

基于多目标优化的液压型风力发电机电能质量优化控制研究

张寅 姬莉 赵月红 张大磊 张维平
(秦皇岛职业技术学院 河北秦皇岛 066300)

摘要: 液压型风力发电机组对调整能源结构、节约资源、保护生态环境、促进经济可持续发展具有重要意义。液压型风力发电机组的控制策略和功率平滑输出研究的重点在于在低风速下实现最佳功率追踪和功率平滑输出,这对于电能质量尤为关键。最佳功率追踪目的在于实现最大风能捕获,提高发电效率;功率平滑输出在于减少功率波动,以使发电质量最优。基于此,文章采用逆系统方法建立系统模型,通过线性二次型最优控制设计最优多目标优化控制器,并搭建了实验平台验证其有效性。研究为优化液压型风力发电机组控制策略和提高电能质量提供了重要依据。

关键词: 液压型风力发电机组;最优控制;电能质量
中图分类号: TM315

随着化石能源储备逐渐枯竭及其使用过程中对环境产生的负面影响日益凸显,风电技术被置于减排温室气体技术清单的显著位置。作为一种至关重要的可再生且清洁的能源形式,风电正在逐步扩大其在全球能源产业中的份额,并日益受到众多国家的青睐。这一趋势不仅体现了对可持续发展的深刻认识,也展示了风电在未来能源结构中的重要地位。

文献[1]提出在不改变现有变流器控制策略的前提下,通过在变流器直流侧接入飞轮储能系统,通过控制飞轮储能系统吸收和释放多余的风功率去动态补偿功率波动来有效地平滑风力发电机输出的有功功率,提高电能质量。文献[2]针对永磁直驱风力发电机组提出在变流器直流侧接入超级电容器和蓄电池,通过综合控制策略使风力发电机能够输出平滑的功率,但在系统稳定性、增加成本、功率平滑性[3,4]以及风能利用率之间的平衡问题仍显突出。特别是部分方法在低风速环境下,通过调整桨叶角度和发电机转速虽能实现功率的平滑,但无疑牺牲了风能的利用效率,此外,另一些方法借助光电储能单元或超级电容等辅助设备与风力发电机协同作业,以期达到功率平滑输出的目标。该策略增加硬件成本和控制复杂度,仅通过变流器控制寻求功率平滑输出,其效果有限。为改善此情况,在不增加成本基础上通过优化硬件设备、深入研究控制策略,引入先进控制算法和人工智能技术需从多方面综合研究和优化,以找到更有效解决方案。特别是在液压型风力发电机组的优化控制研究相对较少。

1 基于逆系统的仿真模型

在对风机液压传动建立状态空间模型过程前,需要做如下假设:

- (1) 由于风轮与定量泵直接相连,认为风轮转速与定量泵转速相同,即 $\omega_r = \omega_p$; (ω_r 为风轮角速度; ω_p 为定量泵角速度)
- (2) 建模过程中认为定量泵、变量马达的机械效率为定值;
- (3) 液压系统连接管道尽可能短,忽略管道中压力损失;
- (4) 定量泵和变量马达的泄漏系数、粘性阻尼系数和油液的弹性模量为定值;
- (5) 不考虑补油系统,认为低压侧压力为 0,定量泵和变量马达的进出口压差和高压侧压力相等,即 $p_{a1} = p_{a2} = p_a$ 。

在假设基础上,建立数学模型公式为

$$\begin{cases} \dot{\omega}_p = -\frac{B_p}{J_p} \omega_p - \frac{D_p}{\eta_{mech}} x_2 + \frac{1}{J_p} T_r(\omega_p, v) \\ \dot{p}_a = \frac{D_p \beta}{v} \omega_p - \frac{C_i \beta}{v} p_a - \frac{K_m \beta \omega_{md}}{v} \gamma \end{cases} \quad (1)$$

其中, ω_p 为定量泵的角速度 (rad/s); B_p 为定量泵的阻尼系数 ($N \cdot m \cdot s / rad$); D_p 为定量泵的排量 (m^3/s); J_p 为定量泵的转动惯量 ($kg \cdot m^2$); η_{mech} 为定量泵的机械效率; T_r 为风轮转矩 ($N \cdot m$), v 为来流风速 (m/s); β 为桨距角 ($^\circ$); C_i 为定量泵泄漏系数 ($m^3/(s \cdot Pa)$); γ 为变量马达摆角,取值区间 $[0, 1]$; ω_{md} 为

变量马达旋转角速度 (rad/s)

根据假设,定义状态变量 $x_1 = \omega_p$, $x_2 = p_a$, 系统控制输入为 $u = \gamma$, 因此改写为

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = -\frac{B_p}{J_p} x_1 - \frac{D_p}{\eta_{mech}} x_2 + \frac{1}{J_p} T_r(x_1, v) \\ \dot{x}_2 = \frac{D_p \beta}{v} x_1 - \frac{C_i \beta}{v} x_2 - \frac{K_m \beta \omega_{md}}{v} u \end{cases} \quad (2)$$

2 多目标优化控制器设计

电能质量优化控制希望系统在功率追踪保证功率输出最大的同时,能够保证系统输出功率的平滑,因此确定系统的寻优函数为

$$J(\varepsilon) = \frac{1}{2} \varepsilon^T(t_f) F \varepsilon(t_f) + \frac{1}{2} \int_{t_0}^{t_f} [\varepsilon^T(t) Q(t) \varepsilon(t) + \varepsilon^T(t) R(t) \varepsilon(t)] dt \quad (3)$$

$\varphi(t_f) = \frac{1}{2} \varepsilon^T(t_f) F \varepsilon(t_f) \geq 0$ ——终端代价函数,其可以限制终点误差

$e(t_f)$, 从而令终端状态 $x(t_f)$ 具有一定的准确性。

$L_e = \frac{1}{2} e^T(t) Q(t) e(t) \geq 0$ ——状态转移过程中衡量误差大小的代价函数,可以限制控制过程中的 $e(t)$ 大小,以确保系统具有一定的快速性。

$L_u = \frac{1}{2} v^T(t) R(t) v(t) > 0$ ——状态转移过程中衡量 $u(t)$ 大小的代价函数,用它来限制控制 $u(t)$ 的幅值及其平滑性,从而确保系统能够安全运行。另外,其对控制过程中的能源消耗也能有较强的限制作用,从而,系统将具有一定的节能性。

寻优函数的物理意义是以较小的控制能量为代价,使误差保持在零值附近。使系统在控制过程中的动态误差与能量消耗以及控制结束时的系统稳态误差综合最优。在本文中即跟踪最佳转矩时同时保证系统功率波动最小。扰动对功率的影响最小,即

$$J_{g1} = E \left\{ \int_0^{\infty} (\Delta P(t))^2 dt \right\} \longrightarrow \min \quad (4)$$

液压系统的转矩波动最小,即

$$J_{g2} = E \left\{ \int_0^{\infty} (\Delta P(t))^2 dt \right\} \longrightarrow \min \quad (5)$$

综合两个最优目标,在额定风速以下工况,液压系统最优控制的目标确定为

$$J = \alpha J_{g1} + J_{g2} = E \left\{ \int_0^{\infty} X^T(t) C_a^T C_a X(t) + u^T(t) N u(t) dt \right\} \longrightarrow \min \quad (6)$$

其中, α 为权重系数。

线性二次型最优控制策略结构如图 1 所示,其中输入是风速、桨距角和最佳转速。

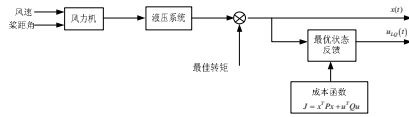


图1 线性二次型最优控制框图

3 仿真研究与结果分析

在 MATLAB/Simulink 中建立基于逆系统的最优控制器数学仿真模型，以验证其有效性，如图 2 所示，输入随机风速来观察系统在各状态下的动静态特性(其中 V 表示液压泵实际排量)。

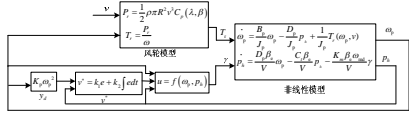


图2 控制仿真模型

给定如图 3 所示的可变自然风速信号 v，风力机输入功率 Pr、转矩 Tr 以及在控制器作用下系统的各状态响应曲线如图 4 所示。

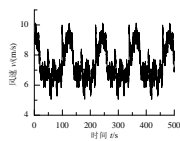


图3 波动风速曲线

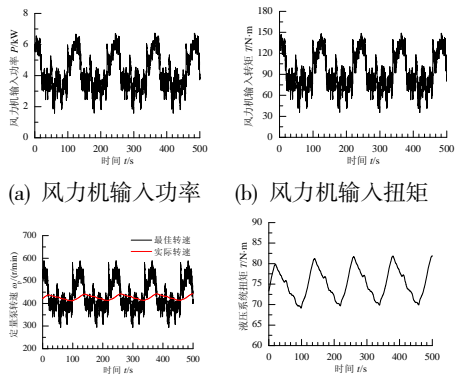


图4 波动风速条件下系统状态响应曲线

图 3 为真实工况的自然风速曲线。模拟自然界条件 500 s 的自然风，验证系统对于功率追踪和功率平滑的多目标控制效果。

如图 4 所示，在给定的自然风速条件下，风力机输出功率与输出转矩是波动的，且与给定风速的变化趋势保持一致。通过本文设计的控制器进行控制时，定量泵转速、液压系统的扭矩、压力和功率曲线变化平稳且平滑。通过图 4(f)可以看出本文设计的功率追踪及功率平滑多目标最优控制器得到的功率曲线相比于传统 PID 控制的功率曲线平滑。液压系统输出功率和液压系统压力及扭矩保持一致。

4 小转动惯量自然风速条件下的功率追踪及平滑多目标控制实验

液压型风力发电机组功率平滑控制实验平台结构如图 5 所示。实验平台由风轮模拟单元、液压传动系统单元、并网发电单元和控制单元等 4 部分构成。

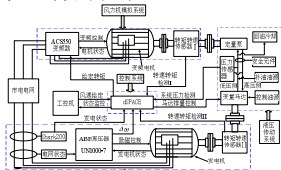


图5 电能质量优化控制试验台结构图

图 6 为重复可变的给定风速信号。模拟自然界条件 30 s 周期的重复性自然风，验证系统对于功率追踪和功率平滑的多目标控制效果。

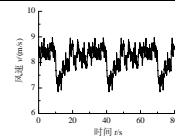


图6 重复可变的给定风速信号

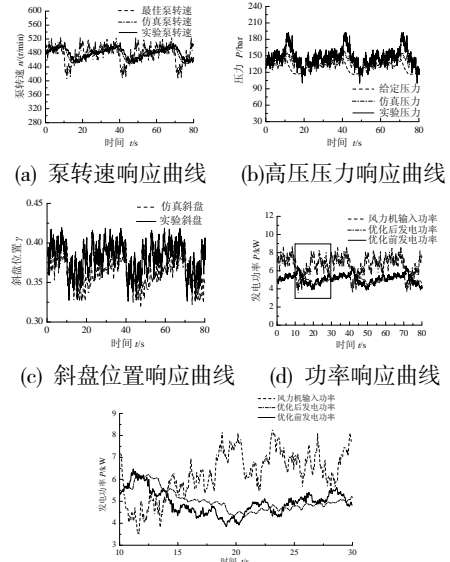


图7 重复可变风速下系统各状态响应曲线

如图 7(a)所示，在给定周期重复的自然风速下，泵转速响应和输入风速完全一致，图 7(b)压力曲线有所滞后 (1MPa=10bar)，因为系统压力特性，压力响应需要一个过程，属正常现象。图 7(c)斜盘响应曲线跟随风速变化而不断调整，其响应速度能够满足系统要求。图 7(d)风力机输入功率波动且与给定风速的变化趋势保持一致。利用本文所构建的功率追踪及功率平滑多目标控制器进行控制时，响应曲线如图中优化后功率曲线。采用传统 PID 算法进行控制时，响应曲线如图中优化前功率曲线，从图 7(e)中可以明显看出本文中所设计的控制器功率输出曲线比传统 PID 控制的功率曲线波动小，相对平滑，有效地提高了电能质量。

5 结语

本文针对低风速条件下电能质量优化问题进行了深入探究。通过建立数学模型，针对多目标控制优化的最优控制策略进行了仿真研究，提出了基于多目标控制的最优控制功率平滑控制优化策略，旨在优化功率输出，提升电能质量。通过仿真和实验验证，该策略的有效性得到了充分证实，为实际应用提供了有力支持。本研究成果对于提升低风速条件下功率平滑控制能力具有重要意义，有助于推动相关领域的技术进步和应用发展。

参考文献：

- [1]廖勇,何金波,姚骏,等.基于变桨距和转矩动态控制的直驱永磁同步风力发电机功率平滑控制[J].中国电机工程学报,2009,29(18):39-44.
- [2]胡雪松.直驱永磁同步风力发电系统功率平滑策略的研究与控制系统设计[D].重庆:重庆大学,2010.
- [3]艾超,闫桂山,孔祥东,等.液压力型风力发电机组恒转速输出补偿控制[J].中国机械工程,2015,26(9):1189-1193.
- [4]张寅.液压力型风力发电机组功率平滑控制研究[D].秦皇岛:燕山大学,2016.

基金项目：2024 年度河北省高等学校科学研究项目“液压力型风力发电机电能质量优化控制研究”(zc2024167)。

作者简介：张寅(1979—)，男，副教授，工学博士，研究方向为流体传动及控制、电液伺服系统。

通讯作者：姬莉(1984—)，女，副教授，研究方向为机电工程、智能制造。