

基于反推控制的聚合温控负荷与发电机励磁协调控制

余 洋¹, 卢健斌¹, 谢仁杰¹, 米增强², 贾雨龙², 张 然³

(1. 河北省分布式储能与微网重点实验室(华北电力大学), 河北省保定市 071003;

2. 新能源电力系统国家重点实验室(华北电力大学), 河北省保定市 071003;

3. 国网石家庄供电公司, 河北省石家庄市 050051)

摘要: 利用具有储能特性的温控负荷与发电机励磁进行协调控制, 可实现电力系统的功角、频率和电压的多指标调控。首先, 采用双线性聚合温控负荷模型和发电机励磁模型, 推导建立了二者联合的系统数学模型。然后, 基于反推控制原理, 提出了聚合温控负荷与发电机励磁的协调控制策略, 并从理论上证明了控制器的稳定性。针对控制器设计中的微分“计算爆炸”问题, 利用双曲正切的非线性微分跟踪器设计了励磁电压参考量的微分估计算法, 降低了参考量微分计算的工作量。最后, 通过算例对控制算法进行了仿真验证。结果表明, 在协调控制器的作用下, 系统功角、频率和电压等多个被控量均可快速地追踪上各自的参考值。对比传统电力系统稳定器励磁控制, 温控负荷参与调控能有效改善系统各状态量的动态响应, 提高系统稳定性。

关键词: 聚合温控负荷; 发电机励磁; 反推控制; 协调控制器; 多指标控制

0 引言

传统上电力系统采用发电跟踪负荷的方式满足系统的平衡与稳定, 负荷为被动的物理终端。而当电力系统出现紧急故障(如短路、大容量机组跳闸等)时, 若按传统方式调配发电机组出力仍难以维持系统稳定或代价昂贵时, 会考虑切负荷措施^[1]。当前的紧急切负荷措施对馈线级下含有负荷的种类及对用户的舒适度不予考虑, 一刀切后会产生较大的社会负面影响^[2]。另外, 随着电力负荷的攀升、大量间歇式电源的接入及大容量机组在系统中占比的增加, 发电侧灵活调节出力的能力逐渐减弱。可见, 传统的调度控制方式应做出改进, 源-网-荷互动运行与控制成为研究发展的方向, 利用需求侧既有资源补充传统发电调度受到广泛关注^[3-4]。空调、热水器等温控负荷(thermostatically controlled loads, TCL)具有响应快速、能量存储、可控性高等优点, 是短时间尺度上优质和宝贵的需求侧可调度资源, 充分利用其参与系统调控具有较强的现实意义^[5]。

建立精确实用的集群模型是研究 TCL 参与电

力系统调控的基础。现研究中分析 TCL 集群特性时普遍采用蒙特卡洛模拟法, 该方法精确度高, 但模型复杂且运算量大, 无法满足系统调度控制的实时性要求。作为改进, 文献[6]通过大量的历史数据利用自回归平滑模型来构建建筑的热动态过程; 文献[7]研究了一种基于蒙特卡洛模拟法数学期望的 TCL 随机 Fokker-Planck 扩散模型, 在此基础上文献[8]给出了该模型的一种数值求解方法, 使该模型可运用到电力系统有功调控中; 文献[9]在研究 TCL 数量变化时采用了基于 Markov 链的概率密度演化方程, 构建了 TCL 的离散状态模型; 文献[10]探讨了一种不同类型温控设备的多状态队列聚合模型。然而上述研究均基于概率统计过程, 很难运用到实际的控制算法当中。为此, 本文采用文献[11]提出的一种聚合 TCL 的双线性模型, 与蒙特卡洛模型相比, 其保持了较高的精确度, 且易于与电力系统调度控制模型相结合^[12], 为直接控制集群 TCL 提供了一条可靠途径。

在对 TCL 的调控利用策略上, 现有文献多集中于电力市场竞价, 及跟踪自动发电控制(AGC)对系统频率、功率或新能源消纳等的单一独立调控上。如文献[13]提出了一种电力市场下寻找各方利益最大化的负荷控制决策模型; 文献[14-15]通过监视系统频率并相应地开/关 TCL, 为系统提供频率跟踪控制; 文献[16-17]将 TCL 视为虚拟储能设备, 设计

收稿日期: 2018-11-26; 修回日期: 2019-04-30。

上网日期: 2019-07-01。

国家电网公司总部科技项目“面向电力市场的柔性负荷聚合商运营模式及其运行调控关键技术研究”(KJGW2018-014)。

了可有效平抑微电网联络线功率波动的协调控制策略;文献[18]通过对 TCL 施加多时段调制,实现了用电负荷峰值的最大化削减;文献[19-20]研究了 TCL 参与下以最大化提高新能源渗透率为目的的微网运行控制方法等等。然而鲜有将 TCL 与发电机励磁相结合的研究,更未见将两者联合开展多指标协调控制,以更全面的角度去分析 TCL 对系统稳定性的综合影响。

在借鉴聚合 TCL 双线性模型的基础上,本文的创新点主要体现在两点:①将 TCL 和发电机励磁相结合,推导构建了二者的联合数学模型;②将反推控制应用于聚合 TCL 的功率调控中,提出了聚合温控负荷与发电机励磁的协调控制策略。通过算例仿真验证表明,本文提出的协调控制方法实现了功角、频率和电压的多指标调控,且随着 TCL 可调容量的增加,系统的稳定性可得到更好的改善。

1 系统数学模型

为便于研究,参考文献[21]搭建了包含 TCL 的单机无穷大系统模型,如图 1 所示。图中, P_e 和 I_e 分别为系统电磁功率和总电流; P_l 和 I_l 分别为无穷大系统功率和电流; I_r 为 TCL 电流; U_s 为无穷大母线电压。

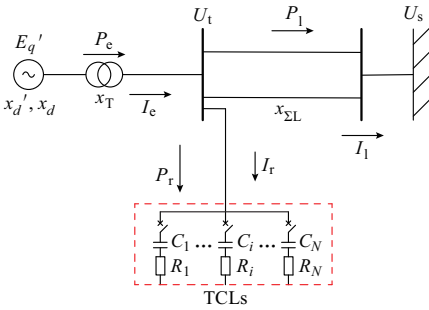


图 1 包含 TCL 的单机无穷大系统
Fig. 1 Single-machine infinite system with TCL

1.1 单机无穷大系统模型

当需要考虑快速励磁的动态过程或是转子动态过程时,普遍采用发电机的三阶模型,即

$$\dot{\delta} = (\omega - 1)\omega_0 \tag{1}$$

$$\omega = \frac{1}{T_j} \left[P_m - \frac{E_q' U_t}{x_d' + x_T} \sin \delta - P_r - D(\omega - 1) \right] \tag{2}$$

$$\dot{E}_q' = -\frac{1}{T_{d0}'} \left[E_q' + \frac{E_q' - U_t \cos \delta}{x_d' + x_T} (x_d - x_d') - E_f \right] \tag{3}$$

式中: δ 为发电机功角; ω 为发电机转子角速度; ω_0

为误差系数; E_q' 为发电机 q 轴暂态电压; E_f 为发电机励磁电压; D 为机组固有阻尼系数; U_t 为变压器高压母线电压; P_m 为原动机机械功率; T_{d0}' 为发电机直轴暂态开路时间常数; T_j 为发电机转子惯性时间常数; x_d 和 x_d' 分别为发电机 d 轴同步电抗和暂态电抗; x_T 为变压器电抗; P_r 为 TCL 的输出功率。

1) TCL 母线电压 U_t 的微分表达式

由于式(3)中 E_q' 与 U_t 的关系尚未确定,故需借助 U_s 推导 E_q' 与 U_t 的关系,根据图 1 有如下关系:

$$U_t - jx_{\Sigma L} \left[\frac{E_q' - U_t}{j(x_d' + x_T)} - j \frac{P_r}{U_t} \right] = U_s \tag{4}$$

式中; U_s 为无穷大母线电压向量; E_q' 为发电机 q 轴暂态电压向量; $x_{\Sigma L}$ 为线路总阻抗; U_t 为变压器高压母线电压向量。

据附录 A 图 A1 所示系统向量图可得:

$$U_t = U_t \sin \delta + jU_t \cos \delta \tag{5}$$

$$U_s = U_s \sin(\delta_L + \delta) + jU_s \cos(\delta_L + \delta) \tag{6}$$

式中: δ_L 为 U_s 与 U_t 间的向量角。

将式(5)和式(6)代入式(4),整理并定义关于 U_t 的函数关系式 $\xi(U_t)$ 为:

$$\xi(U_t) = \left[(1 + \eta)U_t \sin \delta - \frac{x_{\Sigma L} P_r}{U_t} \right]^2 + \left[(1 + \eta)U_t \cos \delta - \eta E_q' \right]^2 - U_s^2 \tag{7}$$

式中: $\eta = x_{\Sigma L} / (x_d' + x_T)$ 。

以 $\xi(U_t)$ 分别对 $U_t, \delta, \omega, E_q', P_r$ 求偏导数,可得 TCL 母线电压 U_t 的微分方程为:

$$\dot{U}_t = -\frac{1}{\frac{\partial \xi(U_t)}{\partial U_t}} \left(\dot{\delta} \frac{\partial \xi(U_t)}{\partial \delta} + \dot{E}_q' \frac{\partial \xi(U_t)}{\partial E_q'} + \dot{P}_r \frac{\partial \xi(U_t)}{\partial P_r} \right) \tag{8}$$

2) 励磁模型

根据文献[22],励磁模型可表示为:

$$\dot{E}_f = -\frac{K_E + S_E(E_f)}{T_E} E_f + \frac{V_F}{T_E} + \omega_f \tag{9}$$

式中: K_E 和 T_E 为励磁机参数; V_F 为励磁机输入; ω_f 为外部扰动;励磁系统饱和函数 $S_E(E_f) = a e^{bE_f}$,其中参数 $a > 0, b > 0$ 。

励磁模型框图如图 2 所示。

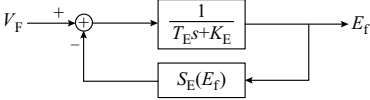


图 2 励磁模型框图
Fig. 2 Block diagram of exciter model

1.2 TCL 聚合模型

1) 单个 TCL 热动态模型

对制冷特性的温控负荷 i , 其室内、室外温度分别为 T_i 和 $T_{\text{infi},i}$, 假设该 TCL 可等值为一个热容 C_i (串联一个热阻 R_i), 引入二元变量 $s_i(t)$ 表示负荷的“开/关”状态, 当 i 为“开”状态时取其功率为 P_i , 则可使用一个独立的一阶常微分方程来模拟它的热动态过程^[23], 如式(10)所示。

$$\dot{T}_i(t) = \frac{1}{C_i R_i} (T_{\text{infi},i} - T_i(t) - s_i(t) R_i P_i) \quad (10)$$

其中

$$s_i(t) = \begin{cases} 0 & T_i(t) \leq T_{\min,i} \\ 1 & T_i(t) \geq T_{\max,i} \\ s_i(t-1) & \text{其他} \end{cases} \quad (11)$$

式中: $T_{\max,i}$ 和 $T_{\min,i}$ 分别为温度限制的上、下限, 它们与温度设定值 $T_{\text{set},i}$ 的关系可表示为

$$\begin{cases} T_{\min,i} = T_{\text{set},i} - \frac{\Delta_i}{2} \\ T_{\max,i} = T_{\text{set},i} + \frac{\Delta_i}{2} \end{cases} \quad (12)$$

式中: $\Delta_i = T_{\max,i} - T_{\min,i}$, 称为温度死区。

则集中式 TCL 功率为:

$$P_r(t) = \sum_{i=1}^N \frac{1}{\eta_{r,i}} P_i s_i(t) \quad (13)$$

式中: $\eta_{r,i}$ 为负荷 i 的效率系数; N 为温控负荷数量。

2) TCL 的双线性聚合模型

在实际生产过程中, 大多数研究对象都具有非线性特征, 然而对非线性系统的直接数学处理通常十分困难。传统的方法是在稳态工作点附近进行线性化处理, 但当研究对象的输入变量有较大幅度波动、工作点移变或对控制精度要求更高时, 线性近似模型往往不再适用。双线性模型被认为是介于线性模型与非线性模型之间具有较高精确度的一种“折中模型”, 其一般状态表达式为:

$$\begin{cases} \dot{\mathbf{X}}(t) = \mathbf{A}\mathbf{X}(t) + \sum_{i=1}^p \mathbf{B}_i \mathbf{X}(t) u_i(t) + \mathbf{N}\mathbf{U}(t) \\ \mathbf{Y}(t) = \mathbf{C}\mathbf{X}(t) \end{cases} \quad (14)$$

式中: $\mathbf{X} \in \mathbf{R}^n$, $\mathbf{U} \in \mathbf{R}^p$, $\mathbf{Y} \in \mathbf{R}^m$ 分别为状态、控制和输出向量; $\mathbf{A}$, $\mathbf{B}_i$ ($i=1, 2, \dots, p$), $\mathbf{N}$, $\mathbf{C}$ 分别为系统矩阵、双线性矩阵、输入矩阵和输出矩阵; $u_i(t)$ 为控制输入。

双线性模型关于状态变量与控制变量分别是线

性的, 而又因出现状态变量与控制变量的乘积项而体现出非线性, 可以很自然地描述工业生产和社会经济等过程中的许多对象, 在系统可控性与最优化等方面有着显著的优越性^[24]。

式(10)表示的集中式温控负荷模型既有连续状态变量(温度), 又有离散的开/关状态变量, 很难直接用于控制设计。若把每个 TCL 均表示为一个独立的微分方程, 将该模型应用于电网级负荷动态响应时会面临维数灾困境。

为解决上述问题, 使用连续性近似将多个温控负荷模型聚合为在其边界处耦合的一组偏微分方程, 控制 TCL 温度在各自温度死区内变化。首先需要推导出这些偏微分方程在温度设定值 T_{set} 不变下的自由响应模型, 然后拓展到 T_{set} 变化时的强制动态响应模型, 最后将温度死区 Δ 平均分为 n 个温度区间, 使用有限差分方法进行离散化, 构造出聚合温控负荷的双线性状态空间模型^[12], 如式(15)所示。

$$\begin{cases} \dot{\mathbf{M}}(t) = \mathbf{A}\mathbf{M}(t) + \mathbf{B}\mathbf{M}(t)\varphi(t) \\ P_r(t) = \mathbf{C}\mathbf{M}(t) \end{cases} \quad (15)$$

式中: $\mathbf{M}(t) = [m_1(t), m_2(t), \dots, m_{2n}(t)]^T$ 为 $2n \times 1$ 阶状态变量矩阵, 表示有限差分离散化后每个温度区间内 TCL 的数量; $\varphi(t)$ 为控制输入, 表示 T_{set} 变化的导数; $P_r(t)$ 为聚合 TCL 的总输出功率。 $\mathbf{C} = 1/\eta_r [0, \dots, 0 |_n, P, \dots, P]$ 为 $1 \times 2n$ 阶输出矩阵; $\mathbf{A}$ 为 $2n \times 2n$ 阶系统矩阵, 具体表达式见附录 A 式(A1); $\mathbf{B}$ 为一个 $2n \times 2n$ 阶双线性矩阵, 具体表达式见附录 A 式(A2)。

附录 A 图 A2 表示了离散化差分方法的原理图。整个温度范围被离散化为 n 个间宽相等的小段, 离散步长为 ΔT , 每个温度小段中均含有“开/关”两种状态的 TCL, 则共有 $2n$ 个温度状态区间, 每个 TCL 属于某个确定的离散温度状态区间。 α 和 β 除了表示“开/关”状态下 TCL 的温度变化速率外, 同时也表示了离散温度区间的负荷传递率, $\varphi(t) = \dot{T}_{\text{set}}$ 表示 t 时刻温度设定值的变化对负荷传递率的影响, 正是通过控制 $\varphi(t)$ 的值去改变 TCL 在温度状态格间的流动, 达到类似直接开闭 TCL 的作用, 从而实现对聚合功率 P_r 的调控。

2 多指标非线性控制律设计

2.1 控制问题描述

联立式(1)、式(2)、式(8)、式(9)和式(15), 可构建 TCL 与发电机励磁联合的状态方程为:

$$\begin{cases} \dot{\delta} = (\omega - 1)\omega_0 \\ \dot{\omega} = \frac{1}{T_j} \left[P_m \frac{E_q' U_t}{x_d' + x_T} \sin \delta - P_r - D(\omega - 1) \right] \\ \dot{U}_t = -\frac{1}{\frac{\partial \xi(U_t)}{\partial U_t}} \left(\dot{\delta} \frac{\partial \xi(U_t)}{\partial \delta} + \dot{E}_q' \frac{\partial \xi(U_t)}{\partial E_q'} + \right. \\ \quad \left. \dot{P}_r \frac{\partial \xi(U_t)}{\partial P_r} \right) \\ \dot{E}_f = -\frac{K_E + a e^{bE_f}}{T_E} E_f + \frac{V_F}{T_E} + \omega_f \\ \dot{\mathbf{M}}(t) = \mathbf{A}\mathbf{M}(t) + \mathbf{B}\mathbf{M}(t)\varphi(t) \end{cases} \quad (16)$$

本文设计协调控制器的主要目的在于保证系统功率平衡、维持电压与频率稳定,即本研究是一个多目标控制问题:①系统功角稳定,δ是同步发电机是否越限失稳的重要指标;②系统频率稳定,ω直接反映系统频率;③维持母线电压U_t稳定。根据电力系统中有功影响频率、励磁影响电压的原则,本文选取了δ,ω,E_f,U_t和P_r等5个参量参与控制器设计,并确定了以有功功率调控系统频率与功角、以励磁调控系统电压的反推控制架构。

2.2 基于反推原理的控制策略

反推控制方法,其基本思路是将复杂的非线性系统分解为不超过系统阶数的若干子系统,然后针对每个子系统设计 Lyapunov 函数和中间虚拟控制量,一直“反推”到整个控制系统,将它们整合起来完成总体控制律的设计。其设计的基本步骤是从一个高阶系统的内核(通常为满足系统输出的动态方程)开始,设计虚拟控制律以保证内核系统的一定性能,如稳定性等;然后逐步修正得到的虚拟控制律算法,但必须保证既定稳定性要求;最终设计出真实的镇定控制器以实现对系统的全局调控或跟踪,使系统达到预期的调控指标。反推控制方法适用于可状态线性化或具有严格反馈特性的非线性系统。

2.2.1 TCL 功率控制器设计

令 $e_{\delta} = \delta_{\text{ref}} - \delta$,其中 δ_{ref} 为功角参考值, e_{δ} 为功角误差变量。由反推控制原理,对 e_{δ} 求导:

$$\dot{e}_{\delta} = \dot{\delta}_{\text{ref}} - (\omega - 1)\omega_0 \quad (17)$$

设计虚拟控制量 ω_{ref} 为:

$$\omega_{\text{ref}} = \frac{\dot{\delta}_{\text{ref}} + k_{\delta} e_{\delta}}{\omega_0} + 1 \quad (18)$$

式中:可调功角控制参数 $k_{\delta} > 0$ 。

将式(18)代入式(17),可得:

$$\dot{e}_{\delta} = -k_{\delta} e_{\delta} \quad (19)$$

令 $e_{\omega} = \omega_{\text{ref}} - \omega$,其中 e_{ω} 为角速度误差变量。

对 e_{ω} 求导:

$$\dot{e}_{\omega} = \frac{\ddot{\delta}_{\text{ref}} - k_{\delta}^2 e_{\delta}}{\omega_0} - \frac{1}{T_j} \left[P_m - \frac{E_q' U_t}{x_d' + x_T} \sin \delta - P_r - D(\omega - 1) \right] \quad (20)$$

设计虚拟控制量 $P_{r,\text{ref}}$ 为:

$$P_{r,\text{ref}} = P_m - \frac{E_q' U_t}{x_d' + x_T} \sin \delta - T_j \left(\frac{\ddot{\delta}_{\text{ref}} - k_{\delta}^2 e_{\delta}}{\omega_0} + k_{\omega} e_{\omega} \right) - D(\omega - 1) \quad (21)$$

式中:可调角速度控制参数 $k_{\omega} > 0$ 。

将式(21)代入式(20),可得:

$$\dot{e}_{\omega} = -k_{\omega} e_{\omega} \quad (22)$$

令 $e_P = P_{r,\text{ref}} - P_r$,其中 e_P 为负荷功率误差变量。对 e_P 求导,并将式(21)代入,结果如附录 A 式(A3)所示,进而可求取 TCL 功率控制器 $\varphi(t)$ 如附录 A 式(A4)所示,式(A4)中可调负荷功率控制参数 $k_P > 0$,将式(A4)代入式(A3),可得:

$$\dot{e}_P = -k_P e_P \quad (23)$$

2.2.2 发电机励磁电压控制器设计

令 $e_U = U_{t,\text{ref}} - U_t$,其中 $U_{t,\text{ref}}$ 为 TCL 所在母线的电压参考值, e_U 为电压误差变量。对 e_U 求导:

$$\dot{e}_U = \dot{U}_{t,\text{ref}} + \frac{1}{\frac{\partial \xi(U_t)}{\partial U_t}} \left(\dot{\delta} \frac{\partial \xi(U_t)}{\partial \delta} + \dot{E}_q' \frac{\partial \xi(U_t)}{\partial E_q'} + \dot{P}_r \frac{\partial \xi(U_t)}{\partial P_r} \right) \quad (24)$$

取虚拟控制量 $E_{f,\text{ref}}$ 为:

$$E_{f,\text{ref}} = E_q' + \frac{E_q' - U_t \cos \delta}{x_d' + x_T} (x_d - x_d') - \frac{T_{d0}' U_t}{\frac{\partial \xi(U_t)}{\partial E_q'}} \quad (25)$$

$$U_t = \dot{\delta} \frac{\partial \xi(U_t)}{\partial \delta} + \dot{P}_r \frac{\partial \xi(U_t)}{\partial P_r} + \frac{\partial \xi(U_t)}{\partial U_t} (\dot{U}_{t,\text{ref}} + k_U e_U) \quad (26)$$

可调电压控制参数 $k_U > 0$,将式(25)代入式(24),可得:

$$\dot{e}_U = -k_U e_U \quad (27)$$

令 $e_{E_f} = E_{f,\text{ref}} - E_f$,其中 e_{E_f} 为发电机励磁电压误差变量,对 e_{E_f} 求导,可得:

$$\dot{e}_{E_f} = \dot{E}_{f,\text{ref}} + \frac{K_E + a e^{bE_f}}{T_E} E_f - \frac{V_F}{T_E} - \omega_f \quad (28)$$

则可求取励磁电压控制器 V_F 为:

$$V_F = T_E (\dot{E}_{f,\text{ref}} - \omega_f + k_{E_f} e_{E_f}) + (K_E + a e^{bE_f}) E_f \quad (29)$$

式中:可调励磁电压控制参数 $k_{E_f} > 0$ 。

将式(29)代入式(28),可得:

$$\dot{e}_{E_f} = -k_{E_f} e_{E_f} \quad (30)$$

2.2.3 反推控制器稳定性证明

首先,以构造反推控制第一步中的 Lyapunov 函数 $V_1 = e_\delta^2/2$ 为例, $\dot{V}_1 = -k_{e_\delta} e_\delta \leq 0$, $\dot{V}_1$ 一致且连续,不等式两边同时积分,可得 $\int_0^\infty \dot{V}_1 dt \leq 0$, 即有 $-V_1(0) \leq V_1(\infty) - V_1(0) \leq 0$ 。上述不等式可化简为: $0 \leq V_1 \leq V_1(0)$ 。 V_1 有界, 即 $-V_1(0) \leq \int_0^\infty \dot{V}_1 dt \leq 0$, 所以 $\int_0^\infty \dot{V}_1 dt \leq 0$ 存在且有界, 根据 Barbalat 定则, 可得出 $\lim_{t \rightarrow \infty} \dot{V}_1 = 0$, 即 $\lim_{t \rightarrow \infty} e_\delta = 0$, 所以 V_1 有界, 并且 V_1 渐进趋于零。同理可以推出 $\lim_{t \rightarrow \infty} e_\omega = 0, \lim_{t \rightarrow \infty} e_P = 0, \lim_{t \rightarrow \infty} e_U = 0, \lim_{t \rightarrow \infty} e_{E_f} = 0$ 。可见反推控制可使跟踪误差渐进趋于零, 以达到精确跟踪的目的。

则对整个控制系统, 取 Lyapunov 函数 L_y 为:

$$L_y = \frac{1}{2} e_\delta^2 + \frac{1}{2} e_\omega^2 + \frac{1}{2} e_P^2 + \frac{1}{2} e_U^2 + \frac{1}{2} e_{E_f}^2 \quad (31)$$

对式(31)求导数, 并将式(16)、式(22)、式(23)、式(28)和式(30)代入可得:

$$\dot{L}_y = -k_\delta e_\delta^2 - k_\omega e_\omega^2 - k_P e_P^2 - k_U e_U^2 - k_{E_f} e_{E_f}^2 \leq 0 \quad (32)$$

考虑 L_y 有界, 根据 Barbalat 定则, 有

$$\lim_{t \rightarrow \infty} L_y(t) = 0 \quad (33)$$

由此, 证明了所设计的反推控制器是渐进稳定的, 即随着时间的推移, 在控制器 $\varphi(t)$ 和 V_F 作用下, 误差系统将渐进收敛于 $(0, 0, 0, 0, 0)$, 则系统状态量也将收敛于设定的参考值。

2.3 微分跟踪器

式(29)构造的发电机励磁电压控制器 V_F 需要对励磁电压参考值 $E_{f, \text{ref}}$ 求导, 然而 $E_{f, \text{ref}}$ 自身表达式已较复杂, 若再对其求导数将出现“计算爆炸”问题。为此, 引入基于双曲正切的非线性微分跟踪器^[25]来估计 $\dot{E}_{f, \text{ref}}$, 构建 $\dot{E}_{f, \text{ref}}$ 的微分跟踪器表达式为:

$$\begin{cases} \dot{x}_1(t) = x_2(t) \\ \dot{x}_2(t) = -a_d R_d^2 \tanh(b_d(x_1(t) - E_{f, \text{ref}})) - a_d R_d^2 \tanh\left(\frac{b_d x_2(t)}{R_d}\right) \end{cases} \quad (34)$$

式中: a_d, b_d 和 R_d 分别为微分跟踪器的幅值参数、斜率参数和时间参数, 其中 $x_1(t)$ 跟踪 $E_{f, \text{ref}}$, $x_2(t)$

跟踪 $\dot{E}_{f, \text{ref}}$ 。

2.4 控制器调控过程分析

本文设计的协调控制器调控过程如图 3 所示。

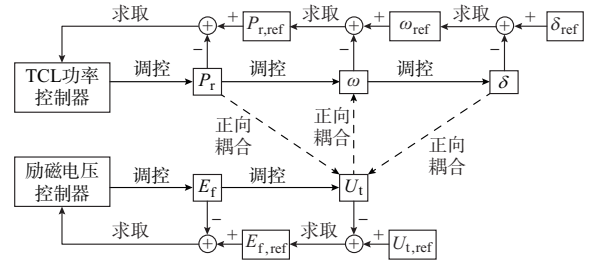


图3 协调控制器调控过程
Fig.3 Regulation process of coordinated controller

以系统发生短路故障为例进行分析, 在短路故障发生的初始时刻, 一方面母线电压 U_t 被拉低, 与设定的 $U_{t, \text{ref}}$ 产生一个误差 e_U 。由式(25)可知, 励磁电压参考 $E_{f, \text{ref}}$ 将增大, 产生的误差 e_{E_f} 将使式(29)中励磁电压控制输入 V_F 增大, 进而作用于式(16)中的励磁微分量 $\dot{E}_f$, 促使励磁电压 E_f 抬升去拉高 U_t 。另一方面 U_t 的降低还因正向耦合而造成角速度 ω 下降, 以相似的过程产生误差量 e_ω 和 e_P 进而增大如附录 A 式(A4)所示的温控负荷温度设定值变化率 $\varphi(t)$, 最终通过调控温控负荷的开/关来稳定频率和功角, 对 TCL 的调节经耦合关系可联调 U_t 。故障切除后系统在协调控制下经过若干振荡将恢复至稳定运行状态。当发生调功扰动时, 将最先影响角速度 ω , 余下过程与短路故障类似。

3 算法仿真实验与分析

构建如图 1 所示的联合系统, 对提出的控制策略进行仿真验证, 系统模型相关参数如下。

电力系统参数标幺化后的取值为: $P_m = 0.8$, $U_s = 1.0$, $x_d = 2.2$, $x_d' = 0.5$, $D = 2.0$, $x_T = 0.55$, $x_{\Sigma L} = 0.2$, $K_E = 0.368$, $T_{d0}' = 5.8$ s, $T_j = 4.5$ s, $T_E = 0.276$ s, $a = 0.00028$, $b = 0.05$ 。

TCL 聚合模型参数为: $R = 2$ °C/kW, $C = 2$ (kW · h)/°C, $P = 14$ kW, $\eta_r = 2.5$, $T_{\text{set}} = 25$ °C, $T_{\text{infi}} = 32$ °C, $\Delta = 0.5$ °C。

微分跟踪器参数为: $a_d = 10.5$, $b_d = 5.7$, $R_d = 42.4$ 。

联合系统初始运行点参数标幺化后的取值为: $\omega_0 = 1.0$, $U_{t,0} = 1.0$, $E_{f,0} = 1.1$, $P_{r,0} = 0.363$, $\delta_0 = 30^\circ$ 。

根据工程实际做出限定: $0.1 \leq E_f \leq 3$, $E_q' \leq 3$ 。

为了更好地检验控制器的性能及 TCL 参与电

力系统调控对系统稳定性的影响,设计了短路扰动和调功扰动分别进行了三组对比仿真实验,比较了TCL可调容量在50%(即在扰动中 P_r 可上下总波动不超过0.5,下同)、30%和0下系统各控制参数的调控效果,并与目前广泛采用的电力系统稳定器(PSS)励磁控制方式进行对比。PSS励磁控制方式是基于电压调节器(AVR)或其他形式的调节基础之上,又增加以转速偏差、频率偏差、加速功率偏差或电磁功率偏差中的一个或多个信号构成的二阶超前矫正环节,达到平抑系统低频振荡的作用。本算例中采用以转速偏差 $\Delta\omega$ 、电磁功率偏差 ΔP_e 。同时作为输入信号的PSS控制方式,各模块模型及参数如下。

- 1)励磁模型及具体参数见附录A图A3。
- 2)PSS模型采用文献[26]所给形式,具体参数取为: $T_1=3.65, T_2=0.58, T_3=0.15, T_4=0.237, T_5=0.55, k_w=0.5, k_p=6.8$ 。

3.1 短路扰动仿真

设计系统在 $t=1\text{ s}$ 时,TCL所在母线右侧出口发生三相短路,经过0.15 s后故障得以切除并重合闸成功,仿真结果如图4所示。

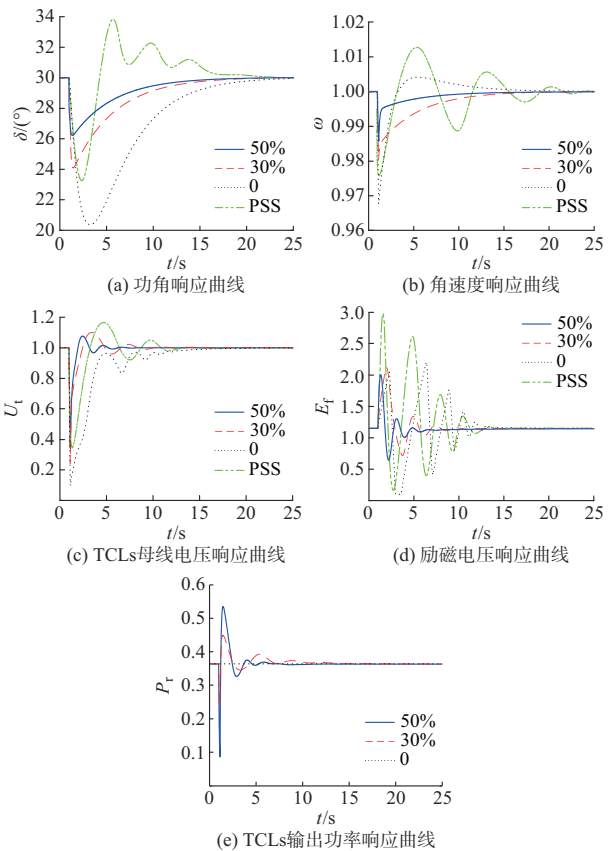


图4 短路扰动响应曲线
Fig. 4 Response curves of short circuit disturbance

3.2 调功扰动仿真

设计系统在 $t=1\text{ s}$ 时,原动机机械功率 P_m 从原来的0.8降为0.7,主要考察当发电机给定的机械功率值发生变化后,系统各状态量及输出量的动、静态性能可否满足系统的运行要求,仿真结果如图5所示。

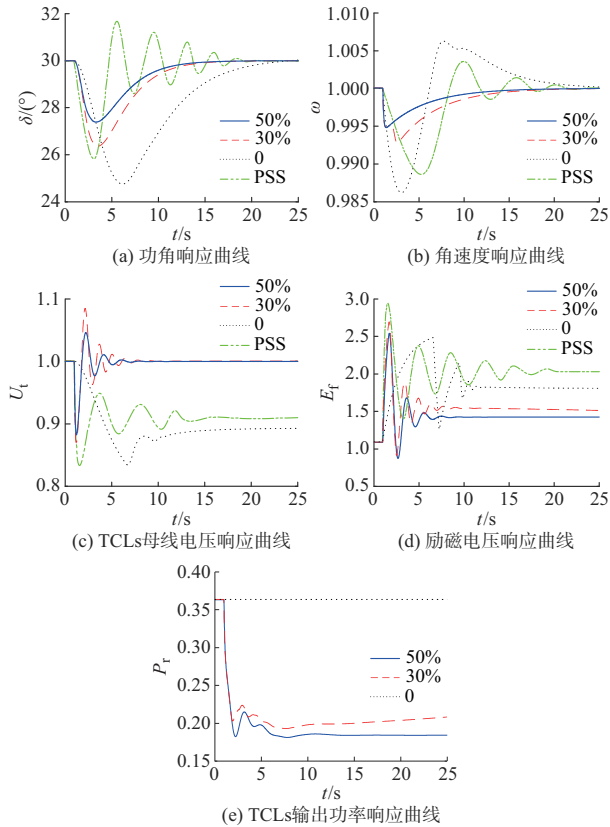


图5 调功扰动响应曲线
Fig. 5 Response curves of power regulation disturbance

3.3 仿真结果讨论

图4和图5的响应曲线表明,当扰动发生后,系统功角 δ 、发电机角速度 ω 、TCL母线电压 U_t 在两个控制器的作用下均可快速有效地恢复至正常运行状态。综合分析响应曲线可以看出,所提协调控制器的纯励磁控制(即零响应曲线)对比PSS励磁控制方式在调控效果上互有优势,协调控制器可抑制系统波动,PSS控制可减少系统超调量。这是因为协调控制器在纯励磁控制时引入了功角 δ 、角速度 ω 作为附加反馈,与PSS采用转速偏差 $\Delta\omega$ 、电磁功率偏差 ΔP_e 。作为超前环节在作用机理上有一定相似之处。

而随着TCL的参与及其可调容量的增大, δ, ω, U_t 和 E_f 的调控品质得到明显改善,系统控制的动、静态过程都得到有效的补偿。从图4(a)和(b)

和图 5(a)和(b)中可看出,TCL 的参与可有效抑制系统的功角和频率振荡,减小了调控过程中的超调量;尤其图 4(b)中当 TCL 可调容量为 0 时,当前系统参数下协调控制的角速度在短路发生后跌落至 0.967 6,此时系统频率为 48.38 Hz,低于 48.5 Hz,可能会引起发电机低频保护动作。分析图 4(c)和(d)和图 5(c)和(d)还可看出,基于当前系统参数,在 TCL 与励磁的协调控制下的 U_i 和 E_f 相比 PSS 方式控制时的稳定时间缩短了将近一半。特别地,图 5(c)和(d)显示了在有 TCL 参与时,有功调节不会引起 TCL 母线电压 U_i 的静态偏差。

由图 4(e)和图 5(e)分析可知,TCL 在参与电力系统调控时,可以发挥类似于发电机或储能装置功率控制的作用,当系统发生短路或原动机向下调功时,发电机输出的功率大幅减少,此时为维持系统平衡,控制器迅速响应而使大量 TCL 关闭,补偿当前的功率缺额。

此外,仿真中若 x_d' 或 x_T 增大,即发电机到温控负荷及短路点的电气距离增大,励磁电压 E_f 的超调量将变大,系统的稳定也将更多地依赖于温控负荷输出功率 P_r 的可调容量。可见当仅靠发电机的调节作用无法满足系统的稳定经济运行要求时,充分开发利用已有的 TCL 资源可有效降低系统的调控运行成本,提高系统稳定性。

4 结语

本文提出了一种基于反推原理的聚合 TCL 与发电机励磁的多指标协调控制方法,旨在充分发挥柔性负荷参与系统调控的作用,提高系统稳定性。在搭建的系统模型上就 TCL 可调容量对系统稳定性的影响进行了原理性的探索与验证,经研究得到的结论如下。

1)多目标协调反推控制器在不同扰动、不同 TCL 可调容量下均能有效地调节系统状态,使功角、频率和电压等多个控制目标均可快速跟踪各自参考值,表明了该协调控制策略的正确性及较好的鲁棒性。

2)TCL 的参与可有效改善系统的动、静态调节特性,且随着 TCL 可调容量的增大,可进一步提升系统的稳定性。

3)与 PSS 励磁控制方式相比,在本文协调控制器的作用下,多个控制目标能更快速地跟踪上各自参考值,同时,输出波形波动幅度更小,具有更好的控制效果。

本文在考虑 TCL 时只选取了制冷特性且均一化后的模型,下一步可针对不同类型的 TCL 分别建模,并通过增加最小能源损耗或最佳舒适度等约束进一步优化控制策略。

附录见本刊网络版(<http://www.aeps-info.com/aeps/ch/index.aspx>)。

参考文献

- [1] 岑炳成,黄涌,廖清芬,等. 基于频率影响因素的低频减载策略[J]. 电力系统自动化,2016,40(11):61-67.
CEN Bingcheng, HUANG Yong, LIAO Qingfen, et al. Low frequency load shedding strategy based on frequency influence factors[J]. Automation of Electric Power Systems, 2016, 40(11): 61-67.
- [2] 苏建军,郭跃进,刘萌,等. 紧急切负荷措施的温控负荷控制策略及概率模型[J]. 电网技术,2018,42(3):911-918.
SU Jianjun, GUO Yuejin, LIU Meng, et al. Temperature control load control strategy and probability model for emergency load shedding measures [J]. Power System Technology, 2018, 42(3): 911-918.
- [3] 沈运帷,李扬,高赐威,等. 需求响应在电力辅助服务市场中的应用[J]. 电力系统自动化,2017,41(22):151-161. DOI:10.7500/AEPS20170302007.
SHEN Yuwei, LI Yang, GAO Ciwei, et al. Application of demand response in ancillary service market[J]. Automation of Electric Power Systems, 2017, 41(22): 151-161. DOI: 10.7500/AEPS20170302007.
- [4] YU Yang, MI Zengqiang, ZHENG Xiaoming, et al. Accommodation of curtailed wind power by electric water heaters based on a new hybrid prediction approach[J]. Journal of Modern Power Systems and Clean Energy, 2019, 7(3): 525-537.
- [5] 王珂,姚建国,姚良忠,等. 电力柔性负荷调度研究综述[J]. 电力系统自动化,2014,38(20):127-135.
WANG Ke, YAO Jianguo, YAO Liangzhong, et al. Survey of research on flexible loads scheduling technologies [J]. Automation of Electric Power Systems, 2014, 38(20): 127-135.
- [6] RABL A. Parameter estimation in buildings: methods for dynamic analysis of measured energy use[J]. Journal of Solar Energy Engineering, 1988, 110(1): 52-66.
- [7] MALHAME R, CHONG C Y. Electric load model synthesis by diffusion approximation of a high-order hybrid-states to stochastic system [J]. IEEE Transactions on Automatic Control, 1985, 30(9): 854-860.
- [8] 刘萌,梁雯,张晔,等. 温控负荷群 Fokker-Planck 方程聚合模型的数值拉普拉斯反变换求解方法[J]. 电力系统保护与控制, 2017,45(23):17-23.
LIU Meng, LIANG Wen, ZHANG Ye, et al. Numerical inverse Laplace transform solving method of thermostatically controlled load group's Fokker-Planck equation aggregation model [J]. Power System Protection and Control, 2017,

45(23): 17-23.

[9] MATHIEU J L, KOCH S, CALLAWAY D S. State estimation and control of electric loads to manage real-time energy imbalance[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2013, 28(1): 430-440.

[10] WANG L, YANG Q, YAN W. Residential thermostatically controlled appliances for smoothing tie line power based on multiple state-queueing model [C]// IEEE Control and Decision Conference, May 28-30, 2017, Chongqing, China.

[11] BASHASH S, FATHY H K. Modeling and control of aggregate air conditioning loads for robust renewable power management [J]. IEEE Transactions on Control Systems Technology, 2013, 21(4): 1318-1327.

[12] 艾欣,赵阅群,周树鹏. 适应清洁能源消纳的配电网直接负荷控制模型与仿真[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(25): 4234-4243.

AI Xin, ZHAO Yuequn, ZHOU Shupeng. Direct load control model and simulation for clean energy accommodation in distribution network[J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(25): 4234-4243.

[13] 张钦,王锡凡,别朝红,等. 电力市场下直接负荷控制决策模型[J]. 电力系统自动化, 2010, 34(9): 23-28.

ZHANG Qin, WANG Xifan, BIE Zhao hong, et al. A decision model of direct load control in electricity markets [J]. Automation of Electric Power Systems, 2010, 34(9): 23-28.

[14] SHORT J A, INFELD D G, FRERIS L L. Stabilization of grid frequency through dynamic demand control [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2007, 22(3): 1284-1293.

[15] 董丹丹. 基于电热水器类温控负荷的电力系统频率稳定与控制研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2015.

DONG Dandan. Research on frequency stability and control of power system based on temperature control load of electric water heater [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2015.

[16] 冯雷,蔡泽祥,王奕,等. 计及负荷储能特性的微网荷储协调联络线功率波动平抑策略[J]. 电力系统自动化, 2017, 41(17): 22-28. DOI: 10.7500/AEPS20161225001.

FENG Lei, CAI Zexiang, WANG Yi, et al. Strategy for tie line power fluctuation suppressing of load-energy storage coordinated microgrid considering energy-storage characteristic of load [J]. Automation of Electric Power Systems, 2017, 41(17): 22-28. DOI: 10.7500/AEPS20161225001.

[17] 王冉,王丹,贾宏杰,等. 一种平抑微网联络线功率波动的电池及虚拟储能协调控制策略[J]. 中国电机工程学报, 2015, 35(20): 5124-5134.

WANG Ran, WANG Dan, JIA Hongjie, et al. A coordination control strategy of battery and virtual energy storage to smooth the micro-grid tie-line power fluctuations [J]. Proceedings of the CSEE, 2015, 35(20): 5124-5134.

[18] 郑爱霞,吉用丽,辛建波,等. 计及反弹效应的温控负荷有序削峰策略[J]. 南方电网技术, 2017, 11(11): 53-60.

ZHENG Aixia, JI Yongli, XIN Jianbo, et al. Orderly peak load shaving strategy of thermostatic controlled loads considering payback effect [J]. Southern Power System Technology, 2017, 11(11): 53-60.

[19] 齐晓琳. 考虑新能源消纳的柔性负荷需求响应策略及优化调度 [D]. 北京: 华北电力大学, 2017.

QI Xiaolin. Optimal scheduling and demand response strategy of flexible loads considering the consumption of new energy [D]. Beijing: North China Electric Power University, 2017.

[20] 王东,曾沅,穆云飞,等. 基于温控负荷控制技术的新能源优化利用方法[J]. 电网技术, 2015, 39(12): 3457-3462.

WANG Dong, ZENG Yuan, MU Yunfei, et al. An optimization method for new energy utilization using thermostatically controlled appliances [J]. Power System Technology, 2015, 39(12): 3457-3462.

[21] 阮映琴,王杰. SVC与发电机励磁无源协调 Backstepping 控制 [J]. 电工技术学报, 2007, 22(6): 135-140.

RUAN Yingqin, WANG Jie. Coordinated control for SVC and generator excitation based on passivity and backstepping technique [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2007, 22(6): 135-140.

[22] WAN Y, ZHAO J. H_{∞} control of single-machine infinite bus power systems with superconducting magnetic energy storage based on energy-shaping and backstepping [J]. IET Control Theory & Applications, 2013, 7(5): 757-764.

[23] CALLAWAY D S. Tapping the energy storage potential in electric loads to deliver load following and regulation, with application to wind energy [J]. Energy Conversion & Management, 2009, 50(5): 1389-1400.

[24] 华向明. 双线性系统建模与控制 [M]. 上海: 华东化工学院出版社, 1990.

HUA Xiangming. Modeling and control of bilinear systems [M]. Shanghai: East China Institute of Chemical Technology Press, 1990.

[25] 毛海杰,李炜,冯小林. 基于双曲正切的非线性跟踪微分器设计 [J]. 计算机应用, 2016, 36(增刊 1): 305-309.

MAO Haijie, LI Wei, FENG Xiaolin. Design of nonlinear tracking differentiator based on hyperbolic tangent function [J]. Journal of Computer Applications, 2016, 36(Supplement 1): 305-309.

[26] 余洋. 基于 Simulink 的电力系统稳定器(PSS)应用仿真[J]. 电网与清洁能源, 2012(7): 62-63.

YU Yang. Application simulation of power system stabilizer based on Simulink [J]. Power System and Clean Energy, 2012(7): 62-63.

余 洋(1982—),男,通信作者,博士,副教授,硕士生导师,主要研究方向: 柔性负荷建模与调度、电力储能技术。E-mail: yym0401@163.com

卢健斌(1991—),男,硕士研究生,主要研究方向: 柔性负荷建模与调度。E-mail: lujianbin_1@163.com

谢仁杰(1993—),男,硕士研究生,主要研究方向: 柔性负荷参数辨识与控制。E-mail: renjiexie@outlook.com

(编辑 鲁尔姣)

(下转第 124 页 continued on page 124)

Backstepping Control Based Coordinated Control of Aggregated Thermostatically Controlled Load and Generator Excitation

YU Yang¹, LU Jianbin¹, XIE Renjie¹, MI Zengqiang², JIA Yulong², ZHANG Rang³

(1. Key Laboratory of Distributed Energy Storage and Microgrid of Hebei Province

(North China Electric Power University), Baoding 071003, China;

2. State Key Laboratory of Alternate Electrical Power System with Renewable Energy Sources

(North China Electric Power University), Baoding 071003, China;

3. State Grid Shijiazhuang Electric Power Supply Company, Shijiazhuang 050051, China)

Abstract: Coordinated control of thermostatically controlled loads (TCLs) with energy storage characteristic and generator excitation enables to achieve multi-index regulation of power angle, frequency and voltage in power system. Firstly, the descriptions of bi-linear aggregated TCLs model and generator excitation model are integrated to derive an overall mathematical model. Then, based on backstepping control theory, the control strategy coordinated aggregated TCLs with generator excitation is proposed, and the stability of the controller is proved in theory. In allusion to the problem of "calculation explosion" in the design of the controller, a hyperbolic tangent based nonlinear differential tracker is devised to estimate the differential reference value of excitation voltage that reduces the calculation work. Finally, the control algorithm is verified by various cases, and the simulation results show that power angle, frequency and voltage of the system enable to track their references rapidly and correctly with the aid of the proposed coordinated controller. In comparison with the power system stabilizer in traditional excitation control, dynamic responses of state parameters through the controller are improved effectively and the stability of the system is enhanced with the participation of TCLs.

This work is supported by State Grid Corporation of China (No. KJGW2018-014).

Key words: aggregated thermostatically controlled loads (TCLs); generator excitation; backstepping control; coordinated controller; multi-index control