
永磁同步电机原理 及其工程运用特性研究

李泽正

202210501219

摘要

电机是依据电磁感应定律实现电能转换为机械能的一种电磁装置，按照其结构和工作原理可分为直流电机、异步电机和同步电机。

永磁同步电机（Permanent Magnet Synchronous Motor, PMSM）的转子为永磁体，不需要励磁电流，效率和功率因数都比较高且体积较同容量的异步电机小。我国的稀土资源丰富，且拥有领先的永磁材料提炼技术。PMSM 因其高效、稳定、节能等特性在工业和领域中得到广泛应用。本文对永磁同步电机的工作原理、工程特性以及应用进行了系统综述。通过对永磁同步电机的结构和控制的介绍，揭示了其在不同工况下的卓越性能。同时，探讨了永磁同步电机在电动汽车、风能发电、工业生产等领域的具体应用情况，

一、永磁同步电机形状设计

永磁电机具有简单的结构，但其永磁体的安装方式却有多种变化，而合适的永磁体排布可以显著提高电机的磁负荷。在永磁电机中，常见的永磁体安装方式包括表贴式、Halbach 式、内置式和轮辐式。这四种结构中，Halbach 式具有较小的漏磁，而轮辐式则具有聚磁效应，两者能够更有效地利用永磁磁场。根据转子结构的不同，表 1 中列示了这四种电机类型所达到的功率密度水平和效率水平。

表 1 各电机效率和功率密度		
电机类型	效率(%)	功率密度/(kW/kg)
表贴式	96	6
	>95	10.63
内置式	>94	2.55
	97	1.7
Halbach 式	>96	8.16
	96	13
轮辐式	97	7

从表 1 可以看出，表贴式电机和 Halbach1 式电机的功率密度和效率优于其他两类电机，因为它们具有结构简单的特点，适用于船舶、多电飞机等领域。而内置式永磁电机由于其较好的弱磁调速能力，更

多地应用于电动汽车等领域。除了改变永磁体排布方式，还可以通过增加气隙谐波利用率的方法提升电机基波磁密的谐波注削效应。图 1 中展示了这一方法的实现原理，其中曲线 I_1 表示气隙磁密正弦基波， I_4 表示经过谐波注削后的气隙磁密。 I_2 和 I_3 分别表示谐波注削后的气隙磁密的基波和三次谐波。通过图 1 可以看出， I_4 是由 I_2 和 I_3 叠加而成，同时 I_4 与 I_1 所形成的气隙相同。因此，在注入谐波后，电机的基波磁场得到增强，从而获得更高的转矩密度和功率密度。

除了高效利用基波磁密和基波反电势外，通过改善双三相永磁体形状，增大反电势中三次谐波成分，以及利用产生的三次反电动势和注入的三次谐波电流，也可以有效提高输出转矩。基于这一原理，T.A. Lipo 提出了一个正弦型外

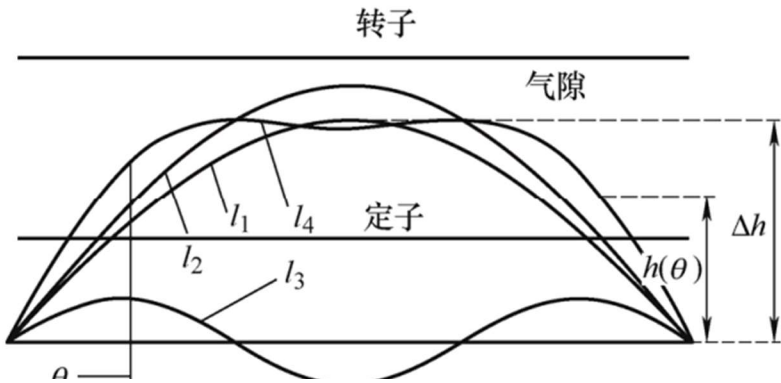


图 1 谐波注削法

加三次谐波组合而成的反电势，将它们背靠背放在一起形成蝴蝶型的永磁体形状，以消除不平衡的轴向力。与常规永磁体形状的永磁电机相比，所提出的蝴蝶型永磁体形状的电机具有更大的输出转矩和更低的转矩脉动特性。研究者赵品志、杨贵杰、李勇等通过在五相永磁电机中注入三次谐波，成功地将转矩密度提高了约 20%。然而，需要注意的是，谐波注入对气隙磁密具有正向作用，但对定子轭部有负向作用，从而可能增加电机损耗。因此，在利用谐波提升电机磁负荷的过程中，需要全面考虑谐波可能带来的负面效应。

二、永磁同步电机材料选择

永磁材料的选择对电机的磁性能起着至关重要的作用。自 1967 年首次推出 YCo5 永磁体以来，稀土永磁材料经历了多个发展阶段。在 1968 年，第一代 1:5 型钐钴永磁体问世；随后于 1977 年，第二代 2:17 型钐钴永磁体登场；到了 1983 年，第三代稀土永磁材料——钕铁硼问世。表 1 中显示了钐钴永磁体和钕铁硼永磁体之间的性能对比。

从表 2 可以看出，相对于钐钴永磁体，钕铁硼永磁体在磁能积和磁感应强度方面表现更卓越，因此在提升电机的磁负荷方面具有明显的优势。然而，与

表 2 两种永磁体磁性能比较

参数	钐钴永磁	钕铁硼永磁
剩磁感应强度 B_r/T	0.87~1.19	1.075~1.49
磁感矫顽力 $H_{cj}/(kA/m)$	1350~2400	955~2706
最大磁能积 $(BH)_m/(kJ/m^3)$	143~265	223~430
B_r 温度系数 $(\%/K)$	-0.11~-0.13	-0.03~-0.04
H_c 温度系数 $(\%/K)$	-0.55~-0.65	-0.15~-0.30
最高工作温度 $t/^\circ C$	250~350	80~220

钕铁硼永磁体相比，钕钴永磁体在耐高温性能上更为出色。因此，在设计高功率密度的永磁电机时，需要根据热负荷和运行温度来选择合适的永磁材料。

三、永磁同步电机控制策略

3.1 PMSM 的数学模型

为了便于研究，突出主要问题，先忽略次要因素，通过以下假设建立简化模型关系：

1. 定子电枢绕组采用 Y 形接法，三相绕组对称，各绕组空间轴线相差 120° 。忽略各相空间谐波，其所产生的磁动势沿气隙表面正弦分布；转子上没有阻尼绕组。
2. 忽略定子绕组的齿槽对气隙磁场分布的影响。
3. 假定铁芯的磁导率无穷大，忽略定子铁芯与转子铁芯的涡流损耗和磁滞损耗。
4. 忽略电机参数的变化。
5. 永磁体产生的磁场在气隙中呈正弦分布

为了便于阐述 PMSM 的数学模型和控制策略，常根据恒磁动势作用于相同电机效果相同原理将其映射到不同的坐标系，实现在不同坐标系视角下有效

简化求解过程。在理论分析中常用到图 2 的坐标系。

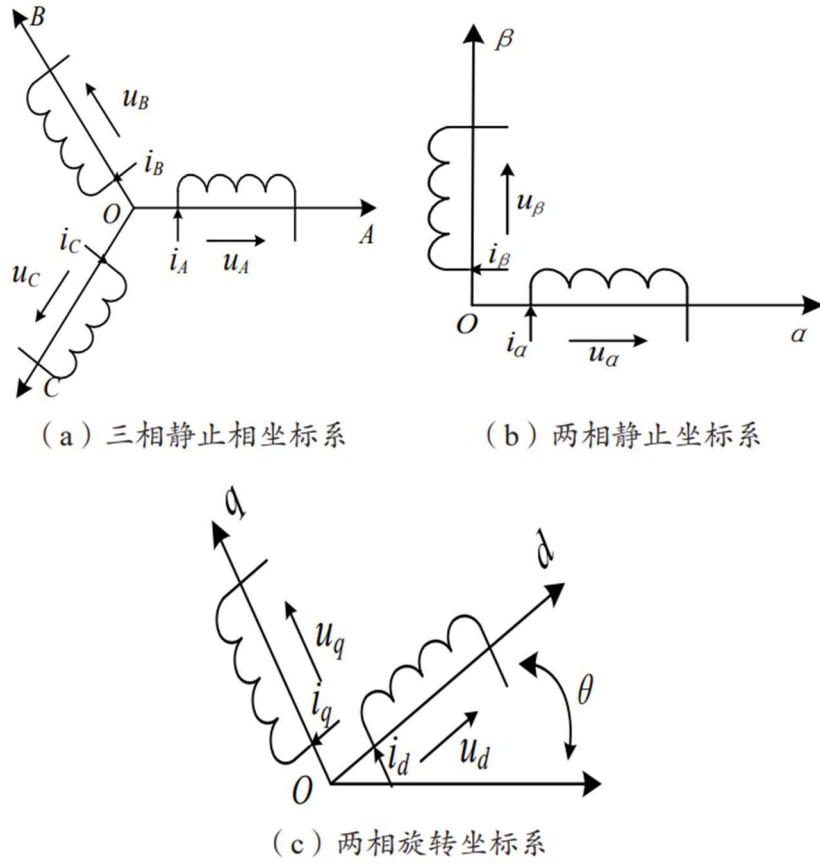


图 1 不同坐标系及绕组示意图

在稳态运行时，永磁同步电机在同步旋转参考坐标系中的电压方程为：

$$\begin{bmatrix} u_A \\ u_B \\ u_C \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_s & 0 & 0 \\ 0 & R_s & 0 \\ 0 & 0 & R_s \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_A \\ i_B \\ i_C \end{bmatrix} + \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} L_{AA} & L_{AB} & L_{AC} \\ L_{BA} & L_{BB} & L_{BC} \\ L_{CA} & L_{CB} & L_{CC} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_A \\ i_B \\ i_C \end{bmatrix} - \psi_f \begin{bmatrix} \sin \theta \\ \sin(\theta - 120^\circ) \\ \sin(\theta + 120^\circ) \end{bmatrix} \quad (1)$$

式中， R_s 为绕组的电阻； L_{ii} 为绕组的自感， $i = A, B, C$ ； L_{jk} 为绕组的互感， $j = A, B, C, k = A, B, C$ ，且 $j \neq k$ ； ψ_f 为永磁体的磁链。基于前述的假设有 $L_{AB} = L_{AC} = L_{BA} = L_{BC} = L_{CA} = L_{CB} = L_0$ ， $L_{AA} = L_{BB} = L_{CC} = L_s$ 。此外，三相电源满足 $i_A + i_B + i_C = 0$ ，故式 (1) 可写为式 (2)：

$$\begin{bmatrix} u_A \\ u_B \\ u_C \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_s + (L_s - L_0) \frac{d}{dt} & 0 & 0 \\ 0 & R_s + (L_s - L_0) \frac{d}{dt} & 0 \\ 0 & 0 & R_s + (L_s - L_0) \frac{d}{dt} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_A \\ i_B \\ i_C \end{bmatrix} - \psi_f \begin{bmatrix} \sin \theta \\ \sin(\theta - 120^\circ) \\ \sin(\theta + 120^\circ) \end{bmatrix} \quad (2)$$

转矩方程如式 (3) 所示

$$T_e = -p_n \psi_f [i_A \sin \theta + i_B \sin(\theta - 120^\circ) + i_C \sin(\theta + 120^\circ)] \quad (3)$$

式中, T_e 为电磁转矩, p_n 为磁极对数。

电机的运动方程式如式 (4) 所示:

$$\frac{d\omega}{dt} = \frac{p_n}{J} (T_e - T_l - \frac{B}{p_n} \omega) \quad (4)$$

3.2 PMSM 传统控制策略

3.2.1 直接转矩控制策略

该策略最初由德国鲁尔大学教授 M. DePenbrock 和日本学者 I.Takahashi 在 1985 年提出。直接转矩控制的核心思想是通过直接控制电动机的转矩来实现控制, 而不是先计算电流、磁链等变量再将其转换成转矩。以下是控制策略的主要步骤:

1. 通过传感器检测逆变器的直流母线电压和电动机的两相电流, 计算电动机反电势, 预估定子磁链。
2. 根据估计的磁链和实测电流计算电动机瞬时转矩。
3. 根据 dq 轴定子磁链判断其位置所在的扇区。
4. 若电动机要求在给定转矩下运行, 将转矩给定值与瞬时转矩相比较, 经

过滞环比较器产生转矩控制量。若电动机要求在时变转矩下运行，将电动机实际转速与给定转速相比较，经过比例积分（PI）调节器输出电机转矩给定。转矩给定再与瞬时转矩相比较，经滞环比较器产生转矩控制量。

5. 定子磁链给定值与实际值相比较，得到的偏差经过滞环比较器产生磁链控制量。

6. 通过 3 个控制信号从开关表中综合选取电压矢量，输出逆变器驱动控制信号。

3.2.2 矢量控制策略

矢量控制，也被称为磁场定向控制，在处理永磁同步电机时是至关重要的。当永磁同步电机接收交流电时，内部会产生电磁转矩和耦合磁场，这会对电机的运行产生影响，为永磁同步电机的控制带来新的挑战。为简化控制过程，矢量控制技术通过两次坐标变换的方式实现。这包括首先通过 Clark 变换将电机被控变量从三相静止坐标系转换到两相静止坐标系，然后通过 Park 变换将电机被控变量从两相静止坐标系转换到两相旋转坐标系。通过这些步骤，可以将复杂的交流电机控制问题转化为简单的直流电机控制问题。

对于永磁同步电机，采用矢量控制法将励磁电流定位到转子磁极上，通过调节转矩电流和励磁电流，实现最佳转矩。在瞬态过程中，矢量控制能够根据电机转速的变化自动调节电压、频率和相位，迅速平衡瞬态过程，无论负荷骤增还是骤降。矢量控制提高了系统的动态特性和转矩响应能力，同时增强了系统的控制精度和响应速度，拓宽了电机调速范围。因此，矢量控制策略在永磁

同步电机控制领域得到广泛应用。

然而，矢量控制也带来了运算系统复杂度的增加，增加了运算量。对控制器的要求较高，需要更快速的数字信号处理器（DSP）。此外，转子磁链的计算容易受到转子电阻的影响。

为解决转速偏差问题并确保电机平稳运行，可以将具有自动监测、自动辨识和自适应功能的变频驱动器应用于矢量控制，或将矢量控制与专用数字化自动电压调整器控制技术结合，用于永磁同步电机的控制。有研究者提出了一种矢量位置观测器，用于检测基于低分辨率霍尔传感器的永磁同步电机中的高速转子位置，使得在矢量跟踪校正环路无法正常操作的零速和零点左右也能提供有用的信息。

3.3 永磁同步电机智能控制策略

3.3.1 模糊控制

模糊控制是一种基于模糊集理论、模糊语言和模糊逻辑等理论的智能控制算法。该方法通过模拟人类模糊性思考与判断，实现对受控对象的智能控制。模糊控制包括模糊化、模糊推理和反模糊化三个过程。首先，将专业人员的经验归纳为模糊准则，并对归纳后的模糊准则进行处理；最后，将处理后的输出值加入执行程序。对于永磁同步电机而言，模糊控制使用语言变量代替数学模型，易于理解和实现，且对外界干扰的鲁棒性强，适用于非线性时变系统的控制。然而，模糊控制对信息进行模糊处理，导致系统控制准确度下降，难以消除稳态误差，因此难以实现对永磁同步电机的精准控制。

尽管模糊控制在应用研究中取得了成果，但对其系统分析和理论研究仍需深入。未来，基于离散时间法、反推控制和滑模控制的模糊控制策略将进一步改善永磁同步电机的控制性能。有研究者提出了一种采用模糊滑模观测器对高速运行的永磁同步电机的转子位置进行观测的方法，有效降低了低速状态下的抖振，并准确检测低速运行状态下的转子位置，提高了系统可靠性。

3.3.2 神经网络控制

神经网络是一种仿照人脑神经网络结构的智能控制方法，应用于复杂变频调速控制系统中，旨在实现对整个系统的辨识与控制。神经网络控制包括学习模式和工作模式两种。学习模式利用神经网络的学习算法调整神经元之间的联接关系，使输出值更符合实际情况。在神经网络的工作模式中，神经网络各神经元之间的联接关系无需改变，系统具备分类和预测功能。神经网络控制算法通过对神经网络整体进行采样，利用自适应算法调节权重，实现对神经网络的实时检测与控制。神经网络控制使得永磁同步电机控制系统具有鲁棒性、学习性、自适应性和容错能力，与其他控制技术结合，使永磁同步电机在非线性、不确定性系统控制和系统辨识方面表现出色。

神经网络控制具有自我学习优化、快速找出最优解和进行自联想等优点，但也存在缺陷，如无法对推理程序进行说明、在数据不足的情况下难以向用户提问，可能导致系统无法正常工作。未来的发展方向可分为两个方向，一是通过神经生理学和认知科学研究人脑思维模式、智能机理和计算机理论；二是利用计算机仿真模拟神经网络运行，并应用到实际工程中的硬件实现。

3.3.3 容错控制

容错控制是指在电机运行过程中某一部分系统功能失效的情况下，利用系统中多余的资源进行容错，以保持系统原控制要求的性能。容错控制包含主动容错和被动容错两种控制方式。主动容错控制通过动态调节和修改控制器参数来应对系统控制问题，通常需要故障检测子系统并进行预处理以提高控制效果。被动容错控制则无需修改控制器

四、永磁同步电机的工程特性及工程应用

4.1 高效率

永磁同步电机采用永磁材料作为励磁源，相比传统的感应电机，无需额外的励磁电流，避免了励磁损耗，提高了电机的整体效率。并且由于永磁同步电机的永磁材料在电机运行时不断保持磁化，降低了铁损耗。相对于感应电机，这使得永磁同步电机在低负载运行时也能保持较高的效率。

4.1.1 工程应用

在电动汽车中，永磁同步电机常用于驱动电机。特斯拉公司高端车型使用了永磁同步电机，通过精密的控制和高效率的特性，实现了优异的续航里程和高性能。由于电动汽车对能源的高效利用要求较高，永磁同步电机成为一种理想的选择，能够在实际驾驶中提供高效、可靠的动力输出。

4.2 精密的控制和响应

永磁同步电机通常采用矢量控制（也称为磁场定向控制），通过对电机的电流和磁场方向进行精密控制，实现对电机转矩和速度的高度精确调节。这种控制方式使得电机在各种工况下都能够保持较高的效率和性能。不仅如此，永磁同步电机还能够在短时间内实现快速响应和高动态性能。通过先进的控制算法，可以实现电机转速和转矩的迅速调整，适应不同的负载变化，从而提高了系统的动态性能。

为了实现更高的精度和稳定性，永磁同步电机通常采用闭环控制系统，例如采用位置反馈、速度反馈或电流反馈。这些反馈信息可以用于实时调整控制算法，使得电机能够更好地适应外部扰动和负载变化。

4.2.1 工程应用

在机床和工业自动化领域，永磁同步电机广泛应用于需要高精度、高动态性能的系统。例如，在数控机床中，永磁同步电机能够通过精密的矢量控制，实现对工具轨迹的高度准确控制，提高了加工精度和效率。通过闭环控制系统，机床系统可以实时调整电机的运行参数，适应不同的加工工况，从而实现了对加工过程的高度精密控制。这使得永磁同步电机成为机床领域的理想选择，推动了数字化制造的发展。

4.3 结构简单、可靠性强

永磁同步电机的结构相对简单，通常不需要励磁线圈，而是依赖永磁材料

作为励磁源。这种简化的结构减少了机械部件和系统的复杂性，降低了故障发生的可能性。

大多数永磁同步电机采用无刷设计，消除了碳刷与旋转部件之间的接触。因为没有接触，就减少了机械磨损和摩擦，大幅减少了因刷子磨损而引起的故障风险。

永磁同步电机采用先进的控制算法，能够确保在不同负载和运行条件下稳定运行。这有效地防止了由于工作条件变化而导致的振动和不稳定性，保障了电机的可靠性。

其高效率也是提高可靠性的因素之一。高效率意味着电机工作时产生的热量相对较少，减少了温度升高，有助于延长电机寿命和提高可靠性。

4.3.1 工程应用

在风力发电系统中，永磁同步电机得到广泛应用，其可靠性对系统的长期运行至关重要。这些电机能够承受风能转换过程中的变化负载，并保持稳定运行。

以风力发电机制造商的实例来看，许多大型风力涡轮机使用永磁同步发电机作为驱动部分。这些电机由于其简化结构、无刷设计以及稳定高效的特性，表现出色，提供稳定可靠的电力输出，确保风力发电系统长期高效运行。

总的来说，永磁同步电机凭借其结构简化、无刷设计、稳定高效的运行特性，在众多应用场景中展现出卓越的可靠性，成为许多关键系统的首选之一。

4.4 噪声小

大多数永磁同步电机采用无刷设计，避免了传统电机中使用的刷子与旋转部件之间的摩擦。无刷设计降低了机械磨损和摩擦噪声的产生，从而减小了电机运行时的噪音水平。

永磁同步电机的结构相对简化，无需励磁线圈和复杂的励磁控制系统。简化的结构降低了运动部件之间的机械摩擦，减小了噪声的来源。

由于永磁同步电机在运行时不需要大量电流通过励磁线圈，电机的温升相对较低。低温升有助于减小材料的热胀冷缩，降低了因温度变化引起的机械噪声。

永磁同步电机通常需要较高的制造精度，这有助于减小零部件之间的间隙，减缓机械振动和噪声的传播。

4.4.1 工程实例

一些高端空调系统采用永磁同步电机作为压缩机的驱动部分。由于永磁同步电机的噪声小的特点，这些空调系统在运行时产生的噪音相对较低，提供了更为舒适的室内环境。这也符合家用电器对于低噪音水平的需求，使得永磁同步电机在这类应用中得到了广泛采用。

4.5 转子转动惯量小

永磁同步电机采用永磁材料作为励磁源，相比传统的感应电机，不需要额外的励磁线圈，从而降低了电机的质量，减小了转子的转动惯量。与感应电机

相比，永磁同步电机的转子无需携带励磁线圈，这减小了旋转部分的质量，降低了转动惯量。由于永磁同步电机能够在相对较小的体积内提供较大的功率输出，因此其整体设计更趋向于轻量化，有利于减小转动惯量。

4.5.1 工程应用

风力发电机要求在变化的风速下能够迅速调整转速以实现最大的电力输出。采用永磁同步电机可以实现直接驱动风力发电机，减小了传动系统的转动惯量，提高了系统的响应速度。这种设计有助于在不同的风速下更高效地捕捉风能，提高了风力发电机的性能。

五、研究与展望

在经过国内外学者持续不懈的努力后，永磁电机系统在轻量化设计和高效率运行方面取得了显著的进展。然而，随着应用领域的不断拓展，仍存在可以在以下两个方面取得突破的机会。

5.1 当前控制算法存在不足

传统控制算法基于 PMSM 的数学模型，而这个模型需要越精确，算法的估计精度就越高。然而，考虑到电机的磨损、退磁、模型误差以及使用环境噪声等因素，数学模型很难完全准确地描述电机的行为，从而影响了控制算法的性能。尽管有多种高速 PMSM 转子位置和转速的估计算法，但目前尚无一种算法能够覆盖全速域。这可能导致在某些速度范围内算法的性能下降。复杂性和

计算量大：现代控制虽然不依赖于精确的参数，但其算法复杂，计算量大。这可能导致在实际应用中需要更高的计算资源，这对于一些嵌入式系统或实时应用可能是不切实际的。随着芯片计算能力的提高以及人工智能技术的发展，智能控制算法有望在全速域范围内实现更高的估计精度和满意的实时性。

5.2 多目标优化

目前，轻量化高效率电机中的电、磁、热负荷的设计已接近极限，参数间的矛盾日益凸显。后续可将多目标优化算法引入，以实现各参数间的权衡和兼顾。此外，优化的过程不能仅考虑各物理场的单独优化，需要综合考虑电磁、温度、机械和流体各物理量之间的耦合约束，以实现电磁热力多场耦合下的最优。

六、结论

随着能源需求的不断增长和对环境友好技术的日益重视，永磁同步电机在电动交通、可再生能源和工业自动化等领域中的应用前景广阔。本文所述的永磁同步电机的原理、工程特性和应用综述揭示了其在多个方面的优越性。

首先，永磁同步电机的高效能转换特性使其成为电动汽车的理想驱动系统。其高功率密度和卓越的响应速度有助于提高电动汽车的性能，延长续航里程，推动电动交通的发展。在此基础上，不仅可以减少对化石燃料的依赖，还能有效减少尾气排放，对缓解交通污染和气候变化产生积极影响。

其次，永磁同步电机在风能发电系统中的应用也显著推动了可再生能源的

发展。通过结合先进的电力电子技术和智能控制算法，永磁同步电机可以提高风能发电系统的整体效率，降低成本，促使更多地区采用风能作为清洁、可持续的能源来源。

此外，永磁同步电机在工业生产中的广泛应用，尤其是在需要高精度、高可靠性的自动化系统中，也进一步证明了其在提高生产效率和质量方面的价值。其精确的控制特性和快速的响应速度使其适用于各种工业应用，包括机床、机器人、食品加工等，为工业自动化领域带来了新的发展机遇。

总体而言，永磁同步电机的原理、工程特性和应用综述揭示了其在推动清洁能源、提高能源利用效率和促进工业自动化方面的重要作用。未来的研究和发展将进一步拓展其应用领域，不断推动电机技术的创新，为可持续发展目标作出更大的贡献。

参考文献

- [1]陈前,赵美玲,廖继红,刘国海 赵文祥.轻量化高效率永磁电机及其控制技术综述.电气工程学报 1-17.
- [2]王刚,王涛 穆宝茂.(2021).车用永磁同步电机振动噪声研究综述.汽车实用技术(04),199-200.doi:10.16638/j.cnki.1671-7988.2021.04.061.
- [3]李璐,刘远 周宇航.(2020).永磁同步电机鲁棒模型预测控制技术综述.工业仪表与自动化装置(05),11-15.
- [4]吕从鑫,汪波,陈静波,张蕊萍 董海鹰.(2022).永磁同步电机控制策略综述与展望.电气传动自动化(04),1-10.
- [5]陈若珠,何婷 常勇.(2017).永磁同步电机模型预测控制的现状与发展.工业仪表与自动化装置(03),20-23.
- [6]罗润谦.(2023).新能源汽车用永磁同步电机的研究现状.兵器材料科学与工程(05),154-158.doi:10.14024/j.cnki.1004-244x.20230905.001.
- [7]田淳,胡育文.(2002).永磁同步电机直接转矩控制系统理论及控制方案的研究.电工技术学报(01),7-

11.doi:10.19595/j.cnki.1000-6753.tces.2002.01.002.

[8]梁艳,李永东.(2003).无传感器永磁同步电机矢量控制系统概述.电气传动(04),4-

9.doi:10.19457/j.1001-2095.2003.04.001.

[9]林伟杰.(2005).永磁同步电机伺服系统控制策略的研究博士学位论文,浙江大学).

[10]汤新舟.永磁同步电机的矢量控制系统[D].浙江大学,2005.

[11]彭海涛,何志伟,余海阔.电动汽车用永磁同步电机的发展分析[J].微电机,2010,43(06):78-

81.DOI:10.15934/j.cnki.micromotors.2010.06.021

[12]廖勇,甄帅,刘刃等.用谐波注入抑制永磁同步电机转矩脉动[J].中国电机工程学报,2011,31(21):119-

127.DOI:10.13334/j.0258-8013.pcsee.2011.21.017