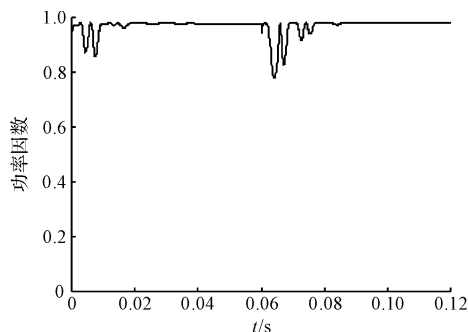


图6 无功补偿后功率因数波形图

从图5中可以看出,在未进行无功补偿时功率因数经过短暂振荡后维持在0.83左右,而在0.06s时刻,由定时器触发理想开关切除一组三相负载,此时功率因数维持在更低的水平,对比图6可以看出,仿真开始时,控制系统检测到负荷功率因数较低,需补偿一定容量的无功功率,在一定容量的电容器投入到电网时,经半个电压周期调整后功率因数维持在较高水平,功率因数接近1,而在0.06s时刻,负载发生变化,控制系统检测到电网参数变化后执行电容器投切动作,经过一个周期的调整后功率因数回到较高水平。

在调整过程中功率因数的变化范围在0.2以内,从投切动作执行到电网参数稳定,调整时间在一个电压周期以内,这验证了本研究中的改进型九域图模糊控制策略的可行性和优越性。

3 结束语

本研究将模糊控制策略与改进后的九域图控制方法结合起来,对九域图中区域再划分,有针对性地将某些可能出现投切振荡的区域设置相应的模糊控制策略,实现较为精准的电容器投切,同时避免了“投切振荡”。虽然仿真结果验证了控制策略的优越性,但实

际应用中,系统的响应时间和各器件的延迟时间叠加后会使得电网参数实际调节时间比仿真中调节时间大得多,同时使用晶闸管投切电容器进行无功补偿的有级调节属性也决定了该补偿策略不可能实现系统无功功率完全补偿。因此,实际应用中提高系统响应速度,合理分配不同容量电容器组,与其他无功补偿方法相配合实现系统无功补偿最优化是需要进一步解决的问题。

参考文献(References):

- [1] 谷永刚,肖国春,裴云庆,等.晶闸管投切电容器(TSC)技术的研究现状与发展[J].电力电子技术,2003,37(2):85-88.
- [2] 王大志,王克难,刘震.电力系统无功补偿原理与应用[M].北京:电子工业出版社,2013.
- [3] 余驰,李健仁,张刚峰.两相混合式步进电机建模与仿真[J].兵工自动化,2016,35(2):44-54,55.
- [4] 李大鹏.基于模糊控制的TSC型动态无功补偿控制器的研究与设计[D].南京:河海大学能源与电气学院,2006.
- [5] YOP CHUNG, DONG JUN WON, JOONG MOON KIM. Development of a network-based power quality diagnosis system[J]. **Electric Power Systems Research**, 2007, 77(8): 1086-1094.
- [6] 刘文胜,高俊如,马士英.利用模糊控制技术的动态无功补偿装置[J].农村电气化,2006(6):55-56.
- [7] 王蕾.基于模糊控制算法的高压无功补偿系统[D].沈阳:东北大学机械工程与自动化学院,2009.
- [8] GUO Wei feng, XU Dian guo, WU Jian, et al. United system of TSC and SVG for reactive power compensation[J]. **IEEE International Symposium on Power Electronics for Distrilrated Generation Systems**, 2010, 24(1): 507-511.
- [9] 石辛民,郝整清.模糊控制及其MATLAB仿真[M].北京:清华大学出版社,2008.

[编辑:周昱晨]

本文引用格式:

邓得洋,张振国,李树娟,等.TSC 无功补偿控制策略研究及仿真分析[J].机电工程,2017,34(4):403-407.

DENG De-yang, ZHANG Zhen-guo, LI Shu-juan, et al. Research and simulation of TSC reactive power compensation control strategy[J]. **Journal of Mechanical & Electrical Engineering**, 2017, 34(4): 403-407.

《机电工程》杂志: <http://www.meem.com.cn>