

DOI:10.3969/j.issn.1001-4551.2014.09.006

液压型风力发电机组低电压穿越过程 主传动系统瞬态特性研究^{*}

艾 超^{1,2}, 孔祥东^{*1,2}, 闫桂山³, 华玉兰⁴, 宋 豫³

(1. 燕山大学 河北省重型机械流体动力传输与控制实验室, 河北 秦皇岛 066004;

2. 燕山大学 先进锻压成形技术与科学教育部重点实验室, 河北 秦皇岛 066004;

3. 燕山大学 机械工程学院, 河北 秦皇岛 066004;

4. 沈阳新松机器人自动化股份有限公司, 辽宁 沈阳 110000)

摘要:针对液压型风力发电机组低电压穿越过程存在的问题, 对该过程机组主传动系统瞬态特性展开了研究。建立了液压主传动系统瞬态模型, 并通过 AMESim 与 Matlab/Simulink 仿真技术搭建了联合仿真平台。仿真分析了不同工况和管道长度对主传动系统瞬态特性的影响规律。研究结果表明, 提升泵转速有利于系统快速响应, 缩短管道长度有利于发电功率快速调整。研究工作为开展低电压穿越控制、主传动系统液压管路优化等提供理论依据和先进的技术手段。

关键词: 液压型风力发电机组; 主传动系统; 瞬态特性; 低电压穿越

中图分类号: TH137; TM614

文献标志码: A

文章编号: 1001-4551(2014)09-1127-05

Transient characteristics for main transmission in hydraulic wind turbine during LVRT

AI Chao^{1,2}, KONG Xiang-dong^{1,2}, YAN Gui-shan³, HUA Yu-lan⁴, SONG Yu³

(1. Hebei Provincial Key Laboratory of Heavy Machinery Fluid Power Transmission and Control, Yanshan University, Qinhuangdao 066004, China; 2. Key Laboratory of Advanced Forging & Stamping Technology and Science (Yanshan University), Ministry of Education of China, Qinhuangdao 066004, China;

3. School of Mechanical Engineering, Yanshan University, Qinhuangdao 066004, China;

4. New Song Robot & Automation Company of Shenyang, Shenyang 110000, China)

Abstract: In order to solve the problems of hydraulic wind turbine at low voltage ride through (LVRT), the research on transient characteristics in the main transmission during LVRT was launched. Transient model of the hydraulic main transmission was established, and co-simulation platform was built based on AMESim and Matlab/Simulink simulation technology. Effects of different conditions and pipeline length on the laws of the transient characteristics in the main transmission were analysed in a simulation study. Simulation results show that enhancing the pump speed is conducive to rapid response of the system, and shortening the length of the pipeline is conducive to rapid adjustment of the power generation. Research work provides a theoretical basis and advanced technology for the control of LVRT and optimizing hydraulic lines in the main transmission system.

Key words: hydraulic wind turbine; main transmission; transient characteristics; low voltage ride through (LVRT)

收稿日期: 2014-05-04

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (51375422); 国家重点基础研究发展计划资助项目 (2014CB046405); 河北省自然科学基金资助项目 (QN20132017); 秦皇岛市科学技术研究与发展计划资助项目 (201302A020); 燕山大学青年教师自主研究计划课题资助项目 (13LGB005)。

作者简介: 艾 超 (1982-), 男, 河北唐山人, 博士, 讲师, 主要从事液压型风力发电机组方面的研究。E-mail: aichao@ysu.edu.cn

通信联系人: 孔祥东, 男, 教授, 博士生导师。E-mail: xdkong@ysu.edu.cn

0 引 言

液压型风力发电机组^[1-3] (以下简称液压型机组) 采用定量泵-变量马达柔性传动, 配合励磁同步发电机, 有效地提高了发电质量, 降低了机舱重量, 降低了对电网的冲击。

液压型机组主传动系统原理为: 风力机驱动定量泵输出高压油, 传动部分采用定量泵-变量马达闭式液压系统, 变量马达与励磁同步发电机刚性连接。系统通过控制变量马达的摆角实现发电机转速的实时调整, 从而控制发电机工作于同步转速实现并网发电^[4-5]。

其中, 低电压穿越是风电机组的一项关键技术, 也是现代风力发电机组正常运行的要求, 指风电场并网由于电网故障或扰动造成电压跌落时, 风电机组能够保持并网, 并通过向电网提供一定的无功功率支撑电网恢复, 最终“穿越”整个低电压时间(区域)^[6-8]。

与传统风力发电机组一样, 液压型风力发电机组需要具备低电压穿越能力。液压型机组在低电压穿越过程中, 为保证发电机稳定工作于工频转速保持并网, 液压主传动系统需要对其功率、压力等瞬态特性进行快速调整。因此, 液压主传动系统瞬态特性在低电压穿越过程具有重要作用。

国内外学者^[9-11] 对液压系统瞬态特性开展了一些研究, 但针对低电压穿越过程中液压主传动系统瞬态特性研究的文献鲜见, 未形成成熟的研究体系。因此, 有必要对液压型机组低电压穿越过程主传动系统瞬态特性展开研究。

本研究针对液压型机组低电压穿越过程, 重点研究其主传动系统瞬态特性。

1 液压型机组液压主传动系统瞬态模型及分析

液压型机组主传动系统由定量泵-变量马达闭式容积回路组成, 其原理如图 1 所示。

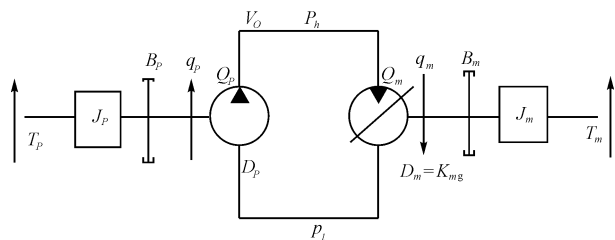


图 1 定量泵-变量马达闭式回路原理图

液压型机组在低电压穿越过程中, 为保证发电机稳定工作于工频转速保持并网, 液压主传动系统需要

对其功率、压力等瞬态特性进行快速调整。因此本研究建立液压主传动系统定量泵-变量马达数学模型^[12], 得出液压主传动系统瞬态特性。

定量泵转速瞬态传递函数为:

$$\theta_p = \frac{\frac{K_{m0}\gamma}{D_p} + \frac{D_{m0}s\theta_m}{D_p} + \frac{C_t}{D_p^2} \left(1 + \frac{V_0}{\beta_e C_t} s\right) T_p}{s \left[\frac{J_p V_0}{\beta_e D_p^2} s^2 + \left(\frac{J_p C_t}{D_p^2} + \frac{B_p V_0}{\beta_e D_p^2} \right) s + 1 \right]} \quad (1)$$

式中: θ_p —定量泵转速, rad/s; D_p —定量泵的输出排量, m^3/r ; γ —变量马达斜盘倾角与其最大倾角比值, γ_0 — γ 的初始值; D_{m0} —变量马达的最大排量, m^3/rad ; K_m —变量马达排量梯度, m^3/rad ; K_{m0} — K_m 初始值; θ_m —变量马达转速, rad/s; θ_{m0} — θ_m 的初始值; C_t —总泄漏系数, $\text{m}^3/(\text{s} \cdot \text{Pa})$; V_0 —单个腔室的总容积, m^3 ; β_e —有效体积弹性模量, Pa; J_p —定量泵和负载的总惯量, $\text{kg} \cdot \text{m}^2$; B_p —泵侧粘性阻尼系数, $\text{N}/(\text{m}/\text{s})$; T_p —定量泵的驱动力矩, N/m 。

变量马达转速瞬态传递函数为:

$$\theta_m = \frac{\left(-\frac{\theta_{m0}}{\gamma_0} + \frac{p_{h0} \left(C_t + \frac{V_0}{\beta_e} s \right)}{K_m \gamma_0^2} \right) \gamma + \frac{Q_p}{K_m \gamma_0} - \frac{C_t}{K_m \gamma_0^2} \left(1 + \frac{V_0}{\beta_e C_t} s \right) T_m}{s \left[\frac{J_m V_0}{\beta_e K_m^2 \gamma_0^2} s^2 + \left(\frac{J_m C_t}{K_m^2 \gamma_0^2} + \frac{B_m V_0}{\beta_e K_m^2 \gamma_0^2} \right) s + 1 \right]} \quad (2)$$

式中: Q_p —定量泵的输出流量, m^3/rad ; T_m —变量马达轴上的外负载力矩, N/m 。

变量马达输出功率传递函数为:

$$\frac{P}{\gamma} = K_m \theta_{m0} \left(p_{h0} - \frac{K_m \theta_{m0} / C_t}{1 + \frac{V_0}{\beta_e C_t} s} \gamma_0 \right) \quad (3)$$

式中: p_h —高压管路压力 (Pa); p_{h0} — p_h 初始值; P —变量马达输出功率 (W)。

当电网电压跌落时, 为实现低电压穿越, 液压型机组通常采用直接控制变量马达摆角的方法, 通过增大变量马达排量, 调整系统瞬态压力 p_h , 使变量马达输出功率 P 迅速降低, 从而使定量泵转速 θ_p 提高, 将多余的能量储存到风力机中。最终系统通过控制变量马达转速使发电机稳定工作于工频转速保持并网, 实现低电压穿越。

2 液压型机组主传动系统瞬态特性仿真研究

本研究以燕山大学 30 kVA 液压型机组实验系统为基础, 依据液压型机组低电压穿越控制原理, 搭建系统仿真平台。笔者采用 AMESim 软件搭建主传动系统瞬态特性仿真模块, 利用 Matlab/Simulink 软件搭建风

速与风轮特性模块、低电压穿越控制器模块、电力系统模块,并利用接口技术实现两个软件的联合仿真。仿真平台如图2~3所示,仿真参数设定如表1~3所示。

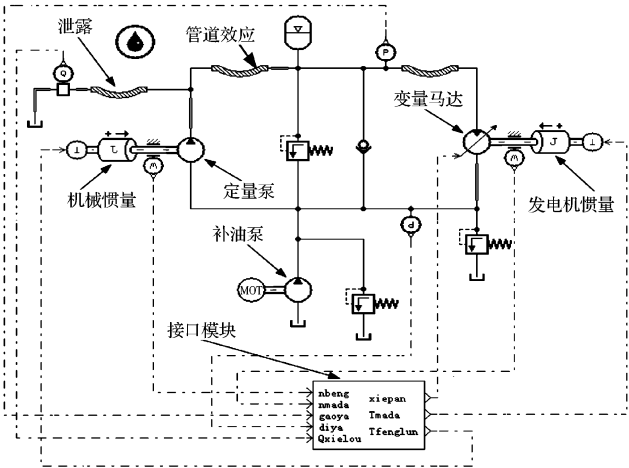


图2 液压主系统瞬态特性仿真模块

表1 Simulink 参数设定

序号	参数名称	设定值
1	停止时间	60 s
2	求解器	ode23tb
3	最小步长	自动
4	最大步长	自动
5	相对容限	10^{-5}
6	绝对容限	10^{-5}
7	数据交换时间	0.001 s

表2 AMESim 参数设定

序号	参数名称	设定值
1	仿真模式	动态
2	终止时间	60 s
3	通信间隔	0.001 s
4	容限	10^{-5}
5	圆盘式积分仪	标准
6	求解器类型	常规
7	差错类型	混合

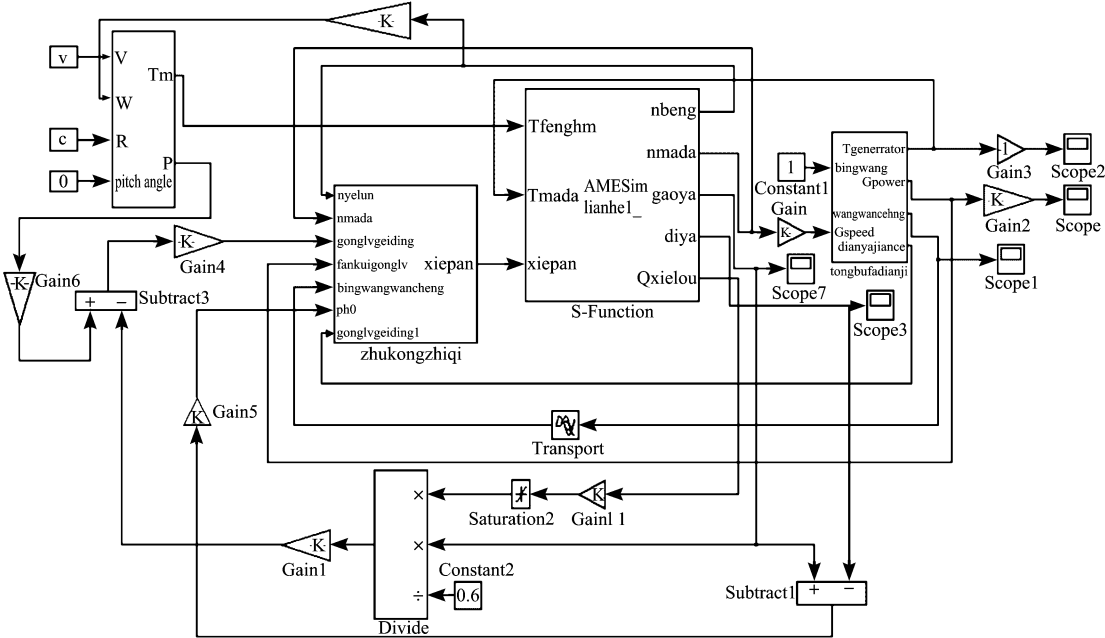


图3 液压型机组低电压穿越仿真平台

表3 液压系统参数表

序号	参数名称	参数数值	单位
1	风力机转动惯量	400	$\text{kg} \cdot \text{m}^2$
2	定量泵排量	63	ml/r
3	变量马达最大排量	40	ml/r
4	系统低压管路溢流压力	1.2	MPa
5	系统高压管路溢流压力	35	MPa
6	系统补油压力	0.5	MPa
7	补油流量	7	L/min
8	定量泵转速输入范围	100 ~ 1 000	$\text{r} \cdot \text{min}^{-1}$
9	变量马达恒转速输出值	1 500	$\text{r} \cdot \text{min}^{-1}$
10	发电机负载转动惯量	0.45	$\text{kg} \cdot \text{m}^2$

2.1 运行工况对主传动系统瞬态特性影响

本研究模拟风力机典型工况,分别设置定量泵转速为400 r/min和600 r/min,研究主传动系统瞬态特性,仿真结果如图4所示。

由图4仿真结果可知,随着定量泵转速增加,变量马达摆角增大、转速波动增大,系统瞬态压力增高。此外,定量泵转速分别设定为400 r/min和600 r/min时,在变量马达摆角调整1 s后,对应发电功率下降幅度分别为12%和16%。可知,在不同工况下,变量马达摆角初始值设定和发电功率响应的快速性不同,变量

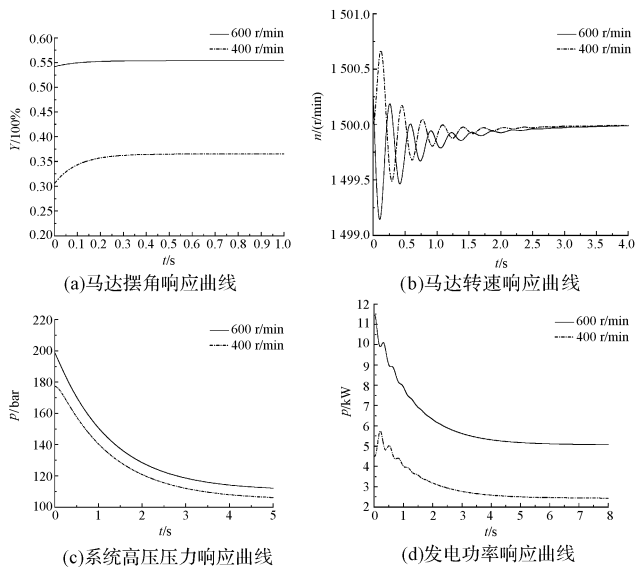


图 4 不同工况下主传动系统瞬态特性仿真结果

马达摆角初始值越大,对应发电功率瞬态响应越快。

由上述仿真结果分析可知,在低电压穿越过程中,本研究根据不同的电压跌落深度,通过调节系统压力,实现了定量泵液压负载转矩的控制,最终调整定量泵至最佳转速。

2.2 管道长度对主传动系统瞬态特性影响

笔者通过仿真分析管道长度对主传动系统瞬态特性的影响规律,缩短主传动系统液压管路长度,即减少液压管路初始容积。设定定量泵转速为 900 r/min 时,仿真结果如图 5 所示。

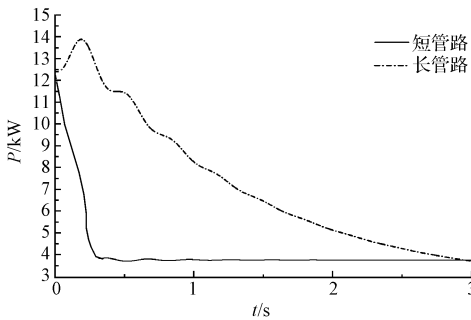


图 5 不同管道长度主传动系统瞬态特性仿真结果

由图 5 所示的仿真结果可知,缩短液压管路长度、减小液压管路初始容积,有利于发电功率的瞬态响应速度的提高,但是变量马达在摆角快速调整瞬时,其转速会波动增大(转速波动是在电力系统允许范围内的)。因此,在主传动系统定量泵-变量马达闭环回路中,缩短管路长度有利于发电功率快速响应。

依据上述分析,本研究对主传动液压系统管路进行优化,分别缩短高、低压管路,优化后对系统频域特性进行分析,仿真结果如图 6 所示。

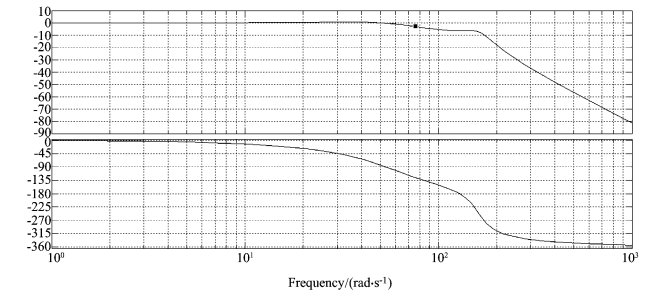


图 6 主传动系统压力特性频域仿真结果

由图 6 所示的仿真结果可知,在幅值为 -3 dB 时,频宽 $\omega_b = 76.2 \text{ rad/s} \approx 12.1 \text{ Hz}$,即缩短液压管路后,系统压力特性响应速度较快,在低电压穿越过程中可迅速调整至设定值。

由上述仿真结果分析可知,为实现低电压穿越,液压型机组在工程推广过程中,在满足机组液压系统安装的前提之下,应该尽量缩短液压管道长度,提高液压型机组的低电压穿越控制能力。

3 结束语

本研究通过数学模型和仿真分析,研究液压型机组低电压穿越过程主传动系统瞬态特性。主要得到以下结论:

- (1)建立了低电压穿越过程液压主传动系统的瞬态模型;
- (2)给出了定量泵转速与主传动系统瞬态响应的作用规律,即提高量泵转速有利于系统的快速响应。为不同运行工况下低电压穿越的控制方法提供了参考依据;
- (3)提出了管道长度对主传动系统发电功率响应的影响规律,即缩短管道长度有利于发电功率的快速调整。为低电压穿越控制中液压系统管路优化奠定了基础。

参考文献 (References):

[1] DIEPEVEEN N F B, SEGEREN M L A. Stretching the applicability of the monopile by using a delft offshore turbine [J]. *Wind Energy*, 2012, 5(3): 1-10.

[2] 李 伟,涂 乐,林勇刚. 风力发电中液压技术的应用研究[J]. *液压与气动*, 2013(3): 1-8.

[3] MORTENSEN K A, HENRIKSEN K H. Efficiency Analysis of a Radial Piston Pump Applied in a 5MW Wind Turbine with Hydraulic Transmission [D]. Denmark: Aalborg University, 2011: 2-3.

[4] 孔祥东,艾 超,王 静. 液压型风力发电机组主传动控

- 制系统综述[J]. 液压与气动, 2013(1):1-7.
- [5] 李金,袁巍. 对转风力机的设计及流场数值模拟[J]. 流体机械, 2013, 41(5):22-28.
- [6] SONG Z F, XIA C L, S T N. Assessing transient response of DFIG based wind turbines during voltage dips regarding main flux saturation and rotor deep-bar effect[J]. **Applied Energy**, 2010, 87(10):3283-3293.
- [7] 国家电网公司. Q/GDW392-2009 风电场接入电网技术规范[S]. 北京:中国电力出版社, 2009.
- [8] ABDEL B O, NASIRI A. A dynamic LVRT solution for doubly fed induction generators[J]. **IEEE Transactions on Power Electronics**, 2010, 25(1):193-196.
- [9] 蒋丹,李松晶,包钢. 伴随气泡和气穴低压管路瞬态的建模与分析[J]. 航空动力学报, 2007, 22(12):2602-2607.
- [10] 李军,陈明,赵怀军. 液压脉冲系统的压力瞬态脉动仿真研究[J]. 机床与液压, 2007, 35(1):122-124.
- [11] GIACOBBO F, MARSEGUERRA M, ZIO E. Solving the inverse problem of parameter estimation by genetic algorithms the case of a groundwater contaminant transport model[J]. **Annals of Nuclear Energy**, 2002, 29(4):967-981.
- [12] 张刚. 液压型风力发电机组主传动系统功率控制研究[D]. 秦皇岛:燕山大学机械工程学院, 2012.
- [编辑:张豪]

《包装与食品机械》

2015 年征订启事

中国科技核心期刊

中国期刊网全文数据库全文收录期刊

万方数据-数字化期刊群全文上网期刊

美国《化学文摘》(CA) 收录期刊

美国《乌利希期刊指南》(UPD) 收录期刊

英国《食品科技文摘》(FSTA) 收录期刊

《包装与食品机械》杂志是中国机械工程学会包装与食品工程分会会刊;中国科技核心期刊;安徽省优秀期刊。

《包装与食品机械》杂志主要报道国内外包装机械与食品机械的设计与制造、包装工艺、包装工艺设备、包装材料及食品加工技术、食品生物技术、微生物发酵工程、食品品质无损检测、食品机械以及食品包装、食品贮藏等方面的最新研究成果以及应用技术。本刊主要栏目有:试验研究、设计计算、专家论坛、产品开发、技术综述、工艺设备、应用技术、检测技术等。

本刊为了提高刊物技术水平,打造精品期刊,对于国家、省、部级基金或其他重点科研项目的研究论文,将予以优先安排发表。本刊所有来稿不收审稿费、版面费。

欢迎投稿,欢迎订阅,欢迎刊登广告!

●双月刊,大16开,每册定价10.00元,全年60.00元。

●邮局订阅(国内邮发代号26-111;国外发行代号BM4791),或直接由本刊邮购(另加邮费2元/本)。

●地址:合肥高新区天湖路29号 邮编:230088

●国内刊号:CN 34-1120/TS 国际刊号:ISSN 1005-1295

●电话:(0551)65335565;65311880 传真:0551-65335818

●http://www.pfm114.com E-mail:bjzz@pfm114.com

本文引用格式:

艾超,孔祥东,闫桂山,等. 液压型风力发电机组低电压穿越过程主传动系统瞬态特性研究[J]. 机电工程, 2014, 31(9):1127-1131.

AI Chao, KONG Xiang-dong, YAN Gui-shan, et al. Transient characteristics for main transmission in hydraulic wind turbine during LVRT[J]. Journal of Mechanical & Electrical Engineering, 2014, 31(9):1127-1131.

《机电工程》杂志: <http://www.meem.com.cn>