

抑制电力系统低频振荡的磁控变压器附加控制

赵国生, 王洪光, 李辉

(郑州大学电气与信息工程学院, 郑州 450001)

摘要: 随着互联电力系统的发展, 低频振荡现象越来越频繁, 研究低频振荡的抑制措施以提高电力系统的稳定性和供电可靠性成为亟须解决的问题。因此提出了一种利用磁控变压器附加阻尼控制来抑制电力系统低频振荡的方法。首先, 介绍了磁控变压器的工作原理, 并推导了其数学模型。其次, 建立了含磁控变压器的单机无穷大系统的线性化模型, 分析了磁控变压器的阻尼特性, 说明了磁控变压器附加控制为电力系统提供阻尼的机理。然后, 重点研究了基于频域法的附加阻尼控制器参数设计的方法, 并给出了具体的单机无穷大系统算例。最后, 通过 Simulink 时域仿真验证了磁控变压器附加阻尼控制器的有效性和可行性。

关键词: 电力系统稳定性; 低频振荡; 磁控变压器; 附加阻尼控制器; 单机系统

Additional Control of Magnetic Controlled Transformer for Suppressing Low Frequency Oscillation in Power Systems

ZHAO Guosheng, WANG Hongguang, LI Hui

(School of Electrical and Information Engineering, Zhengzhou University, Zhengzhou 450001, China)

Abstract: With the development of interconnected power systems, low-frequency oscillations are becoming increasingly frequent. Researching measures to suppress these oscillations in order to enhance the stability and reliability of power systems has become an urgent issue. A method to suppress low-frequency oscillations in power systems is proposed by utilizing magnetic controlled transformers with additional damping control. Firstly, the working principle of the magnetic controlled transformer is introduced and its mathematical model is derived. Secondly, a linearized model of a single machine infinite bus system incorporating magnetic control transformers is established. The damping characteristics of magnetic control transformers are analyzed, and the principle that the magnetic control transformer provides damping for the power system is explained. Then the method of designing additional damping controller parameters is studied primarily based on the frequency domain method, and calculation examples of single machine infinite bus systems are provided. Finally, the effectiveness and feasibility of the additional damping controller for the magnetic controlled transformer are verified by Simulink time-domain simulation.

Key words: power system stability; low frequency oscillation; magnetic controlled transformer; additional damping controller; single machine system

0 引言

低频振荡是电力系统中常见的问题, 它可能导致系统稳定性降低、设备损坏甚至系统崩溃。因此, 研究低频振荡的抑制技术对于确保电力系统的安全稳定运行具有重要意义^[1]。在传统电力系统

中, 电力系统稳定器(power system stabilizer, PSS)被认为是最为简单、经济且有效的抑制措施, 目前已有丰富的理论支撑^[2-4]。但是, 随着新能源的不断投入, 现代电力系统越来越复杂, 仅靠传统 PSS 的抑制方法已经无法满足电网的需求^[5]。

随着电力电子技术的发展和柔性输电装置(flexible AC transmission system, FACTS)的出现, 为低频振荡的抑制提供了新思路。以往的研究表明, 附加控制之后, 统一功率潮流控制器(unified power flow controller, UPFC)^[6-8]、静止无功补偿器

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(52107170)。

Foundation item: Supported by the National Natural Science Foundation of China (52107170).

(static var compensator, SVC)^[9-11]、静止无功发生器(static var generator, SVG)^[12]、静止同步补偿器(static synchronous compensator, STATCOM)^[13-14]等柔性交流输电技术在低频振荡抑制方面均具有良好的效果。它们实质上是通过控制输电线路上的电压幅值、相角或阻抗实现对电力系统潮流的控制,从而增强系统的阻尼。磁控变压器(magnetic control transformer, MCT)是一种可以实现无触点平滑无级调压的新型电力设备,它是利用磁控电抗器的阻抗可控性来调节输出的电压^[15],从而调节系统的传输功率。磁控变压器附加阻尼控制是除FACTS附加控制技术以外的低频振荡抑制的另一个新的手段,磁控变压器与柔性输电装置FACTS的原理和性能如表1所示。

表1 磁控变压器和柔性输电装置的原理和性能

Tab. 1 Principles and performances of MCT and FACTS

装置	原理	调节速度	调节范围	成本
UPFC	通过控制节点电压的幅值和相位,补偿系统有功和无功功率	快 毫秒级 一般几十到几百毫秒	大 典型的电压幅值范围为 $\pm 15\%$ 到 $\pm 20\%$ 相角范围为 $\pm 30^\circ$ 到 $\pm 45^\circ$	高 组件复杂
SVC	通过控制晶闸管导通角,调节节点电压,补偿无功功率	快 毫秒级 一般几十到几百毫秒	中 一般为 $0 \sim 100$ MVar	中 组件较多
SVG	通过控制逆变器的开关状态和频率,实现无功的快速调节	很快 毫秒级 最快可在10 ms以内	小 一般为 ± 10 MVar	较低 组件少,构造较为简单
STATCOM	通过控制电流和电压,来调节交流电力系统中的无功功率	快 毫秒级 一般几十到几百毫秒	中 一般为 $0 \sim \pm 100$ MVar	高 高性能功率电子器件
MCT	通过控制晶闸管导通角的大小,改变铁芯磁饱和度,调节输出电压	快 毫秒级 一般几十到几百毫秒	大 电压调节范围一般为 $\pm 5\%$ 到 $\pm 20\%$ 的额定电压之间,可根据用户需求调整	低 组件小

对比表1各装置性能可知,UPFC虽然有着快速灵活的调节能力和广泛的调节范围,但是由于需要大量的高性能电力电子器件和复杂的控制系统,导致设备的制造成本和后期维护成本较高;而其他柔性装置SVC、SVG和STATCOM的调节速度虽

然也很快,成本相较于UPFC略低,但是调节范围有限。磁控变压器通常由一些磁性材料和线圈构成,相比于需要复杂高性能电力电子器件的装置来说,制造成本低,而且其控制系统也较简单,后期的维护成本也较低,并且自身的调节速度和范围和UPFC相差不差,成本却比UPFC低得多,在工业应用中具有很好的前景。然而,磁控变压器目前还处于研究阶段,还没有可以产业化应用的磁控变压器和相应的控制系统问世,磁控变压器的控制大多采用开环或者简单的电压闭环控制实现电压的调节,而传统的电压闭环控制对系统的阻尼影响很小,无法很好地抑制电力系统低频振荡。因此,本文在传统电压闭环控制基础上加入一个附加阻尼控制环,以实现在磁控变压器调压时增强系统阻尼,抑制系统振荡,对于电力系统的稳定性和可靠性具有重要的意义。

1 磁控变压器的工作原理及数学模型

磁控变压器是由电力变压器和磁饱和电抗器串联组成,其等效电路原理如图1左图所示,图中磁饱和电抗器可以等效为变压器一次侧的辅助调压绕组。通过改变晶闸管触发角的大小来改变控制绕组中直流电流的大小,进而改变铁心的磁饱和程度,最终改变磁控电抗器的等效感值,其两端的分压也因此而改变。由于磁控电抗器与变压器原边相串联,所以磁控电抗器两端电压的改变也会导致变压器原边输入电压的改变,进而变压器输出电压也会改变。因此,可以通过改变晶闸管的触发角来实现磁控变压器输出电压的平滑无级调节。

磁控变压器简化电路如图1右图所示,若不考虑电源和各绕组的电阻,可得出式(1)。

$$\begin{cases} U_A = U_1 - U_m \\ \frac{U_2}{U_A} = \frac{N_2}{N_A} = \lambda \\ L_m = \frac{\mu N^2 A}{l} \\ \frac{I_1}{I_2} = \lambda \end{cases} \quad (1)$$

式中: λ 为变压器的变比; U_A 、 U_2 分别为其一二二次侧电压; N_A 、 N_2 分别为其一二二次侧绕组匝数; L_m 为磁饱和电抗器等效的电抗值; U_m 为磁控电抗器两端电压; U_1 为磁控变压器的输入电压; I_1 、 I_2 分

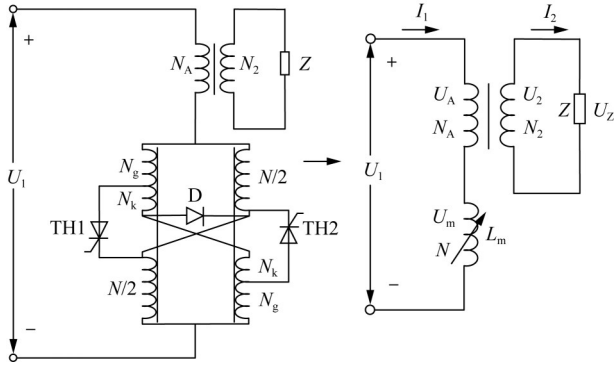


图 1 磁控变压器电路原理图

Fig. 1 Circuit schematic diagram of MCT

别为磁控变压器输入输出电流； N 为磁控电抗器绕组匝数； μ 为铁芯磁导率； A 为铁芯截面积； l 为铁芯柱高度。

整理式(1)可得磁控变压器的输入输出电压比为：

$$\frac{U_2}{U_1} = \lambda \left(1 - \frac{L_m}{L_1} \right) = k \quad (2)$$

式中： L_1 为磁控变压器一次侧等效电感； k 为磁控变压器等效的电压变比。

从式(2)中可看出，等效变比 k 的值随磁饱和和电抗器 L_m 的变化而变化，而 L_m 的值与磁饱和和电抗器的饱和程度有关，其磁饱和程度和晶闸管触发延迟角满足式(3)关系^[16]。

$$\cos \alpha = \frac{2}{\pi} \left(\sin \frac{\beta}{2} - \frac{\beta}{2} \cos \frac{\beta}{2} \right) - 1 \quad (3)$$

式中： α 为晶闸管触发延迟角， $\alpha \in [0, \pi]$ ； β 为铁芯磁饱和度， $\beta \in [0, 2\pi]$ 。

由上面的推导可得磁控变压器的控制过程图如图2所示。

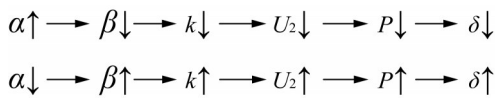


图 2 磁控变压器的控制过程图

Fig. 2 Control process diagram of MCT

可见，增大(减小)晶闸管触发角 α ，磁饱和和 β 就减小(增大)，磁饱和电抗器的电感值 L_m 就会增大(减小)，磁控变压器等效的电压变比 k 就减小(增大)，在输入电压 U_1 一定时输出电压 U_2 就减小(增大)，系统中传输的功率 P 就减小(增大)，相应的功角 δ 也减小(增大)。而磁控变压器的这些控制过程速度较快，并且是无触点平滑地进行调节，因

此，采用磁控变压器抑制电力系统低频振荡的效果是较理想的。为了方便下文分析，可联立式(1)–(3)作为磁控变压器的数学模型。

2 磁控变压器附加阻尼控制器的设计

2.1 含磁控变压器的 Phillips–Heffron 模型

为了研究磁控变压器抑制电力系统低频振荡的机理，将磁控变压器投入到单机无穷大系统中，如图3所示。其中， U_G 为发电机机端电压有效值，同时也为磁控变压器的一次侧电压； U_L 为磁控变压器的二次侧电压有效值； U 为无穷大母线电压有效值； X 为线路阻抗； I_L 为线路输电电流有效值。

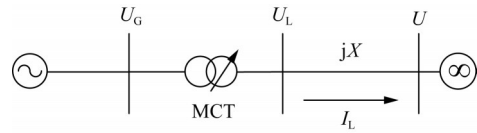


图 3 含磁控变压器的单机无穷大系统

Fig. 3 Single machine infinite bus system with MCT

结合磁控变压器的数学模型和发电机三阶模型以及励磁系统模型^[17]可以得到含磁控变压器的单机无穷大系统的非线性状态方程，在平衡点处借助泰勒级数线性化之后，便可得出含磁控变压器的单机无穷大系统线性化模型的状态方程。

$$\begin{bmatrix} \Delta \dot{\omega} \\ \Delta \dot{\delta} \\ \Delta \dot{E}'_q \\ \Delta \dot{E}_f \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{D}{T_J} & -\frac{K_1}{T_J} & -\frac{K_2}{T_J} & 0 \\ \omega_0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -\frac{K_4}{T'_{d0}} & -\frac{K_3}{T'_{d0}} & \frac{1}{T'_{d0}} \\ 0 & -\frac{K_e K_5}{T_e} & -\frac{K_e K_6}{T_e} & -\frac{1}{T_e} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \omega \\ \Delta \delta \\ \Delta E'_q \\ \Delta E_f \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} -\frac{K_{MCT1}}{T_J} \\ 0 \\ -\frac{K_{MCT2}}{T'_{d0}} \\ -\frac{K_e K_{MCT3}}{T_e} \end{bmatrix} \Delta k \quad (4)$$

式中： ω_0 为发电机转子在稳态运行时的旋转角频率，工频下 $\omega_0 = 100\pi$ ； D 为发电机的阻尼系数； $\Delta \omega$ 、 $\Delta \delta$ 、 $\Delta E'_q$ 、 ΔE_f 分别为发电机的转子角频率、发电机的功角、发电机 q 轴的瞬变电动势、发电机的励磁电动势的状态变量； $\Delta \dot{\omega}$ 、 $\Delta \dot{\delta}$ 、 $\Delta \dot{E}'_q$ 、 $\Delta \dot{E}_f$ 分别为对应状态变量对时间的导数； Δk 为控制变量； T_J 为

发电机转动惯量; T'_{d0} 为发电机 d 轴开路暂态时间常数; K_e 、 T_e 分别为励磁系统的放大系数和调节时间; K_1 — K_6 、 K_{MCT1} — K_{MCT3} 系数的定义如式(5)所示^[17]。

$$\begin{cases} K_1 = \frac{\partial P_e}{\partial \delta}, K_2 = \frac{\partial P_e}{\partial E'_q}, K_{MCT1} = \frac{\partial P_e}{\partial k} \\ K_3 = \frac{\partial E_q}{\partial E'_q}, K_4 = \frac{\partial E_q}{\partial \delta}, K_{MCT2} = \frac{\partial E_q}{\partial k} \\ K_5 = \frac{\partial U_G}{\partial \delta}, K_6 = \frac{\partial U_G}{\partial E'_q}, K_{MCT3} = \frac{\partial U_G}{\partial k} \end{cases} \quad (5)$$

式中: P_e 为系统的电磁功率; E_q 为发电机的空载电动势; δ 为发电机的功角; E'_q 为发电机 q 轴的瞬变电动势; U_G 为发电机机端电压。

根据线性状态方程式(4)可以画出含有磁控变压器的 Phillips-Heffron 模型, 如图4实线部分所示。图中的 k_{add} 为附加阻尼控制器的输出信号; $\Delta k'$ 为附加阻尼控制器之后的控制变量, 并且 $\Delta k' = \Delta k + k_{add}$ 。

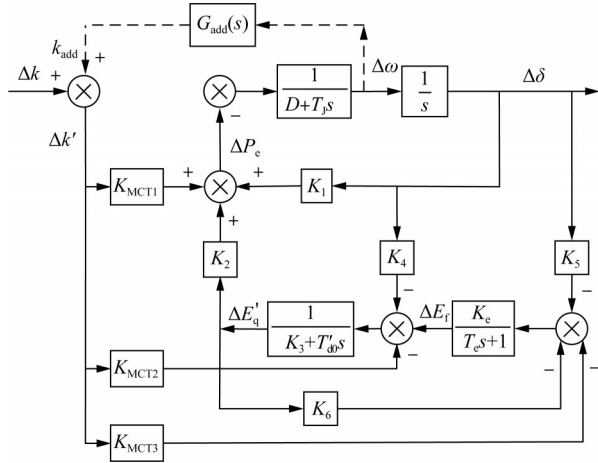


图4 含磁控变压器的 Phillips-Heffron 模型

Fig. 4 Phillips-Heffron model with MCT

由图4可得, 磁控变压器向系统提供的转矩为:

$$\Delta T_{MCT} = \left(K_{MCT1} - \frac{(K_2 K_e K_{MCT3} + K_2 (1 + j\Omega T_e) K_{MCT2})}{(K_3 + j\Omega T'_{d0})(1 + j\Omega T_e) + K_6 K_e} \right) \times \Delta k \quad (6)$$

式中: ΔT_{MCT} 为磁控变压器向系统提供的转矩; Ω 为角频率。

由式(6)可见, 磁控变压器为系统提供的转矩可分为两部分, 第一部分与系数 K_{MCT1} 有关, 称为直接转矩, 它是由磁控变压器的控制作用引起线路功率变化而形成的转矩; 第二部分是与系数

K_{MCT2} 和 K_{MCT3} 有关, 称为间接转矩, 由于经过励磁调节器的衰减作用, 通常间接转矩远小于直接转矩。又因为磁控变压器的控制作用可以影响发电机的电磁转矩 P_e , 所以可将磁控变压器为系统提供的转矩分解成同步转矩和阻尼转矩, 如式(7)所示。

$$\Delta T_{MCT} = K_s \Delta \delta + K_D \Delta \omega \quad (7)$$

式中: K_s 为同步转矩系数; K_D 为阻尼转矩系数。

如果磁控变压器的控制能够保证 $K_D > 0$, 则磁控变压器可以始终向系统提供正阻尼, 从而达到低频振荡的抑制。因此, 通过分析含磁控变压器的 Phillips-Heffron 模型可以得到磁控变压器的阻尼特性, 有助于磁控变压器的控制策略设计。

2.2 附加阻尼控制器提供阻尼的原理

当电力系统发生低频振荡时系统的阻尼通常为负值, 根据低频振荡的负阻尼机理^[18]可知, 要想抑制系统振荡, 必须要使系统有足够的正阻尼, 然而, 磁控变压器在进行电压调节时对系统阻尼的影响是很小的。因此, 还需要设法增加一个附加转矩, 使磁控变压器在调节电压的过程中为系统提供足够的转矩, 这一点可以借鉴 PSS 增强阻尼的原理^[19], 在磁控变压器的控制过程中增加一个附加阻尼控制器, 并引入与低频振荡相关的变量作为附加阻尼控制器的输入信号, 如图5所示。通过附加阻尼控制器为磁控变压器提供一个附加脉冲信号 α_{add} , 再结合电压控制环节的 PI 控制输出和额定运行点的触发角 α_r , 共同对磁控变压器进行控制, 从而实现磁控变压器在调压时增强系统阻尼抑制系统振荡。

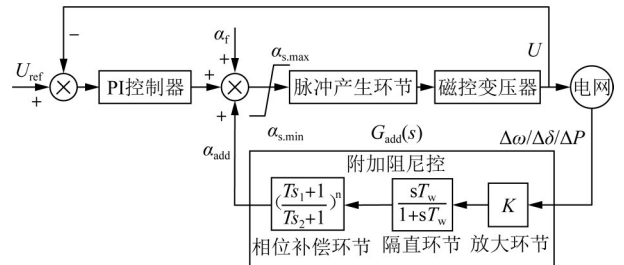


图5 磁控变压器附加控制的原理流程图

Fig. 5 Principle flowchart of additional control for MCT

图5中 $\alpha_{s,max}$ 、 $\alpha_{s,min}$ 分别为晶闸管触发脉冲的上限和下限; U 为磁控变压器的输出电压; U_{ref} 为磁控变压器输出电压参考值; T_1 、 T_2 为相位补偿环节的时间常数; T_w 为隔直环节的时间常数; K 为放大倍数。

若取 $\Delta\omega$ 作为附加阻尼控制器的输入信号, 并假设附加阻尼控制器的传递函数为 $G_{\text{add}}(s)$, 则加入的附加阻尼控制在磁控变压器 Phillips-Heffron 模型中如图 4 虚线所示, 则可求得附加阻尼控制器的磁控变压器为系统提供的附加阻尼转矩为:

$$\begin{aligned}\Delta T'_D &= \left(K_{\text{MCT1}} - \frac{(K_2 K_e K_{\text{MCT3}} + K_2(1 + j\Omega T_e) K_{\text{MCT2}})}{(K_3 + j\Omega T'_{d0})(1 + j\Omega T_e) + K_6 K_e} \right) \times \\ &\quad G_{\text{add}}(s) \Delta\omega \\ &= D_{\text{MCT}} \Delta\omega\end{aligned}\quad (8)$$

式中: $\Delta T'_D$ 为附加阻尼控制器的磁控变压器为系统提供的附加阻尼转矩; D_{MCT} 为含磁控变压器时的阻尼转矩系数; s 表示复频域, 并且 $s = j\Omega$ 。

现令

$$\begin{aligned}F(s) &= K_{\text{MCT1}} - \frac{(K_2 K_e K_{\text{MCT3}} + K_2(1 + T_e) K_{\text{MCT2}})}{(K_3 + sT'_{d0})(1 + sT_e) + K_6 K_e} \quad (9) \\ &= |F(s)| \angle -\varphi\end{aligned}$$

式中: $F(s)$ 为附加阻尼控制器输出信号到发电机电振荡回路的传递函数; φ 为附加阻尼控制器的输出信号与 $\Delta E'_q$ 之间在频率为 Ω 时的相位滞后的角度; $|F(s)|$ 为 $F(s)$ 模的大小。

通过合理设置阻尼控制器的参数, 使传递函数 $G_{\text{add}}(s) = B \angle \varphi$ (B 为 $G_{\text{add}}(s)$ 模的大小), 补偿系统在振荡处所滞后的相位角, 使得 $D_{\text{MCT}} > 0$, 阻尼转矩 $\Delta T'_D$ 与 $\Delta\omega$ 同相位。则此时磁控变压器为系统提供的转矩变为:

$$\Delta T'_{\text{MCT}} = \Delta T_{\text{MCT}} + \Delta T'_D \quad (10)$$

式中 $\Delta T'_{\text{MCT}}$ 为含附加阻尼控制器的磁控变压器为系统提供的转矩。

从式(10)可以看出, 由于附加阻尼控制器的存在, 使得磁控变压器为系统提供的转矩 ΔT_{MCT} 中增加了一个和 $\Delta\omega$ 同方向的阻尼转矩 $\Delta T'_D$, 由于 $D_{\text{MCT}} > 0$, 因此可以始终为系统提供正阻尼, 并且通过调整附加阻尼控制器的参数可以改变 D_{MCT} 值的大小, 从而保证系统有足够的正阻尼, 以实现系统低频振荡的抑制, 这对附加阻尼控制器的参数设计具有指导意义。

2.3 附加阻尼控制器的参数设计

附加阻尼控制器与传统 PSS 结构类似, 都是由放大环节、隔直环节和相位补偿环节等环节组成, 如图 5 中实线部分所示, 各环节作用如下。

放大环节: 通过调整放大系数 K 可以改变系统的阻尼大小, 即可调整上文中所提到的 D_{MCT} 的值, 从而确保系统阻尼足够。

隔直环节: 也称作滤波环节, 避免系统直流分量和谐波的影响, 通过设置隔直时间常数 T_w 保证附加阻尼控制器只在系统动态调节过程中起作用, 在稳定运行时不起作用。

相位补偿环节: 这是附加阻尼控制器最为关键的一个环节, 通过设置多级时间常数 T_1 、 T_2 , 补偿系统在振荡处所滞后的相位角 φ , 保证为系统提供的阻尼为正。

在附加阻尼控制器的参数设计过程中首先要确保补偿环节的参数, 必须要确保为系统提供的阻尼为正, 然后再设计隔直和放大环节的参数。只有在保证提供正阻尼时设计其他环节的参数才是有意义的, 否则附加阻尼控制器可能会起到相反的作用。附加阻尼控制器的设计方法有很多, 常用的有极点配置法^[20]、特征根分析法^[21]、阻尼转矩分析法^[22]和频域法^[23]等等。本文采用频域法设计附加阻尼控制器的参数, 具体步骤如下。

1) 确定系统振荡的模式。建立系统模型, 并在稳定点得出线性化模型, 求解系统特征根, 得出系统的阻尼比 ξ 和振荡频率 Ω 。一般把阻尼比不足 5% 的系统称为弱阻尼系统, 需要增强阻尼。

2) 确定相位补偿环节的参数。画出不加附加控制时系统模型的 bode 图, 找出系统振荡频率 Ω 对应的相位 φ 。根据相位 φ 确定补偿环节数量为 n , 一般一个补偿环节可补偿 $30^\circ \sim 40^\circ$ 。再根据补偿公式(11)计算时间常数 T_1 、 T_2 。

$$\begin{cases} a = \frac{1 + \sin(\varphi/n)}{1 - \sin(\varphi/n)} \\ T_1 = aT_2 \\ T_2 = \frac{1}{\Omega \sqrt{a}} \end{cases} \quad (11)$$

式中 a 为超前补偿环节的放大系数。

3) 确定隔直时间常数 T_w 和放大环节的放大系数 K 。隔直时间常数一般在 3~10 s 之间选取较为合适。确定好补偿环节和隔直环节的参数后绘制出加入附加控制之后总系统的开环根轨迹图, 在根轨迹上根据阻尼比找到合适的放大倍数 K , 对于大规模的互联系统中振荡模态的阻尼比一般要高于 15%。

3 仿真算例及分析

3.1 仿真算例

选择如图3所示的单机无穷大系统模型,系统基准容量为1 000 MW,电压基准值为各节点额定电压。给定参数如下(不加单位的为标么值)。

发电机参数:额定容量 $P_n = 1\,000$ MW,额定电压 $U_n = 10$ kV, d 轴同步电抗 $X_d = 2.84$, q 轴同步电抗 $X_q = 2.7$, d 轴暂态电抗 $X'_d = 0.382$, d 轴次暂态电抗 $X''_d = 0.269$, q 轴次暂态电抗 $X''_q = 0.28$,发电机转动惯量 $T_J = 12.4$, d 轴开路暂态时间常数 $T'_{d0} = 9.9$ s,阻尼系数 $D = 0$ 。

磁控变压器参数:额定容量 $P_n = 200$ MW,原副边绕组阻抗 $X_1 = 0.1$ 、 $X_2 = 0.08$,额定电压及可调范围10 kV/(35 ± 10%) kV。

传输线路参数:线路阻抗 $X = 0.0373$ 。

系统稳定运行点:发电机电磁功率 $P_{G0} = 0.5$,发电机机端电压 $U_{G0} = 1$,无穷大系统节点电压 $U_0 = 1$ 。

1) 确定系统的振荡频率和阻尼比。

根据系统参数和稳定运行点可得到系统线性化模型式(4)的具体状态方程,根据状态系统矩阵可求出系统的特征根如表2所示。

表2 未加附加控制时系统的模态

Tab. 2 Modality of the system without additional control

特征根	阻尼比	振荡频率/Hz
$-0.12 \pm j2.81$	0.043	0.447
-3.12		
-997.3		

2) 确定相位补偿参数的补偿环节数量 n 和时间常数 T_1 、 T_2 。

从表2中可以看出系统有一个衰减的低频振荡模态,阻尼比仅为4.3%,属于弱阻尼状态,当系统受到外界扰动时电力系统无法在短时间内恢复到平衡点处,系统稳定性较差。因此需要增强系统的阻尼以提高稳定性。图6为系统的bode图。

由图6可确定补偿相位 $\varphi = 44.7^\circ$,补偿环节数量 $n = 2$,由式(11)可确定时间常数 $T_1 = 0.53$ s、 $T_2 = 0.24$ s。

3) 确定隔直时间常数 T_w 和放大系数 K 。

选择隔离时间常数 $T_w = 5$,绘制出补偿后总系统的开环根轨迹图如图7所示,最终选择放大系数

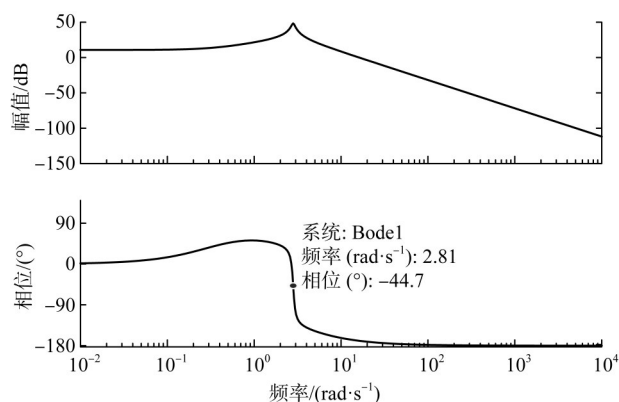


图6 系统的Bode图

Fig. 6 Bode diagram of the system

$K = 0.45$,此时系统的振荡频率为2.62 rad/s,阻尼比为26.9% > 15%,满足设计要求。

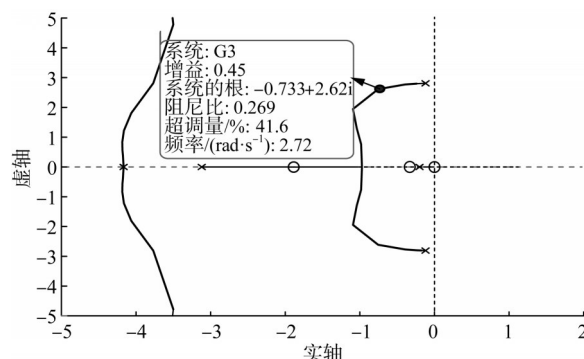


图7 补偿后系统的根轨迹图

Fig. 7 Root trajectory diagram of the system after compensation

因此,阻尼控制器的传递函数为:

$$G_{add}(s) = 0.45 \left(\frac{5s}{5s+1} \right) \left(\frac{0.53s+1}{0.24s+1} \right)^2 \quad (12)$$

3.2 仿真实验

在MATLAB/Simulink中搭建系统整体仿真模型如图8所示,其中,发电机采用五阶标么制标准模型;励磁系统采用模块库中的Excitation System;无穷大系统为三相稳定电源,频率为50 Hz,输出额定电压为35 kV,容量为10 000 MW;发电机负荷为500 MW,负荷1为200 MW。磁控变压器模型每相按照图1原理图进行连接;控制器按照图5控制原理图搭建,其中,PI控制器的 $K_p=0.1$, $K_i=1.3$;发电机模型、励磁系统、磁控变压器、阻尼控制器参数以及线路阻抗 X 均按照算例中设置。

仿真扰动选取:

1) 2 s时发生三相接地短路故障,持续0.1 s后

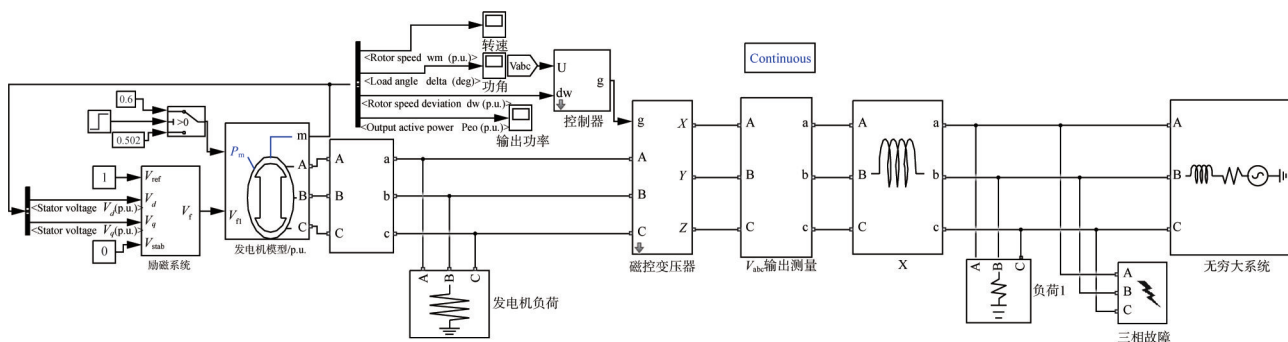


图8 单机无穷大系统 Simulink 仿真模型图

Fig. 8 Simulink simulation model diagram of single machine infinite bus system

切除故障,持续时间较短,可认为是小扰动。

2) 2 s 时发电机输入机械功率上升为原先的 20%, 并保持不变, 为大扰动。

仿真结果如图 9—10 所示。

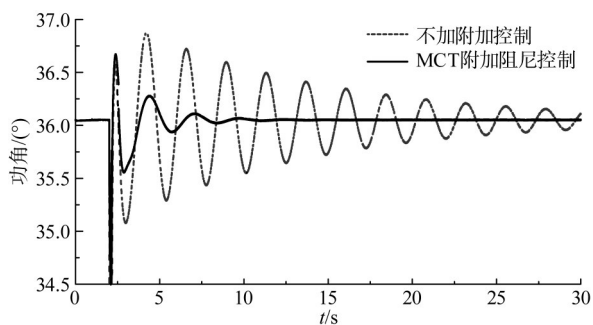


图9 小扰动下功角波动曲线图

Fig. 9 Diagram of power angle fluctuation curves under small disturbances

由图 9 可得: 在系统受到小扰动时发电机功角出现了振荡现象, 且振荡周期为 2.3 s, 对应的振荡频率为 0.435 Hz, 属于区域低频振荡, 并且与算例中计算一致。未加附加控制时, 功角振荡经历长达 12 次, 时间超过 30 s, 系统仍未平息下来; 而采用磁控变压器附加控制的方法, 在系统受到扰动后功角经过 3 次振荡即稳定下来, 经历时间约 8 s, 同时, 振荡幅度也明显降低, 系统稳定性大大提升。

由图 10 可得: 在系统受到大扰动时发电机功角的振荡情况要比小扰动情况下严重得多。不加附加控制时功角振荡时间要更长, 幅度要更大; 采用磁控变压器附加控制时, 功角经过 4 次振荡便可平息下来, 经历时间约为 10 s。

综上所述, 磁控变压器附加阻尼控制对系统的大扰动和小扰动均可起到很好的阻尼效果, 从而验证了本文阻尼控制器设计方法的有效性。

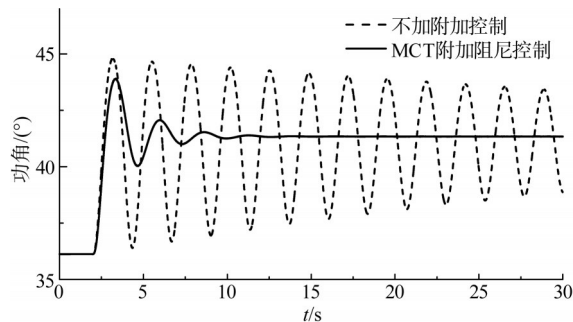


图10 大扰动下功角波动曲线图

Fig. 10 Diagram of power angle fluctuation curves under large disturbances

4 结语

针对电力系统低频振荡问题, 本文提出了一种利用磁控变压器附加阻尼控制提高系统阻尼的方法, 并且研究了基于频域法的附加控制器参数设计方法。以单机无穷大系统为研究对象, 给出了含磁控变压器的 Phillips-Heffron 模型, 分析了磁控变压器附加控制抑制低频振荡的机理。最后, 结合具体例子并采用 Simulink 仿真工具搭建了单机无穷大系统模型进行仿真验证, 结果表明所设计的阻尼控制器对系统大扰动和小扰动均有较好的阻尼作用。

参考文献

- [1] 杨培宏. 电力系统低频振荡分析方法与控制策略[M]. 成都: 电子科技大学出版社, 2017: 1-21.
- [2] DU W J, DONG W K, WANG Y, et al. A method to design power system stabilizers in a multi-machine power system based on single-machine infinite-bus system model [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2021, 36(4): 3475-3486.
- [3] 曾丕江, 黄润, 黄伟, 等. 基于等高线控制器波特图的多频段稳定器 PSS4B 迭代设计方法[J]. 南方电网技术, 2024, 18(11): 38-47.

ZENG Pijiang, HUANG Run, HUANG Wei, et al. Iterative

- design method for multi band stabilizer PSS4B based on contour controller Bode plot [J]. Southern Power System Technology, 2024, 18(11): 38 – 47.
- [4] 和萍, 云磊, 赵琛, 等. 基于MSSA的PSS与UPFC-POD参数和UPFC位置协调优化[J]. 电力系统保护与控制, 2024, 52(1): 174 – 187.
- HE Ping, YUN Lei, ZHAO Chen, et al. Optimization of PSS and UPFC-POD parameters and UPFC position coordination based on MSSA [J]. Power System Protection and Control, 2024, 52(1): 174 – 187.
- [5] 王海鑫, 刘铭崎, 董鹤楠, 等. 含高比例新能源的电力系统低频振荡分析与抑制综述[J]. 电力自动化设备, 2023, 43(9): 152 – 163.
- WANG Haixin, LIU Mingqi, DONG Henan, et al. Analysis and suppression review of low frequency oscillations in power systems with high proportion of new energy sources [J]. Automation of Electric Power Systems, 2023, 43(9): 152 – 163.
- [6] 刘俊磊, 乔小敏, 杨韵, 等. 基于UPFC&DC-SDC的交直流电网低频振荡抑制研究[J]. 电力系统保护与控制, 2020, 48(13): 73 – 79.
- LIU Junlei, QIAO Xiaomin, YANG Yun, et al. Research on low-frequency oscillation suppression in AC/DC grid based on UPFC & DC-SDC [J]. Power System Protection and Control, 2020, 48(13): 73 – 79.
- [7] 张宇宇, 刘建坤, 陈静, 等. 基于柔性负荷及UPFC的低频振荡抑制策略[J]. 电力系统保护与控制, 2019, 47(10): 82 – 87.
- ZHANG Ningyu, LIU Jiankun, CHEN Jing, et al. Low-frequency oscillation suppression strategy based on flexible load and UPFC [J]. Power System Protection and Control, 2019, 47(10): 82 – 87.
- [8] 高正中, 肖佳宜, 申梦茜, 等. 抑制电力系统低频振荡的UPFC控制器设计[J]. 山东科技大学学报(自然科学版), 2017, 36(5): 91 – 96.
- GAO Zhengzhong, XIAO Jiayi, SHEN Mengxi, et al. UPFC controller design for low-frequency oscillation suppression in power systems [J]. Journal of Shandong University of Science and Technology (Natural Science Edition), 2017, 36(5): 91 – 96.
- [9] 蔡卫江, 李雪峰, 赵士正. 基于粒子群算法的SVC抑制阻尼系统振荡控制器设计[J]. 电力科学与技术学报, 2020, 35(5): 60 – 65.
- CAI Weijiang, LI Xuefeng, ZHAO Shizheng. Design of SVC oscillation damping controller based on particle swarm optimization algorithm [J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2020, 35(5): 60 – 65.
- [10] 郑连清, 曾治强, 唐永红. 基于BP-PSO的SVC附加阻尼控制大电网试验[J]. 电力科学与工程, 2018, 34(3): 7 – 13.
- ZHENG Lianqing, ZENG Zhiqiang, TANG Yonghong. Experimental study of SVC supplementary damping control in large power grid based on BP-PSO [J]. Electric Power Science and Engineering, 2018, 34(3): 7 – 13.
- [11] 俞雪丰, 吴星. 码头电力设备低频振荡抑制研究[J]. 港口装卸, 2021(4): 11 – 14.
- YU Xuefeng, WU Xing. Research on low-frequency oscillation suppression of power equipment in ports [J]. Port Handling, 2021(4): 11 – 14.
- [12] 杨蕾, 甘维公, 李胜男, 等. DFIG风电机组协同SVG抑制电网低频振荡方法[J]. 中国电力, 2020, 53(11): 175 – 184, 201.
- YANG Lei, GAN Weigong, LI Shengnan, et al. Method of DFIG wind turbine generator unit coordinated with SVG for suppressing low-frequency oscillation in power grid [J]. Electric Power, 2020, 53(11): 175 – 184, 201.
- [13] 乔超杰, 张晓虎, 董和夫, 等. 基于模糊STATCOM装置的牵引网低频振荡抑制策略[J]. 电工技术, 2022(4): 95 – 99, 103.
- QIAO Chaojie, ZHANG Xiaohu, DONG Hefu, et al. Low-frequency oscillation suppression strategy for traction power supply system based on fuzzy STATCOM device [J]. Electric Engineering, 2022(4): 95 – 99, 103.
- [14] 马燕峰, 刘会强, 俞人楠. 风电场中STATCOM抑制系统功率振荡[J]. 电力自动化设备, 2018, 38(2): 67 – 73.
- MA Yanfeng, LIU Huiqiang, YU Rennan. Power oscillation suppression of STATCOM system in wind farms [J]. Electric Power Automation Equipment, 2018, 38(2): 67 – 73.
- [15] 吴泳中, 李亦健, 邸龙, 等. 紧凑型多功能单级磁阀式立体磁控变压器研究[J]. 南方电网技术, 2024, 18(5): 22 – 30.
- WU Yongzhong, LI Yijian, DI Long, et al. Research on compact multi functional single stage magnetic valve stereoscopic magnetic control transformer [J]. Southern Power System Technology, 2024, 18(5): 22 – 30.
- [16] 陈绪轩, 田翠华, 陈柏超, 等. 多级饱和磁阀式可控电抗器谐波分析数学模型[J]. 电工技术学报, 2011, 26(3): 57 – 64.
- CHEN Xuxuan, TIAN Cuihua, CHEN Baichao, et al. Mathematical model for harmonic analysis of multilevel saturation magnetic valve controlled reactor [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2011, 26(3): 57 – 64.
- [17] 倪以信, 陈寿孙, 张宝霖. 动态电力系统的理论和分析[M]. 北京: 清华大学出版社, 2002: 46 – 71, 235 – 240.
- [18] 潘学萍. 电力系统低频振荡[M]. 北京: 水利水电出版社, 2013: 5 – 25.
- [19] 陈智杰. PSS在电力系统低频振荡中抑制作用的应用分析[J]. 电力设备管理, 2022(3): 225 – 227.
- CHEN Zhijie. Application analysis of PSS in suppressing low-frequency oscillations in power systems [J]. Power Equipment Management, 2022(3): 225 – 227.
- [20] PAL B C. Robust pole placement versus root-locus approach in the context of damping interarea oscillations in power systems [J]. IEEE Proceedings. Generation, Transmission, and Distribution, 2002, 149(6): 739 – 745.
- [21] ROUCO L, PAGOLA F L. An eigenvalue sensitivity approach to location and controller design of controllable series capacitors for damping power system oscillations [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 1997, 12(4): 1660 – 1666.
- [22] ZHOU T, CHEN Z, REN B, et al. Damping torque analysis of VSC-HVDC supplementary damping controller for small-signal stability [J]. IEEE Access, 2020(8): 202696 – 202706.
- [23] ZHANG Qingbo, LUO Ji, ZHANG Dan, et al. A method to identify the impact of wind turbine generators on low-frequency oscillations [J]. IEEE transactions on power systems, 2024, 39(4): 5699 – 5711.

收稿日期: 2023-12-04; 网络首发日期: 2024-06-30

作者简介:

赵国生(1965), 男, 通信作者, 副教授, 博士, 研究方向为电能质量分析与控制技术, zgs410@126.com;

王洪光(1998), 男, 硕士研究生, 研究方向为电力电子与磁控变压器, whghong@163.com;

李辉(1999), 男, 硕士研究生, 研究方向为电力电子与磁控变压器, ljh19990238@163.com。