

变速抽水蓄能用双馈发电电动机的 无功 V 形曲线研究

孙士涛, 雷雨, 张杰, 宋鹏

(华北电力科学研究院有限责任公司, 北京 100045)

摘要: 变速抽水蓄能用双馈发电电动机在维持有功功率输出的同时, 可充分利用其功率裕量, 成为稳定无功源, 灵活参与系统调压调相。为研究双馈发电电动机的无功特性, 在分析双馈发电电动机电气量关系的基础上, 建立基于转子电流-定子电流的双馈发电电动机 V 形曲线, 可简单直观地反映变速抽水蓄能用双馈发电电动机无功特性。研究了不同工况下双馈发电电动机 V 形曲线的变化规律。最后, 基于 RTLAB 平台进行硬件在环测试, 测试结果表明双馈式变速抽水蓄能机组具备类似同步电机的无功特性, 同时也证明了所提分析方法的正确性和有效性。

关键词: 变速抽水蓄能; 双馈发电电动机; 无功特性; V 形曲线

中图分类号: TM343 **文献标志码:** A **文章编号:** 1673-6540(2022)08-0066-07

doi: 10.12177/emca.2022.075

Research on Reactive Power V-Curve of Doubly-Fed Generator Motor for Variable Speed Pumped Storage

SUN Shitao, LEI Yu, ZHANG Jie, SONG Peng

(North China Electric Power Research Institute Co., Ltd., Beijing 100045, China)

Abstract: The doubly-fed generator motor for variable speed pumped storage can maintain the active power output and then make full use of the power margin to become a stable reactive power source, so that it can flexibly participate in system voltage and phase regulation. In order to study the reactive power characteristics of the doubly-fed generator motor, based on the analysis of the relationship among the electrical quantities of doubly-fed generator motor, the V-curve of the doubly-fed generator motor for variable speed pumped storage is established on the basis of the stator current-rotor current, which can simply reflect the reactive power characteristics of the doubly-fed generator motor. Then, the variation law of V-curve of doubly-fed generator motor under different working conditions is studied. Finally, the hardware-in-loop test based on RTLAB platform shows that the doubly-fed variable speed pumped storage unit has the reactive power characteristics similar to synchronous motors, and also proves the correctness and effectiveness of the proposed analysis method.

Key words: variable speed pumped storage; doubly-fed generator motor; reactive power characteristics; V-curve

0 引言

随着风、光等新能源接入电网的规模持续扩大, 电力系统功率波动特征凸显, 给系统功率平衡

带来巨大挑战, 而抽水蓄能机组作为调频、调峰设备, 对电力系统平衡起到了重要的作用^[1-2]。与定速抽水蓄能机组相比较, 变速抽水蓄能机组可改善水轮机水力性能, 实现功率的快速调节^[3-4],

收稿日期: 2022-05-25; 收到修改稿日期: 2022-06-28

作者简介: 孙士涛(1989—), 男, 硕士, 高级工程师, 研究方向为电机运行与诊断。

在诸多抽水蓄能电站得到了建设和应用。

变速抽水蓄能机组主要有两种^[5-6]:一种是基于全功率变流器的变速机组,采用电励磁同步电机、鼠笼电机等作为发电电动机,并通过全功率变流器与电网相连接;另一种是基于部分功率变流器的变速机组,采用双馈发电电动机,其定子与电网直接相连,而其转子则通过变流器与电网相连接。双馈发电电动机由于其变流器容量小、成本低等优势,在变速抽水蓄能机组中得到了广泛应用。需要指出,由于双馈发电电动机采用全控器件作为励磁变流器,在保证有功功率输出的前提下,也可利用其功率裕量输出无功电流,使其作为无功电源,灵活参与系统调压调相。

文献[7-8]建立了完整的水-机-电联合的定速与双馈式变速抽水蓄能机组模型,探讨了功率调节过程中的系统动态响应特性,并指出,双馈发电电动机可通过调节转子电流实现定子功率快速调节,而定速机组则需要依靠导叶开度变化进行调节,用时相对较长。文献[9-10]以双馈发电电动机为对象,探究了其起动、建压和并网各阶段的励磁控制策略,在目标受控功率变化时通过对双馈发电电动机转子有功电流的有效控制,可完成对目标功率的快速跟踪,从而快速响应系统功率目标。文献[11-12]以双馈发电电动机为对象,研究了机侧、网侧变流器的无功调节机制及其优先级。文献[13]研究了有功功率和转差率对双馈发电电动机无功特性的影响。文献[14]基于无功平衡方程,给出了不同工况下双馈发电电动机定、转子无功功率折算关系以及二者间的相互作用规律。上述研究说明了双馈发电电动机具备灵活强大的无功调节能力,但在保证有功功率平衡的条件下如何表征双馈发电电动机无功功率特性还有待深入研究。

因此,本文针对变速抽水蓄能机组用双馈发电电动机,构建双馈发电电动机转子电流-定子电流的无功 V 形曲线,以直观反映双馈发电电动机的无功功率特性。本文首先根据双馈发电电动机的等效电路,分析不同运行工况下双馈发电电动机电气量的相量关系,明确定、转子电流幅值间的规律,并基于此,探究了双馈发电电动机无功功率特性的影响因素,构建双馈发电电动机的 V 形曲线,最后利用 RTLAB 硬件在环测试平台,对本

文理论分析进行了验证。

1 数学模型

如图 1 所示,双馈式变速抽水蓄能机组中双馈发电电动机与水泵水轮机相连,实现机械转矩的传动;双馈发电电动机定子绕组通过换相开关与电网相接,通过换相开关调节定子侧电压相序,以维持机组转差处于合理范围内;双馈发电电动机转子绕组通过 AC-DC-AC 背靠背变流器与电网相连,并通过对其转子励磁电压幅值和相位的调控,完成双馈发电电动机的交流励磁控制。

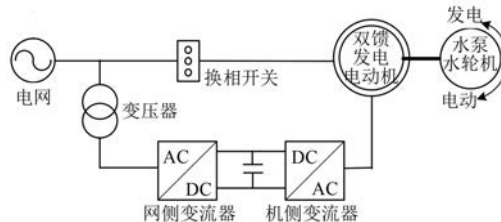


图 1 双馈式变速抽水蓄能机组的结构示意图

在有功功率调节方面,双馈发电电动机通过对其励磁电压相位的调节,实现机械转矩和电磁转矩的平衡,使机械功率通过定子绕组和转子绕组分别馈送至电网。在无功功率调节方面,通过机侧变流器调节转子励磁电压和网侧输出电压幅值,可实现对双馈发电电动机定子侧、网侧无功功率的按需调控。然而,由于双馈发电电动机变流器容量相对较小,为双馈发电电动机容量的 10% 左右,一般网侧变流器按单位功率因数运行。因此,本文着重分析双馈发电电动机定子侧无功功率特性,其输出无功功率通过机侧变流器调节与控制实现。

图 2 给出了双馈发电电动机的等效电路,其中定、转子电流正方向指向双馈发电电动机内部,图中所示电气量已折算至双馈发电电动机定子侧。

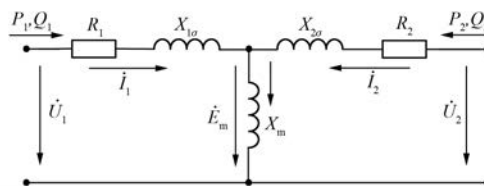


图 2 双馈发电电动机等效电路图

如图 2 所示, P_1 、 Q_1 、 P_2 、 Q_2 分别是双馈发电

电动机的定子侧有功功率、无功功率和转子侧有功功率、无功功率,其中 $P_1 > 0$ 和 $Q_1 > 0$ 表示定子输入有功功率和感性无功功率; $P_2 > 0$ 和 $Q_2 > 0$ 表示转子输入有功功率和感性无功功率。根据图2,双馈发电电动机定、转子电压和电流关系可表示为

$$\begin{cases} \dot{E}_m = \dot{I}_m \cdot jX_m \\ \dot{U}_1 = \dot{E}_m + \dot{I}_1(R_1 + jX_{1\sigma}) \\ \dot{U}_2 = \dot{E}_m + \dot{I}_2(R_2 + jX_{2\sigma}) \\ \dot{I}_m = \dot{I}_1 + \dot{I}_2 \end{cases} \quad (1)$$

式中: $\dot{U}_1$ 、 $\dot{U}_2$ 分别为双馈发电电动机定、转子电压相量; $\dot{E}_m$ 为感应电动势相量; $\dot{I}_1$ 、 $\dot{I}_2$ 、 $\dot{I}_m$ 分别为双馈发电电动机定、转子电流和励磁电流相量; R_1 、 R_2 、 $X_{1\sigma}$ 、 $X_{2\sigma}$ 分别为双馈发电电动机定、转子电阻和漏感抗; X_m 为励磁电抗。

根据式(1),双馈发电电动机定子输入有功功率、无功功率可表示为

$$\begin{cases} P_1 = \text{Re}(1.5\dot{U}_1\dot{I}_1^*) = 1.5U_1I_{1r} \\ Q_1 = \text{Im}(1.5\dot{U}_1\dot{I}_1^*) = 1.5U_1I_{1i} \end{cases} \quad (2)$$

式中: Re 、 Im 分别为相量的实部和虚部; U_1 为定子相电压幅值; I_1 、 I_{1r} 、 I_{1i} 分别为定子电流及有功功率、无功功率分量幅值;上标*表示共轭。

将式(2)代入式(1),双馈发电电动机的感应电动势相量和转子电流相量可表示为

$$\begin{cases} \dot{E}_m = (X_{1\sigma}I_{1i} - R_1I_{1r} + U_1) - j(X_{1\sigma}I_{1r} + R_1I_{1i}) \\ \dot{I}_2 = -\frac{1}{X_m}(X_1I_{1r} + R_1I_{1i}) - j\frac{1}{X_m}(X_1I_{1i} - R_1I_{1r} + U_1) \end{cases} \quad (3)$$

式中: $X_1 = X_{1\sigma} + X_m$,为双馈发电电动机定子电抗。

根据式(2)和式(3),以双馈发电电动机定子电压和有功功率、无功功率作为自变量,则其转子电流幅值可改写为

$$I_{2m} = \frac{\sqrt{(R_1^2 + X_1^2)(P_1^2 + Q_1^2) - 6U_1^2(R_1P_1 - X_1Q_1) + 9U_1^4}}{3X_mU_1} \quad (4)$$

通常,大容量双馈发电电动机的定子电阻要远小于其电抗,因此可忽略双馈发电电动机定子

电阻的影响,则其定、转子电流幅值可表示为

$$\begin{cases} I_{1m} = \frac{\sqrt{P_1^2 + Q_1^2}}{3U_1} \\ I_{2m} = \frac{1}{X_m} \sqrt{U_1^2 + \frac{P_1^2 + Q_1^2}{9U_1^2}X_1^2 + \frac{2}{3}Q_1X_1} \end{cases} \quad (5)$$

由于有功功率以二次项形式存在,式(5)所给出的双馈发电电动机定、转子电流幅值,与双馈发电电动机所处发电模式、电动模式无关,同时也与电机转差角频率无关。因此式(5)所给出的双馈发电电动机定、转子电流幅值,适用于发电、电动两种工况,并且与电机转差无关。对于双馈发电电动机而言,在机端电压不变的情况下,其定子电流幅值完全由其定子视在功率大小决定,有功功率、无功功率的等量变化对定子电流影响相同,而转子电流幅值不仅与定子视在功率有关,还与电机参数有关,同时由于存在无功功率的一次项,无功功率对转子电流的影响会比有功功率更明显。因此,根据式(5),双馈发电电动机可吸收、输出的最大无功功率可表示为

$$\begin{cases} Q_{1,\text{input}} = \frac{3U_1^2}{X_1} + \sqrt{\frac{4.5U_1^2X_m^2I_{2m}^2}{X_1^2} - P_1^2} \\ Q_{1,\text{output}} = \frac{3U_1^2}{X_1} - \sqrt{\frac{4.5U_1^2X_m^2I_{2m}^2}{X_1^2} - P_1^2} \end{cases} \quad (6)$$

式中: $Q_{1,\text{input}}$ 为双馈发电电动机可吸收的最大无功功率,对外呈现感性; $Q_{1,\text{output}}$ 为双馈发电电动机可输出的最大无功功率,对外呈现容性。

可见,双馈发电电动机无功功率由两部分组成。第一部分由定子电压、电抗决定,与双馈发电电动机有功功率无关,这部分无功功率主要用于建立双馈发电电动机励磁磁场;第二部分由机侧变流器提供,并与双馈发电电动机有功功率有关,主要由机侧变流器最大允许电流决定,并受机侧变流器控制。

2 无功功率特性

根据上述分析可知,双馈发电电动机的定子无功功率特性不仅与受控有功功率目标有关,还与定子电压、机侧变流器最大允许电流有关。同时,当考虑双馈发电电动机非线性特征时,式(5)与式(6)所给出的双馈发电电动机定、转子电流

幅值将与定子电抗 X_1 、励磁电抗 X_m 有关。本文重点关注双馈发电电动机的无功功率特性影响因素,采用表 1 所示的双馈发电电动机典型参数进行分析研究。图 3 给出单位功率因数下双馈发电电动机定、转子电流-有功功率的关系图。

表 1 双馈发电电动机参数

参数名称	参数值	参数名称	参数值
额定容量/MVA	300	额定电压/kV	15.75
$R_1/\text{p.u.}$	0.000 951	$X_{1\sigma}/\text{p.u.}$	0.056 4
$R_2/\text{p.u.}$	0.000 600	$X_{2\sigma}/\text{p.u.}$	0.077 7
$X_m/\text{p.u.}$	4.948	定/转子变比	0.24

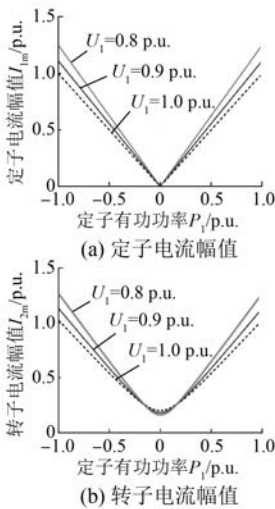


图 3 双馈发电电动机定、转子电流与有功功率关系

由图 3 可见,双馈发电电动机发电模式与电动模式下,其定、转子电流幅值呈现对称、单调递增特性。以电动模式为例,随着双馈发电电动机有功功率的增加,其定子电流呈现线性单调递增特性,并且在同样有功功率出力下,定子电流幅值随着电压的升高而降低;然而,对于转子电流而言,在双馈发电电动机小出力、机端电压较高的条件下,转子电流幅值较大,这主要是由于在小出力时,双馈发电电动机转子电流以转子励磁电流为主,该励磁电流以建立定子旋转磁场并形成与机端电压相匹配的感应电动势为目标。然而,由于在大出力下转子转矩分量为主,随着双馈发电电动机有功功率出力的不断提升,转子电流幅值单调递增,并且机端电压较低的双馈发电电动机转子电流幅值较大。

图 4 给出了双馈发电电动机定、转子电流-无功功率的关系图,其中,双馈发电电动机的有功功率输出为 0。可见,双馈发电电动机的定子电流幅值特性与图 3(a)相似,其幅值随着无功功率出力的增加而增加,并且在电压较低条件下定子电流幅值较大。然而,由于部分无功功率用于建立定子旋转磁场,双馈发电电动机转子电流不再呈现对称特性。在过励时双馈发电电动机转子电流随着无功功率出力增加而增加,但在欠励时,双馈发电电动机转子电流呈现先减少再增加的特征,这主要是由于定子侧部分感性无功功率被定子电抗消耗,用于建立定子旋转磁场,而传递到转子侧的无功功率降低,进而导致转子电流幅值较小。

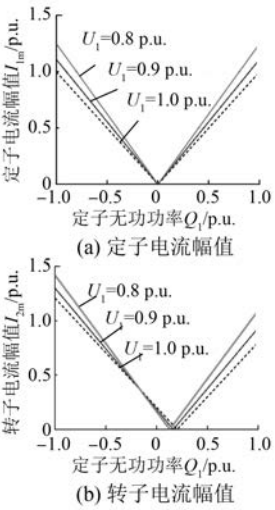


图 4 双馈发电电动机定、转子电流与无功功率关系

根据上述分析,图 5 给出双馈发电电动机定子有功功率与无功功率的关系。在双馈发电电动机转子绕组不提供无功功率时,由于双馈发电电动机需要吸收无功功率以建立定子旋转磁场,双馈发电电动机可吸收的最大无功功率要超出其可发出的最大无功功率。同时,双馈发电电动机可用功率裕量也将随着有功功率的增加、机端电压

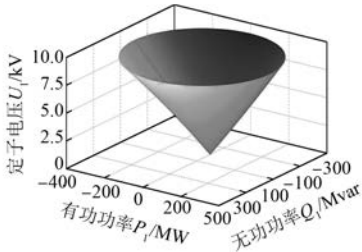


图 5 双馈发电电动机定子有功功率与无功功率关系图

的降低而减小,进而降低无功输出能力。

3 V形曲线

为进一步分析双馈发电电动机励磁变流器对机端无功功率出力的影响特性,本节参照同步电机无功功率特性分析方法,以式(3)和式(4)表示的双馈发电电动机定、转子电流幅值为基础,可得双馈发电电动机无功V形曲线,如图6所示。

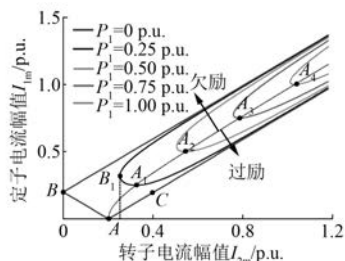


图6 双馈发电电动机的无功V形曲线

由图6可见,双馈发电电动机由于有功功率、无功功率解耦控制特性,在发电和电动状态下无功调节特性基本一致。当双馈发电电动机运行在A点处时,定子侧为单位功率因数,此时双馈发电电动机定子电流存在极小值;当运行点由A点向左或向右移动时,定子侧功率因数小于1.0,定子电流均增加;当向B点移动时,双馈发电电动机进入过励运行区间,转子电流增加,而向C点移动时,双馈发电电动机进入欠励区间,转子电流减小,在达到C点时转子励磁电流分量为0,仅包含转子转矩电流分量,则此时双馈发电电动机转子电流达到最小值。

双馈发电电动机的有功功率增加会使V形曲线纵向移动,同时定子电流变化幅度即曲线开口大小也随之减小。由于有功功率出力增加,双馈发电电动机单位功率因数曲线向右侧倾斜,并贴近过励曲线。相同的转子电流在转子侧产生相同的无功功率,但在过励状态下部分无功功率用于建立定子旋转磁场,而导致其定子侧输出无功功率较小,过/欠励分界线更贴近过励曲线。在相同的转子电流幅值下,处于过励状态下的双馈发电电动机定子电流幅值较大,而处于欠励状态下双馈发电电动机定子电流幅值较小。这主要是由于双馈发电电动机需吸收一定的感性无功功率用于建立定子旋转磁场,也就是说在转子励磁电流

分量为0时,双馈发电电动机从电网吸收无功功率。

4 硬件在环测试

为验证本文对双馈发电电动机无功功率特性分析的正确性,并明确其无功功率动态调节过程,在RTLAB OP5700与NI PXIe 1071构成的平台上进行硬件在环测试,系统参数如表1所示。图1所示的主电路在RTLAB中运行,双馈发电电动机采用Specialized Power Systems中绕线式异步电机模型;双馈发电电动机的控制部分在NI PXIe 1071中运行,输出控制变流器的脉冲信号,如图7所示。

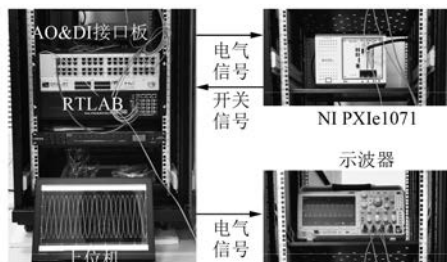


图7 硬件在环测试平台

图8给出了双馈发电电动机空载时无功功率调节的硬件在环测试结果。其中,双馈发电电动机的有功功率设定为0,机侧变流器最大允许电流为额定电流的1.2倍,即4.5 kA。在测试中,双馈发电电动机由过励状态逐步进入欠励状态。由图8可见,在过励状态下,随着双馈发电电动机转子电流的减小,双馈发电电动机定子无功功率由

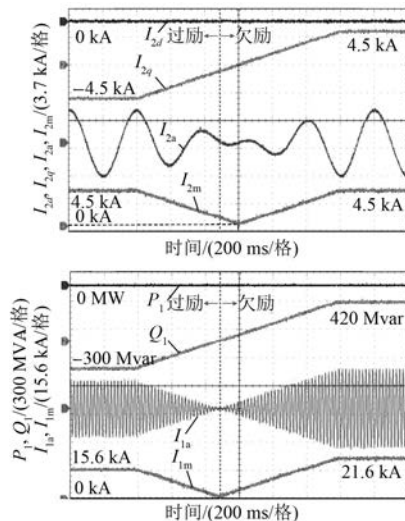


图8 空载时双馈发电电动机无功功率调节特性

300 Mvar(容性)逐渐减小到0,同时其定子电流从15.6 kA降至0,双馈发电电动机处于单位功率因数时,即过/欠励分界点时,转子电流不为0,这主要是需要转子绕组提供建立定子旋转磁场所需的无功电流。随后进入过励状态,双馈发电电动机转子电流继续减小,而定子电流增加,当转子电流达到最小值时,双馈发电电动机定子电流不为0,此时定子功率约为60 Mvar(感性),这主要是因为机侧变流器无法提供建立定子旋转磁场所需的无功功率,需要从电网吸收无功功率。随后定子电流将同时增加,当转子电流达到其最大允许电流4.5 kA时,定子无功功率为420 Mvar(感性),同时定子电流也将随之增加到21.6 kA,大于过励状态下双馈发电电动机定子电流最大值,这主要因为建立双馈发电电动机励磁磁场需要吸收一定量的无功功率。

图9给出了双馈发电电动机在半载时无功调节的硬件在环测试结果。测试中,由于双馈发电电动机在发电模式与电动模式下无功特性相似,本节以发电模式为场景进行验证,即双馈发电电动机的有功功率出力为150 MW(发电模式)。在这种工况下,转子转矩电流为1.9 kA,在保证转子最大允许电流4.5 kA不变的前提下,双馈发电电动机转子励磁电流最大允许值为4.1 kA。在过励状态下,双馈发电电动机输出无功功率为260 Mvar,定子电流达到16.0 kA;而在欠励状态下,双馈发电电动机吸收无功功率为380 Mvar,定子电流为21.3 kA。在过/欠励分界处,双馈发电

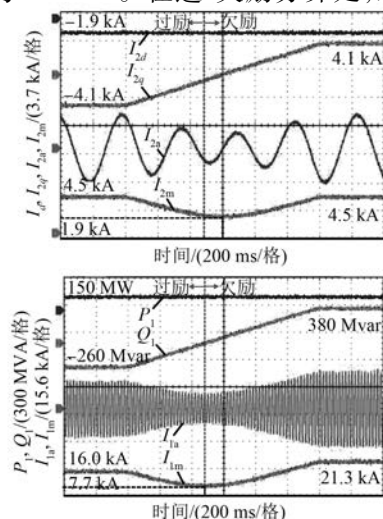


图9 半载时双馈发电电动机无功功率调节特性

电动机定子电流达到其极小值7.7 kA,而后进入欠励状态,转子电流继续下降,当转子励磁电流降为0时,转子电流达到其极小值1.9 kA。

图10给出了双馈发电电动机的V形曲线。由图10可见,模型给出的V形曲线与实测V形曲线存在较好的契合度,各运行点误差不超过5%,验证了双馈发电电动机无功功率特性理论模型的有效性。

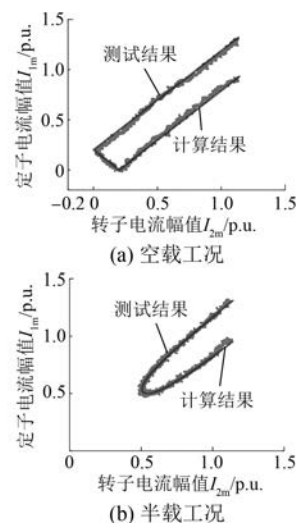


图10 双馈发电电动机的V形曲线

5 结 语

本文研究了变速抽水蓄能用双馈发电电动机的无功V形曲线,得到以下结论:(1)双馈发电电动机定子无功功率由建立定子旋转磁场所需的无功功率、机侧变流器提供的无功功率两部分组成;(2)双馈发电电动机需要消耗部分无功功率以建立其定子旋转磁场,因此定、转子电流极小值所处工作点不同;(3)双馈发电电动机有功功率出力会使V形曲线纵向移动,同时其定子电流变化幅度即曲线开口大小也随之减小。通过构造双馈发电电动机基于转子电流-定子电流的V形曲线,可直接刻画双馈发电电动机的无功特性,简单直观。

【参考文献】

- [1] KOUGIAS I, AGGIDIS G, AVELLAN F, et al. Analysis of emerging technologies in the hydropower sector [J]. Renewable and Sustainable Energy

- Reviews, 2019, 113: 109257.
- [2] YANG W, YANG J. Advantage of variable-speed pumped storage plants for mitigating wind power variations: integrated modelling and performance assessment[J]. Applied Energy, 2019, 237: 720.
 - [3] 骆钊, 高培淇, 和婧, 等. 需求响应下基于自抗扰的抽水蓄能与电化学储能联合参与电网负荷调频研究[J]. 电机与控制应用, 2022, 49(3): 77.
 - [4] 张松岩, 苗世洪, 尹斌鑫, 等. 考虑火电深度调峰的多类型储能经济性分析[J]. 电力建设, 2022, 43(1): 132.
 - [5] 衣传宝, 梁廷婷, 汪卫平, 等. 全功率变速抽水蓄能机组无功优先控制策略研究[J]. 电力电容器与无功补偿, 2021, 42(1): 25.
 - [6] JOSEPH A, DESINGU K, SEMWAL R R, et al. Dynamic performance of pumping mode of 250 MW variable speed hydro-generating unit subjected to power and control circuit faults [J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2018, 33 (1): 430.
 - [7] 胡万丰, 樊红刚, 王正伟. 双馈式抽水蓄能机组功率调节仿真与控制[J]. 清华大学学报(自然科学版), 2021, 61(6): 591.
 - [8] 赵志高, 杨建东, 董旭柱, 等. 基于动态实验的双馈抽水蓄能机组空载特性与变速演化[J/OL]. 中国电机工程学报, doi: 10. 13334/j. 0258-8013. psee. 21167.
 - [9] DESINGU K, SELVARAJ R, CHELLIAH T R. Control of reactive power for stabilized junction temperature in power electronic devices serving to a 250 MW asynchronous hydro-generating unit [J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2019, 55 (6): 7854.
 - [10] 李辉, 王坤, 刘海涛, 等. 交流励磁抽水蓄能机组变下垂系数调频控制策略[J]. 电力自动化设备, 2018, 38(7): 68.
 - [11] 刘其辉, 王志明. 双馈式变速恒频风力发电机的无功功率机制及特性研究[J]. 中国电机工程学报, 2011, 31(3): 82.
 - [12] DESINGU K, SELVARAJ R, CHELLIAH T R, et al. Effective utilization of parallel-connected megawatt three-level back-to-back power converters in variable speed pumped storage units [J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2019, 55(6): 6414.
 - [13] 王欣竹, 韩民晓, BITEW G T. 双馈式可变速抽水蓄能机组无功特性分析[J]. 电网技术, 2019, 43(8): 2918.
 - [14] MULJADI E, SINGH M, GEVORGIAN V, et al. Dynamic modeling of adjustable-speed pumped storage hydropower plant [C] // Power & Energy Society General Meeting, 2015.

[期刊简介]

《电机与控制应用》(原《中小型电机》)创刊于1959年,是经国家新闻出版总署批准注册,由上海电器科学研究所(集团)有限公司主办的具有专业权威的电工技术类科技期刊。

期刊定位于电机、控制和应用三大板块,以中小型电机为基础,拓展新型的高效节能和微特电机技术,以新能源技术和智能控制技术引领和提升传统的电机制造技术为方向,以电机系统节能为目标开拓电机相关应用,全面报道国内外的最新技术、产品研发、检测、标准及相

关的行业信息。

本刊每月10日出版,国内外公开发行人,邮发代号4-199。在半个多世纪的岁月中,本刊为我国中小型电机行业的技术进步与发展做出了巨大的贡献,在中国电机及其应用领域享有很高的声誉。

依托集团公司雄厚的技术实力和广泛的行业资源,《电机与控制应用》正朝着专业化品牌媒体的方向不断开拓创新,得到了业内人士的普遍认可,备受广大读者的推崇和信赖,多次被评为中文核心期刊、中国科技核心期刊、全国优秀科技期刊。