

不定负载环境下的电气稳压控制模型设计

在对不定负载环境下的电气稳压控制模型进行设计的过程中, 容易出现负载变化过大及其他不确定性的情况, 导致传统的基于静止无功补偿器的不定负载环境下, 电气稳压控制模型由于其本身需消耗有功功率, 造成电压发生改变, 无法有效实现不定负载下电气稳压控制。提出一种基于改进PID控制的电气稳压控制模型, 对电气的直流侧与交流侧的瞬时功率平衡进行计算, 完成交流侧瞬时电流值的傅里叶转换, 依据电流正交分解的瞬时无功功率理论对交流侧瞬时电流值进行划分, 获取未经修正的稳态控制模型。通过分析PI控制器的传递函数、系统开环传递函数和直流侧稳压控制系统的闭环传递函数获取系统动态响应指标中的调节时间与超标量, 实现参数的合理选择, 达到有效稳压的目的。仿真实验结果表明, 所提方法具有很高的可行性及可靠性。

王 玲/广东建设职业技术学院 罗其锋/广东电网有限责任公司中山供电局



王 玲/讲师

关键词/Keywords

不定负载·

PID控制·

稳压控制·

当前, 随着科技的逐渐发展, 电气工程在各领域得到了广泛应用, 成为工业控制中必不可少的一部分。电压是电气正常运行的关键单元, 所以需保证其相对稳定, 否则将严重影响设备的补偿效果及安全性^[1-2]。电气稳压控制的目标为: 起动过程中无明显过冲; 稳态工作过程中, 电压保持稳定; 动态工作过程中, 可有效控制其冲击过程的平稳性, 不会造成系统出现大的波动^[3-5]。

在对不定负载环境下的电气稳压控制模型设计的过程中, 容易出现负载变化过大及其他不确定性的情况, 导致传统的基于静止无功补偿器的不定负载环境下电气稳压控制模型, 由于其本身需消耗有功功率, 造成电压发生改变, 无法有效实现不定负载下电气稳压控制。

提出了一种改进PID控制的不定负载环境下电气稳压控制模型。仿真实验结

果表明, 所提方法具有很高的可行性及可靠性。

传统的稳压控制模型的原理和弊端

1. SVC电气稳压控制工作原理

不定负载环境下SVC电气稳压系统可等效描述成图1所示的系统。

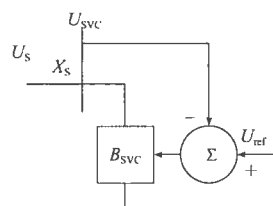


图1 SVC稳压系统框图

系统阻抗 X_s 可通过与之相应的SVC母线端的短路电流获取

$$X_s = \frac{U_b}{S_c} \quad (1)$$

式中, S_c 为SVC母线电流; U_b 为SVC母线电压。

假设SVC获取的无功电流为 I_{svc} , 当未安装SVC电压调整器时, SVC母线电压计算公式为

$$U_s = U_{svc} + I_{svc} X_s \quad (2)$$

当和SVC相连的母线电压大于SVC参考电压 U_{ref} 时, SVC将被看作是无功功率, 使电压下降达到电压平衡的目的; 否则, 当和SVC相连的母线电压小于 U_{ref} 时, SVC会使系统电压上升。

2. 不定负载环境下电气稳压控制模型设计

静止无功补偿装置SVC主要包括晶闸管控制电抗器 (TCR)、饱和电抗器 (SR)、晶闸管开断的电抗器 (TSR)、晶闸管控制变压器 (TCT)、

晶闸管开断电容器 (TSC) 和晶闸管换流或限换流环流器 (SCCC/LCC)。通过TCR对不定负载环境下电气电压进行SVC电压稳定控制, 可将TCR看作是一个可控电纳, 则其电流瞬时值计算公式为

$$i = \begin{cases} \frac{\sqrt{2}U}{X_L}(\cos \alpha - \cos \omega t) & \varepsilon < \omega t < 2\pi - \alpha \\ 0 & 2\pi - \alpha < \omega t < \pi + \alpha \end{cases} \quad (3)$$

式中, U 为电压有效值; X_L 为电抗器基频电抗; α 为控制角, 其时间原点为电压正向波动时的过零点; ε 为任意小常数。

采用傅里叶法对电流的基频分量进行计算, 则有

$$I_1 = \frac{\sigma - \sin \sigma}{\pi X_L} \quad (4)$$

式中, I_1 为基频电流的有效值; σ 为通角, 其和控制角 α 之间存在下述关系

$$\alpha + \sigma / 2 = \pi \quad (5)$$

假设 $B_L(a)$ 可描述成

$$B_L(a) = \frac{\sigma - \sin \sigma}{\pi X_L} = \frac{2(\pi - \alpha) - \sin 2\alpha}{\pi X_L} \quad (6)$$

则有

$$I_1 = B_L(a)U \quad (7)$$

式中, $B_L(a)$ 为可调基频电纳。如果 $a = \pi/2$, 则晶闸管开启, $B_L(a)$ 达最大值 $1/X_L$; 如果 $a = \pi$, 则 $B_L(a)$ 达最小值 0。

在TCR控制角 α 从 90° 转换至 180° 的过程中, 电抗器的电抗从 $j_{\omega L}$ 变成 0, 其等效电纳可描述为

$$B_{TCR} = B_L \frac{2\pi - 2\alpha + \sin 2\alpha}{\pi} \quad (8)$$

$$B_L = -\frac{1}{X_L} = -\frac{1}{\omega L} \quad (9)$$

式中, L 为TCR的等效电抗。

则总电纳可描述成

$$B_{SVC} = \frac{B_\delta(B_C + B_{TCR})}{B_\delta + B_C + B_{TCR}} \quad (10)$$

式中, B_δ 为降压变压器的等效电纳; B_C 为降压变压器的等值电容。

若控制角 $\alpha = 180^\circ$, 则 $B_{TCR} = 0$, SVC的等效电纳达到最大值, 计算公式为

$$B_{SVC}(\max) = \frac{B_\delta B_C}{B_\delta + B_C} \quad (11)$$

如果控制角 $\alpha = 90^\circ$, 则 $B_{TCR} = B_L$, SVC的等效电纳达到最小值, 计算公式为

$$B_{SVC}(\min) = \frac{B_\delta(B_C + B_L)}{B_\delta + B_C + B_L} \quad (12)$$

当 α 在 $90^\circ \sim 180^\circ$ 范围内变化时, B_{SVC} 在最大值与最小值之间以非线性关系改变。

在对不定负载环境下的电气稳压控制模型进行设计的过程中, 容易出现负载变化过大及具有不确定性的情况, 导致上述分析的基于静止无功补偿器的不定负载环境下电气稳压控制模型, 由于其本身需消耗有功功率, 造成电压发生改变, 无法有效实现不定负载下电气稳压控制。因此, 提出一种基于PID控制的不定负载环境下电气稳压控制模型。

基于改进PID控制的不定负载环境下电气稳压控制模型

1. 稳压控制模型

在不定负载环境下, 电气的直流侧与交流侧的瞬时功率平衡可描述成

$$\begin{aligned} & u_{sa}(t)i_{ca}(t) + u_{sb}(t)i_{cb}(t) + u_{sc}(t)i_{cc}(t) - \\ & R[i_{ca}^2(t) + i_{cb}^2(t) + i_{cc}^2(t)] - \frac{1}{2}L \frac{d}{dt} [i_{ca}^2(t) + i_{cb}^2(t) + i_{cc}^2(t)] \\ & = C_{dc}u_{dc}(t) \frac{du_{dc}(t)}{dt} \end{aligned} \quad (13)$$

式中, $u_{sa}(t)$ 、 $u_{sb}(t)$ 和 $u_{sc}(t)$ 分别为交流侧和电源系统连接点的瞬时电压值; $i_{ca}(t)$ 、 $i_{cb}(t)$ 和 $i_{cc}(t)$ 分别为交流侧瞬时电流值; R 、 L 分别为不定负载环境下等效电阻、电感; C_{dc} 、 $u_{dc}(t)$ 分别为电气直流侧电容值及电容两端瞬时电压值。

完成 $i(t)$ 的傅里叶转换, 同时依据电流正交分解的瞬时无功功率理论将 $i(t)$ 划分成下式描述的形式

$$\overline{i(t)} = \begin{pmatrix} i_{pca}(t) \\ i_{pcb}(t) \\ i_{pcc}(t) \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} i_{qca}(t) \\ i_{qcb}(t) \\ i_{qcc}(t) \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} i_{hca}(t) \\ i_{hcb}(t) \\ i_{hcc}(t) \end{pmatrix} = \overline{i_{pc}(t)} + \overline{i_{qc}(t)} + \overline{i_{hc}(t)} \quad (14)$$

式中, $\overline{i_{pc}(t)}$ 、 $\overline{i_{qc}(t)}$ 和 $\overline{i_{hc}(t)}$ 为电气的有功电流、无功电流和谐波电流。

不考虑谐波电流 $\overline{i_{hc}(t)}$ 产生的微小有功功率与无功功率, 则有

$$u_{sa}(t)i_{ca}(t) + u_{sb}(t)i_{cb}(t) + u_{sc}(t)i_{cc}(t) = 3U_{san}I_{pca} \quad (15)$$

式中, U_{san} 为A相相电压的有效值; I_{pca} 为A相相电流的有效值。

用于电阻 R 上的瞬时功率计算公式为

$$R[i_{ca}^2(t) + i_{cb}^2(t) + i_{cc}^2(t)] = 3R[I_{pca}^2(t) + I_{eca}^2(t)] \quad (16)$$

作用于电感 L 上的瞬时功率计算公式为

$$\frac{1}{2}L \frac{d}{dt}[i_{ca}^2(t) + i_{cb}^2(t) + i_{cc}^2(t)] = \frac{3}{2}L \frac{d}{dt}[I_{pca}^2(t) + I_{eca}^2(t)] \quad (17)$$

式中, $I_{eca}(t)$ 为A相无功电流与谐波电流的有效值, 计算公式为

$$I_{eca}(t) = \sqrt{I_q^2(t) + I_n^2(t)} \quad (18)$$

将式(16)、式(17)和式(18)代入式(14)中, 则有

$$\begin{aligned} & 3[U_{san}I_{pca}(t) - R[I_{pca}^2(t) + I_{eca}^2(t)] - \frac{1}{2}L \frac{d}{dt}[I_{pca}^2(t) + I_{eca}^2(t)]] \\ & = C_{du}u_{dc}(t) \frac{du_{dc}(t)}{dt} \end{aligned} \quad (19)$$

式中, U_{san} 、 C_{du} 、 R 和 L 为已知的常值; $u_{dc}(t)$ 、 $I_{pca}(t)$ 和 $I_{eca}(t)$ 为变化量。造成等式发生改变的是谐波有功电流, 造成等式右边发生改变的是电容电压, 所以在平衡点取微小增量, 计算公式为

$$\begin{cases} I_{pca}(t) = I_{pca} + DI_{pca} \\ u_{dc}(t) = u_{dc0} + Du_{dc} \end{cases} \quad (20)$$

将式(20)代入式(19)中, 同时对平衡点附近进行线性化处理, 即

$$\begin{aligned} & 3U_{san}I_{pca}(t) - 6RI_{pca}(t) - 3LI_{pca} \frac{d}{dt}DI_{pca}(t) \\ & = C_{du}u_{dc0} \frac{d}{dt}Du_{dc}(t) \end{aligned} \quad (21)$$

式中, u_{dc0} 为直流侧电压的期望值。

由于

$$d\Delta u_{dc}(t) = d[u_{dc}(t) - u_{dc0}] = du_{dc}(t) \quad (22)$$

取拉氏变换, 则有

$$\frac{u_{dc}(s)}{DI_{pca}(s)} = \frac{3U_{san} - 6RI_{pca} - 3LI_{pca}s}{C_{du}u_{dc0}s} \quad (23)$$

上式描述的即为没有修正的稳态控制模型, 其稳压控制框图如图2所示。

2. PID控制的实现

在工业控制领域中, PID控制受到广泛应用,

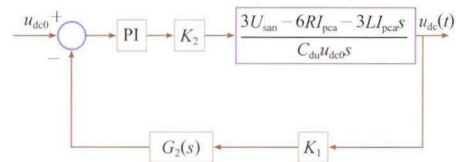


图2 稳压控制框图

这是因为其具有计算过程简单、鲁棒性强和可靠性高的特点。本文通过PID控制器对不定负载环境下的电气进行稳压控制, 合理选择参数可获取很好的稳压效果。

PI控制器的传递函数可描述成

$$G_{PI}(s) = k_p \left(1 + \frac{k_i}{s} \right) \quad (24)$$

式中, k_p 为比例系数; k_i 为积分系数。则系统开环传递函数为

$$W_{op}(s) = \frac{K_{dc}k_p(s + k_i)}{s(R_s C_s + 1)} \quad (25)$$

则直流侧稳压控制系统的闭环传递函数可描述成

$$W_{cl}(s) = \frac{\frac{K_{dc}k_p}{R_s C_s}(s + k_i)}{s^2 + \frac{K_{dc}k_p + 1}{R_s C_s}s + \frac{K_{dc}k_p k_i}{R_s C_s}} \quad (26)$$

通过式(26)可以看出, 控制系统是一个典型的系统, 其单位阶跃响应可描述成

$$h(t) = 1 + re^{-\zeta_d \omega_n t} \sin(\omega_n \sqrt{1 - \zeta_d^2} t + \varphi) \quad (27)$$

$$r = \sqrt{z^2 - 2\zeta_d \omega_n z + \omega_n^2} / z \sqrt{1 - \zeta_d^2} \quad (28)$$

$$\varphi = -\pi + \arctan[\omega_n \sqrt{1 - \zeta_d^2} (z - \zeta_d^2)] + \arctan(\sqrt{1 - \zeta_d^2} / \zeta_d) \quad (29)$$

各参数可描述成

$$\begin{cases} \omega_n = \sqrt{\frac{K_{dc}k_p k_i}{R_s C_s}} \\ \zeta_d = \frac{1}{2} \left(\frac{1}{\sqrt{K_{dc}k_p k_i R_s C_s}} + \sqrt{\frac{K_{dc}k_p}{k_i R_s C_s}} \right) \end{cases} \quad (30)$$

系统动态响应指标中的调节时间与超标量可描述成

$$\begin{cases} t_s = \frac{3}{\zeta_d \omega_n} \\ \sigma\% = e^{\frac{-\zeta_d \pi}{\sqrt{1 - \zeta_d^2}}} \end{cases} \quad (31)$$

假设 t_s 是2个基波周期0.04 s， $\sigma=4.3\%$ ，依据最优整定法即可获取PI控制器的比例系数 $k_p=0.09$ ，积分系数 $k_i=1.15$ 。

仿真实验分析

为了验证本文模型的有效性，需要进行相关的实验分析。通过Matlab/Simulink塑造仿真模型进行仿真分析，系统基本参数如表1所示。

表1 Simulink仿真参数

电气电压 /V	交流侧电感值 /mH	直流侧电容值 /μF	直流侧电压参考值 /V
220	2	6 000	160

当负载发生突变时，分别采用本文模型和传统基于静止无功补偿器的电气稳压控制模型对电气进行稳压控制，获取的结果如图3所示。

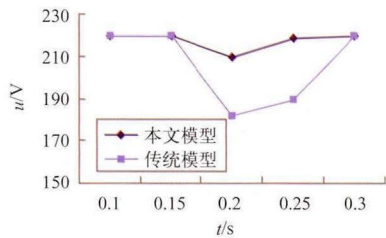


图3 本文模型与传统模型电压变化情况

分析图3可以看出，在0.2 s时刻，本文模型与传统基于静止无功补偿器的电气稳压控制模型的电压值均发生变化，但0.25 s时，本文模型即基本恢复正常稳定状态，而传统基于静止无功补偿器的电气稳压控制模型仍有较大的波动，未恢复稳定状态。本文模型的稳压控制效果明显高于传统基于静止无功补偿器的电气稳压控制模型，验证了本文模型的有效性。

为了进一步验证本文模型的有效性，在负载不同的情况下，分别采用本文模型和传统基于静止无功补偿器的电气稳压控制模型对电气进行稳压控制，获取的结果如表2所示。

分析表2可以看出，采用本文模型的最大最小输出电压差值明显小于采用传统基于静止无功补偿器的电气稳压控制模型，说明本文模型具有很高的电气稳压控制能力。

表2 本文模型与传统模型输出电压比较

负载/W	本文模型输出电压/V	传统模型输出电压/V
200	219.7	215.7
400	217.2	209.4
600	214.7	203.8
800	213.6	198.5
1 000	211.5	193.7

结束语

本文提出了一种基于PID控制的不定负载环境下电气稳压控制模型，对电气的直流侧与交流侧的瞬时功率平衡进行计算，完成交流侧瞬时电流值的傅里叶转换。依据电流正交分解的瞬时无功功率理论对交流侧瞬时电流值进行划分，获取未经修正的稳态控制模型。通过分析PI控制器的传递函数、系统开环传递函数和直流侧稳压控制系统的闭环传递函数获取系统动态响应指标中的调节时间与超标量，实现参数的合理选择，达到有效稳压的目的。仿真实验结果表明，所提方法具有很高的可行性及可靠性。

参考文献

[1] 卢浩，宋明华，谢启，等．基于能量守恒PI控制方法的有源电力滤波器研究[J]．电力系统保护与控制，2009，37(12)：68-72．
[2] 黄德琥，陈继军，张岚．大规模风电并网对电力系统的影响[J]．广东电力，2010，23(7)：27-30．
[3] 李小华．基于TMS320F2808的风力发电网侧PWM整流器的设计[J]．电气传动，2009，36(9)：26-28．
[4] 高万兵．基于TMS320F2808直接转矩控制系统的硬件设计实现[J]．电气技术，2009(9)：66-67．
[5] 周柯，罗安，夏向阳，等．大功率有源滤波器直流侧电容设计与电压控制[J]．电力电子技术，2007，41(4)：12-15．

(收稿日期：2014-12-14) EA