به نام خدا

که هر چه دارم از اوست و هم اوست جانشین تمام نداشته های من

دانشکده فنی و مهندسی

عنوان:

طراحی بهینه موتور BLDC برای خودروهای هیبریدی

نگارش :

پیام واحدی

استاد راهنما :

دکتر محمدرضا بسمی

پایان نامه برای دریافت درجه کارشناسی‌ارشد در رشته
مهندسی برق – گرایش قدرت

۸۸-۸۹

چکیده

امروزه با توجه به مشکلات زیست محیطی بوجود آمده ناشی از آلودگی هوا و کاهش سوخت‌های فسیلی، صنایع خودروسازی گام های موثری در راستای بهره برداری بهینه از منابع انرژی برداشته‌اند. این عوامل سبب گردیده است تا استراتژی صنایع خودروسازی به سمت خودروهایی با آلودگی و مصرف سوخت کم متمایل شود. با توجه به محدودیت خودروهای برقی خالص در طی مسافتهای رانشی طولانی و مشکلاتی نظیر تخلیه سریع باتری‌ها و هزینه بالا، خودروهای هیبریدی مورد توجه قرار گرفته اند. خودروهای هیبریدی با بهره‌گیری از دو منبع انرژی برای رانش خودرو، دارای ساختار پیچیده‌تری هستند. یکی از بخشهای مهم و اساسی در این خودروها موتور الکتریکی است که در بررسی‌های انجام شده موتورهای آهنربای دائم کارائی مناسبی برای این خودروها دارند.

پس از انتخاب موتور آهنربای دائم به عنوان موتور الکتریکی خودروی هیبریدی، به بررسی انواع ساختارهای ماشین‌های آهنربای دائم می‌پردازیم. در بررسی انجام شده ماشین آهنربای دائم شارشعاعی سطحی را به دلیل عملکرد مناسب، سادگی ساختار و هزینه ساخت پایین انتخاب می‌کنیم.

در ادامه شبیه‌سازی دو بعدی به روش المان محدود برای ساختار انتخاب شده بررسی شده‌است. پس از آن مدل‌سازی ماشین آهنربای دائم شار شعاعی بیان شده و برای زاویه‌های مختلف چرخش رتور، مدارمعادل مغناطیسی ارائه شده‌است. به کمک مدارمعادل‌های پیشنهادی اندوکتانس سیم‌پیچ‌های استاتور محاسبه شده و نتایج بدست آمده با روش المان محدود مقایسه شده‌است.

در ادامه به کمک روابط حاکم بر ماشین یک الگویتم طراحی برای ماشین آهنربای دائم شارشعاعی سطحی ارائه شده و سپس به کمک الگوریتم ژنتیک و پترن‌سرچ ماشین طراحی شده به منظور افزایش راندمان، بهینه‌سازی شده‌است. در انتها به منظور بررسی صحت الگوریتم طراحی، ماشین طراحی شده را به روش المان محدود تحلیل کرده‌ایم.

فهرست

فصل اول : مقدمه ۱۲
۱-۱ مشخصات اصلی موتور الکتریکی خودروهای هیبریدی ۱۳
۱-۲ عملکرد ماشین‌های آهنربای دائم ۱۳
۱-۳ انواع ساختارهای ماشین‌های آهنربای دائم ۱۵
۱-۳-۱ ماشین‌های مغناطیس دائم شار شعاعی ۱۵
۱-۳- ۲ماشین‌های مغناطیس دائم شارمحوری ۱۸
۱-۳- ۳ماشین‌های مغناطیس دائم Line-start ۱۹
۱-۳-۴ ماشین‌های مغناطیس دائم عرضی ۲۰

فصل دوم : مدل سازی ماشین آهنربای دائم شارشعاعی سطحی ۲۱
۲-۱- مقدمه ۲۲
۲-۲- مدل سازی اجزای ماشین ۲۳
۲-۳ مدارمعادل ماشین شار شعاعی سطحی در وضعیت A ۲۵
۲-۴ مدارمعادل ماشین شار شعاعی سطحی در وضعیت B ۳۱
۲-۵ ماشین شار شعاعی سطحی در وضعیتC ۳۵
۲-۶ مدارمعادل ماشین شار شعاعی سطحی در وضعیتD ۳۶
۲-۷ مدارمعادل ماشین شار شعاعی سطحی در وضعیت E ۳۷
۲-۸ مدارمعادل ماشین شار شعاعی سطحی در وضعیتF ۳۹
۲-۹ محاسبه اندوکتانس ماشین آهنربای دائم شار شعاعی سطحی به کمک مدارمعادل مغناطیسی ۴۰
۲-۹-۱اندوکتانس خودی ۴۱
۲-۹-۲ اندوکتانس متقابل ۴۴
۲-۹-۳مقایسه نتایج با FEMM ۴۴

فصل سوم : طراحی ماشین‌های آهنربای دائم شارشعاعی سطحی ۴۶
۳-۱- مقدمه ۴۷
۳-۲ طراحی اولیه موتورهای اهنربای دائم شارشعاعی سطحی ۴۷

۳-۲-۱- انتخاب آهنربای دائم ۴۷
۳-۲-۲- رابطه ابعادی ماشین ۴۸
۳-۲-۳- پارامترهای هندسی ماشین ۴۹
۳-۳- طراحی مغناطیسی ۵۱
۳-۴ محاسبه تعداد هادی‌های هر شیار ۵۴
۳-۵ بررسی طرح‌های سیم‌پیچی و ترکیب تعداد قطب‌های رتور و شیارهای استاتور ۵۶
۳-۶ الگوریتم طراحی ۵۸
۳-۷ محاسبه توان خروجی و گشتاور ۵۹
۳-۸ محاسبه راندمان ۶۰
۳-۹ طراحی یک ماشین نمونه ۶۱

فصل چهارم : بهینه‌سازی ماشین شارشعاعی سطحی ۶۴
۴-۱ مقدمه ۶۵
۴-۲ آنالیز حساسیت فاصله هوایی ۶۵
۴-۳ آنالیز حساسیت نسبت قطر خارجی به قطر داخلی ۶۶
۴-۴ آنالیز حساسیت نسبت طول ماشین به قطر داخلی ۶۷
۴-۵ آنالیز حساسیت بارگذاری الکتریکی ۶۹
۴-۶ آنالیز حساسیت نسبت دهانه شیار به عرض شیار ۷۰
۴-۷ آنالیز حساسیت ارتفاع دهانه شیار ۷۲
۴-۸ تابع هدف ۷۵
۴-۹ متغیرهای بهینه‌سازی ۷۵
۴-۱۰ قیود بهینه‌سازی ۷۵
۴-۱۱ الگوریتم پترن‌سرچ ۷۵
۴-۱۲ الگوریتم ژنتیک ۷۶
۴-۱۳نتایج بدست‌آمده از بهینه‌سازی با هدف ماکزیمم بازده ۷۷

فصل پنجم : نتیجه‌گیری ۷۹
۵-۱ مقدمه ۸۰
۵-۲ جمع‌بندی و نتیجه‌گیری ۸۰
۵-۳پیشنهاد برای ادامه کار ۸۱
۵-۴ مقالات استخراج شده از پایان‌نامه ۸۱

مراجع ۸۲
پیوست ۸۵

فهرست علائم و اختصارات

η: بازده

μ_0: ضریب نفوذپذیری مغناطیسی هوا (برابر $4\pi\times10^{-7}\ \frac{H}{m}$)

μ_r: ضریب نفوذپذیری مغناطیسی نسبی آهنربای دائم ($\frac{H}{m}$)

ρ_{cu} : مقامت مخصوص الکتریکی مس ($\frac{\Omega.mm^2}{m}$)

Λ : هدایت مغناطیسی($\frac{Wb}{At}$)

λ_o : نسبت قطر داخلی به قطر خارجی استاتور

λ_1 : ضریب نفوذپذیری مخصوص دهانه شیار

τ_s :گام شیار استاتور

τ_{s2} : گام شیار در وسط هسته استاتور

α : زاویه نیم‌قطب بر حسب درجه الکتریکی

β : زاویه بین بردار جریان و بردار شار مغناطیسی

β_{st} : ثابت استینمتز

ω_e : سرعت زاویه‌ای الکتریکی

ω : سرعت زاویه‌ای مکانیکی

A: بار گذاری الکتریکی ماشین (At/m)

A_g: سطح مقطع فاصله هوایی زیر یک قطب (m^2)

A_{PM} : سطح مقطع آهنربای دائم (m^2)

A_{cond} : سطح مقطع هادی سیم‌پیچی

b_{ss1} : عرض داخلی شیار استاتور

b_{ss2} : عرض بیرونی شیار استاتور

b_{ts} : عرض دندانه استاتور

b_{so} : دهانه شیار استاتور

B_g: چگالی شار فاصله هوایی (T)

B_δ: مولفه اصلی چگالی شار فاصله هوایی (T)

B_{sy}: چگالی شار ماکزیمم هسته استاتور (T)

B_{ry}: چگالی شار ماکزیمم هسته رتور (T)

B_r: چگالی شار پسماند آهنربای دائم (T)

B_{st}: چگالی شار ماکزیمم دندانه استاتور (T)

Co_s: هزینه تمام شده (مواد و ساخت) ماشین

Co_B: هزینه پایه (مواد و ساخت) ماشین

cov : پوشش آهنربا

D_i: قطر داخلی روتور (m)

D_o: قطر خارجی استاتور (m)

D_{shaft} : قطر شفت ماشین (m)

D_{rc} : قطر هسته رتور (m)

E : ولتاژ القایی

E_{Pk}: حداکثر نیروی محرکه القایی (V)

e(t): نیروی محرکه القایی (V)

f: فرکانس (Hz)

f_s : ضریب تراکم

h_{sw} : ارتفاع دهانه شیار

h_{sy} : ارتفاع هسته استاتور

h_{ss} : ارتفاع شیار استاتور

I_{Pk}: جریان پیک هرهادی (A)

I_{rms} : مقدار موثر جریان فاز

i(t) : جریان ماشین (A)

J : چگالی جریان

J_s : چگالی شار نقطه اشباع

K_c و K_q ضرائب تصحیح وابسته به ابعاد ماشین

K_e : ثابت نیرو محرکه

K_i: نسبت حداکثر جریان به مقدار موثر جریان

k_j : ضریب تراکم ورقه‌های استاتور

K_P: ضریب شکل موج

K_w : ضریب سیم پیچی

k_{w1} : ضریب سیم‌پیچی برای هارمونیک اول

K_ϕ : نسبت بارگذاری الکتریکی رتور به بارگذاری الکتریکی استاتور

K_l : نسبت طول ماشین به قطرداخلی

K_{open} : نسبت دهانه شیار به عرض شیار

k_{coil}: یک ثابت تجربی برای بیان مقاومت انتهای سیم‌پیچی

K_{hyst} : ثابت هیسترزیس

K_{eddy} : ثابت جریان فوکو

L_{aa}: اندوکتانس خودی فاز (H)

l_g : طول فاصله هوایی (m)

L_d : اندوکتانس‌های محور d

L_q : اندوکتانس‌های محور q

L_{ge} : طول فاصله هوایی موثر

L_l: اندوکتانس نشتی سیم پیچ استاتور (H)

L_{ab}: اندوکتانس متقابل دو فاز (H)

L_{a1}: اندوکتانس خودی یک کلاف (H)

L_{a12} : اندوکتانس متقابل دو کلاف (m)

l_m : ضخامت آهنربای دائم (m)

L_{md} : اندوکتانس مغناطیس شوندگی محور d

L_{mq} : اندوکتانس مغناطیس شوندگی محور q

L_e : طول موثر ماشین

m : تعداد کل فازهای استاتور

m_1 : تعداد فازهای هر طبقه استاتور

mmf_{PM}: نیرومحرکه آهنربای دائم

n_s : تعداد هادی‌های هر کلاف

N_s : تعداد دور سیم‌پیچ سری هر فاز

p: تعداد قطب ها

P_{out}: توان خروجی ماشین

P_{iron}: تلفات هسته استاتور (W)

P_{Cu}: تلفات مس سیم پیچ استاتور (W)

q : تعداد شیارها برای هر قطب برای هر فاز

Q_s : تعداد شیارهای استاتور

R : مقاومت یک فاز سیم‌پیچ استاتور

R_o : شعاع خارجی روتور (m)

R_i : شعاع داخلی روتور (m)

R_{aa}: رلوکتانس مسیر شار تولیدی توسط سیم پیچ a و گذرنده از سیم پیچ a ($\frac{At}{Wb}$)

R_g : رلوکتانس فاصله هوایی و استاتور ($\frac{At}{Wb}$)

R_{sy}: رلوکتانس هسته استاتور ($\frac{At}{Wb}$)

R_{ry} : رلوکتانس هسته رتور ($\frac{At}{Wb}$)

R_L : رلوکتانس نشتی بین دو قطب ($\frac{At}{Wb}$)

R_{PM} : رلوکتانس آهنربای دانم ($\frac{At}{Wb}$)

R_{st} : رلوکتانس دندانه استاتور ($\frac{At}{Wb}$)

$\hat{S}_1$: مقدار ماکزیمم بارگذاری جریان

T : دوره تناوب

T_m : گشتاور

V: ولتاژ ترمینال ماشین (V)

V_t : حجم دندانه استاتور

V_y : حجم هسته استاتور

W : عرض آهنربای دائم (m)

فصل اول

مقدمه

۱-۱مشخصات اصلی موتور الکتریکی خوردروهای هیبریدی

قسمت‌های الکتریکی اصلی یک خودرو هیبریدی عبارتند از: موتورالکتریکی، اینورتر و باتری. مشخصات اصلی مورد نیاز برای موتور الکتریکی خودروهای هیبریدی را می‌توان به صورت زیر بیان نمود [۱] :

۱ -چگالی گشتاور بالا

۲ -راندمان بالا

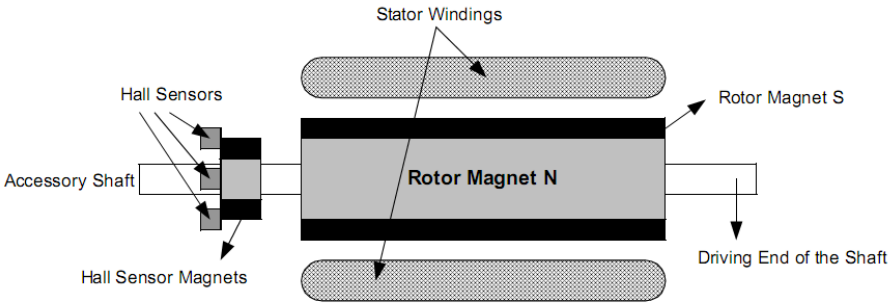
۳ -ریپل گشتاور کم

۴ -توان ثابت در محدوده وسیعی از سرعت

یکی از بهترین گزینه‌ها برای موتور خودروی هیبریدی، موتورهای آهنربای دائم (موتورهای DC بدون جاروبک[1]) می‌باشند.

۱-۲ عملکرد ماشین‌های آهنربای دائم:

قبل‌از اینکه به معرفی انواع ساختارهای ماشین‌های مغناطیس دائم بپردازیم لازم است مختصری راجع به نحوه عملکرد این ماشین‌ها بیان شود. گشتاور در این ماشین‌ها از تقابل بین میدان مغناطیسی سیم‌پیچ‌های استاتور و مغناطیس‌های دائم ایجاد می‌شود. به صورت ایده‌آل گشتاور ماکزیمم زمانی ایجاد می‌شود که زاویه الکتریکی بین این دو میدان ۹۰ درجه باشد [۲]. بدیهی است برای ایجاد گشتاوری پیوسته لازم است میدان استاتورمتناسب با سرعت چرخش رتور، بچرخد. در عمل برای اینکه تحریک استاتور متناسب با وضعیت رتور باشد از ۳ سنسور اثر هال استفاده می‌شود. این سنسورها با زاویه ۱۲۰ درجه نسبت به یکدیگر نصب می‌شوند (شکل۱-۱).

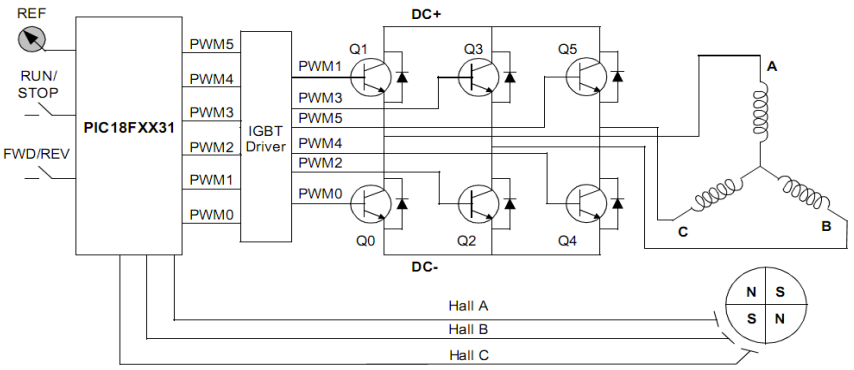


شکل۱-۱: برش عرضی یک ماشین مغناطیس دائم

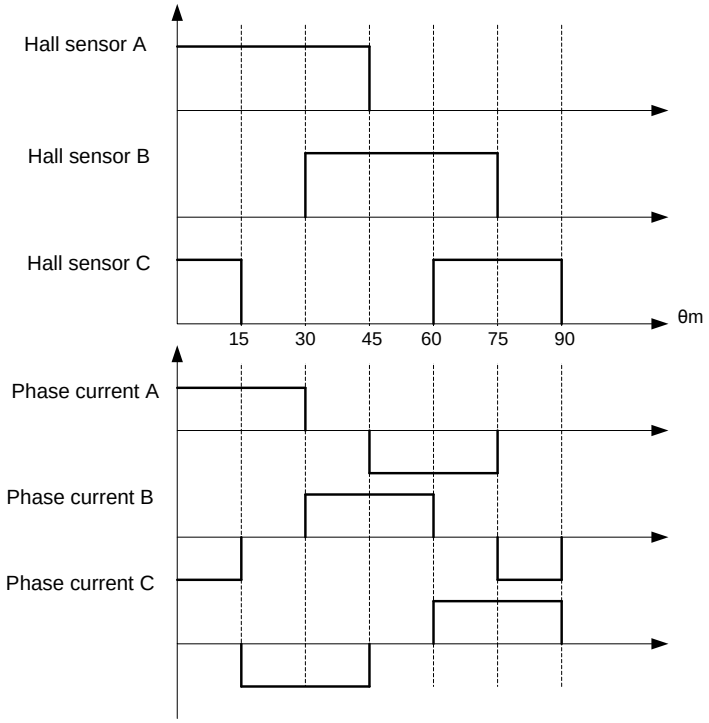
با تغییر مقادیر خروجی سنسورها (چرخش رتور)کموتاسیون در کلاف‌های استاتور اتفاق می‌افتد(شکل۱-۳). در شکل۱-۲ بلوک دیاگرام کنترل این ماشین‌ها به کمک سنسورهای اثر هال نشان داده شده است.

آنچه انواع ساختارهای ماشین‌های مغناطیس دائم را ایجاد می‌کند جهت شارمغناطیسی و نحوه قرار گرفتن و شکل مغناطیس‌های دائم می‌باشد. در ادامه انواع ساختارهای ماشین‌های مغناطیس دائم معرفی و مزایا و معایب آنها نسبت به یکدیگر مقایسه می‌شود.

[1] BLDC



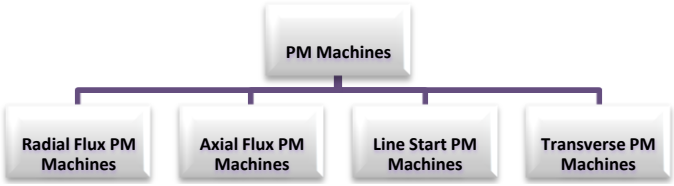
شکل۱-۲: بلوک کنترل ماشین BLDC



شکل۱-۳: سیگنال‌های سنسورهای اثر هال برای چرخش ساعتگرد

۱-۳ انواع ساختارهای ماشین‌های آهنربای دائم

به صورت کلی می‌توانیم ماشین‌های PM را به صورت زیر دسته‌بندی کنیم :

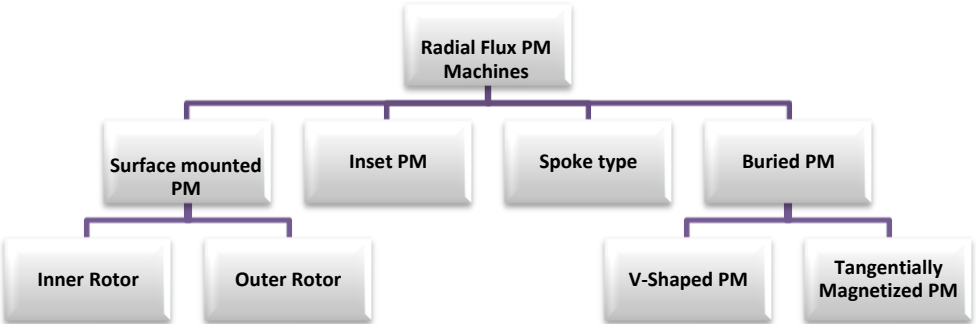


شکل ۱-۴ : دسته‌بندی ماشین‌های مغناطیس دائم

در ادامه به معرفی ساختارهای معرفی شده می‌پردازیم.

۱-۳-۱ ماشین‌های مغناطیس دائم شار شعاعی[۲]

در ماشین‌های شار شعاعی، مسیر حرکت شار در فاصله هوائی به صورت شعاعی است. رتور و استاتور در این ماشین‌ها به صورت استوانه‌ای می‌باشند. در این ساختار آهنرباهای دائم در روتور قرار می‌گیرند. برحسب چگونگی قرار گرفتن مگنت‌ها در روتور و شکل مگنت‌ها می‌توان ماشین‌های شار شعاعی را به صورت شکل ۱-۵ دسته‌بندی نمود.



شکل ۱-۵: دسته‌بندی ماشین‌های شارشعاعی

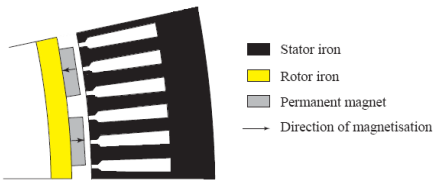
در ادامه به بررسی ماشین‌های معرفی شده در شکل ۱-۵ خواهیم پرداخت.

ماشین‌های مغناطیس دائم سطحی[۳]:

ماشین‌های مغناطیس دائم سطحی از رایج‌ترین و پرکاربردترین ماشین‌های مغناطیس دائم محسوب می‌شوند. این ساختار بر اساس نحوه قرارگرفتن رتور نسبت به استاتور به دو دسته Inner Rotor و Outer Rotor تقسیم‌بندی می‌شوند.

الف- ماشین مغناطیس دائم سطحی با رتور داخلی[۴]:

در شکل۱-۶ ماشین مغناطیس دائم با رتور داخلی نشان داده شده است. در این ساختار استاتور، رتور را در بر گرفته است [۳].



شکل۱-۶: ماشین آهنربای دائم شارشعاعی رتور داخلی

مزیت اصلی این ساختار سادگی و در نتیجه هزینه ساخت پائین در مقایسه با دیگر ماشین‌های PM می‌باشد. همچنین، همان‌طور که در ادامه بیان خواهدشد،ریپل‌گشتاور این ساختار در مقایسه با دیگر ماشین‌های شار شعاعی کمتر است.

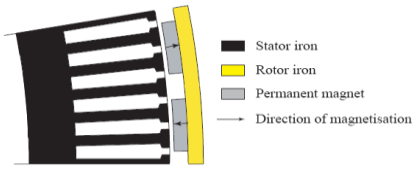
---

[2] Radial flux PM machines
[3] Surface mounted PM
[4] ***Surface mounted PM machines with inner rotor***

عیب اصلی این ساختار را می‌توان نیروی گریزازمرکز واردشده بر مگنت‌ها بیان کرد. در سرعت‌های بالا این نیرو می‌تواند باعث جداشدن مگنت‌ها از سطح رتور شود.

ب – ماشین مغناطیس دائم سطحی با رتور خارجی[5]:

همان طور که در شکل۱-۷ مشاهده می‌شود در ماشین‌های مغناطیس دائم با رتور خارجی رتور استاتور را در بر می‌گیرد [۳] .



شکل۱-۷: ماشین شار شعاعی رتور خارجی

دو مزیت اصلی این ساختار را می‌توان چنین بیان کرد :

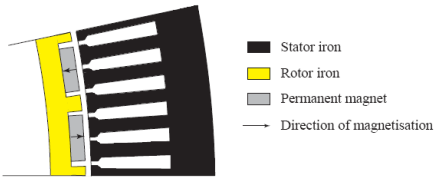
۱ -***قطر روتور در این ساختار نسبت به ماشین‌های شار شعاعی معمولی بزرگتر است. در نتیجه در ساختار می‌توان قطب‌های بیشتری قرارداد.***

۲ -***هنگام چرخش روتور نیروی گریز از مرکز وارد شده بر مگنت‌ها امکان جدا شدن مگنت‌ها از سطح رتور را غیرمحتمل می‌سازد.***

این ساختار در توربین‌های بادی کوچک کاربرد زیادی دارد.

ماشین مغناطیس دائم وصله‌ای[6]:

در شکل۱-۸ این ساختار نشان داده شده است[۳].



شکل۱-۸: ماشین مغناطیس وصله‌ای

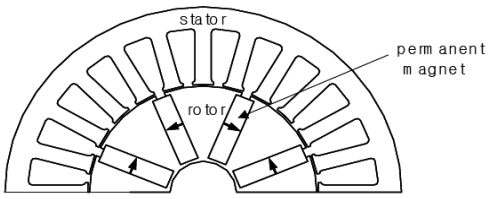
در این ماشین برجستگی ایجاد شده به واسطه‌ی آهن بین مگنت‌ها باعث تولید یک گشتاور رلوکتانسی علاوه بر گشتاور تولیدی مگنت‌ها می‌شود.

ماشین مغناطیس دائم پره‌ای[7]:

شکل۱-۹ نحوه قرارگرفتن مگنت‌ها را در این ساختار نشان می‌دهد. در این طرح مگنت‌ها به شکل پره‌های چرخ قرارگرفته‌اند[۴].

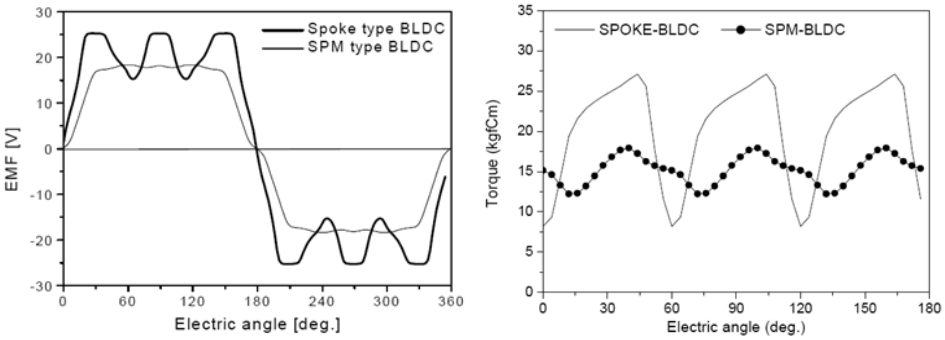
---

[5] ***Surface mounted PM machines with outer rotor***
[6] Inset PM machine
[7] Spoke type



شکل۱-۹: ماشین آهنربای دائم پره‌ای

آرایش خاص مگنت‌ها در این ساختار، باعث تمرکز شار در فاصله هوایی می‌شود. به همین دلیل نیرومحرکه ضدمغناطیسی و گشتاور در این ساختار در مقایسه با ماشین‌های شار شعاعی معمولی بیشتر است. ولی هارمونیک در این ساختار بیشتر از ماشین‌های SMPM می‌باشد. مطالب بالا در شکل۱-۱۰ قابل رویت است.



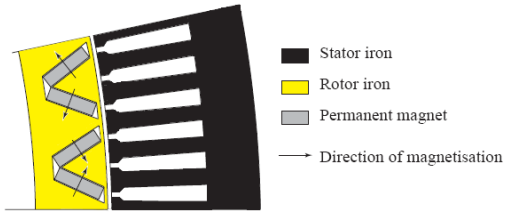
شکل ۱-۱۰

ماشین مغناطیس دائم مدفون[8]:

در این نوع ساختارها مگنت‌ها در داخل رتور مدفون شده‌اند. دو نوع رایج از این ساختار را می‌توان ماشین مغناطیس دائم V شکل و ماشین مغناطیس دائم مماسی معرفی کرد. در ادامه به بررسی این دو ساختار می-پردازیم[۳].

الف - ماشین‌های مغناطیس دائم V شکل[9]:

در این ساختار مگنت‌ها در داخل رتور قرارگرفته‌اند و شکل آنها شبیه حرف V می‌باشد. شکل۱-۱۱ این ساختار را نشان می‌دهد.



شکل ۱-۱۱

[8] Buried PM machines
[9] ***V-Shaped buried PM machines***

می‌توان دو مزیت اصلی برای این ساختار در مقایسه به SMPM مطرح کرد :

۱ -نحوه آرایش مگنت‌ها در این ساختار باعث تمرکز شار در فاصله هوایی می‌شود در نتیجه چگالی شار در فاصله هوایی افزایش می‌یابد.

۲ -در این ساختار مگنت‌ها در مقابل عوامل خارجی محافظت می‌شوند.

معایب این ساختار را می‌توان به صورت زیر خلاصه نمود :

۱ -به دلیل وجود پل‌های آهنی در این ساختار، قسمت زیادی از شار مغناطیسی به جای اینکه از فاصله هوایی عبور کنند و در تولید گشتاور نقش داشته باشند از طریق این پل‌ها بسته می‌شوند.

۲ -در این ساختار با افزایش تعداد قطب‌ها، زاویه بین مگنت‌ها کوچک می‌شود درنتیجه آهن بین مگنت‌ها به راحتی به اشباع می‌رود.

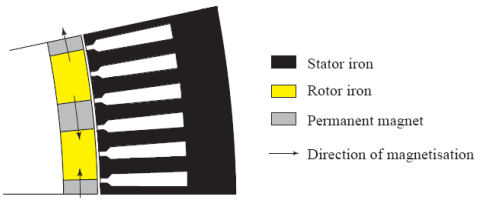
۳ -تعداد زیاد مگنت‌ها در این ساختار باعث افزایش هزینه ساخت می‌شود.

۴ -همان طور که در ادامه نیز اشاره خواهدشد، ریپل گشتاور در این ساختار بسیار زیاد است.

ب – ماشین مغناطیس دائم مماسی[۱۰]:

نحوه قرار گرفتن مگنت‌ها در این ساختار در شکل۱-۱۲ نشان داده شده است.

این نوع ماشین‌ها در مقایسه با ماشین‌های مغناطیس دائم V شکل پل آهنی ندارند. در نتیجه شار نشتی در این ماشین‌ها به مراتب کمتر است.



شکل۱-۱۲: ماشین اهنربای دائم مماسی

در این ساختار شفت فرومغناطیس نمی‌باشد، چراکه اگر شفت فرومغناطیس باشد قسمت عمده‌ای از شار تولیدی مگنت‌ها از طریق شفت بسته می‌شود.

نقص این ساختار تعداد زیاد قطعات آهن و مگنت است و اگر تعداد قطب‌ها زیاد باشد ساخت آن مشکل است.

۱-۳-۲ ماشین‌های مغناطیس دائم شارمحوری[۱۱]

دسته دیگری از ماشین‌های مغناطیس دائم ، ماشین‌های شار محوری نام دارند. شار در فاصله هوایی این ماشین-ها در راستای محور ماشین حرکت می‌کند. بر خلاف ساختارهای رایج ماشین‌های الکتریکی که در آنها روتور و استاتور استوانه‌ای شکل هستند، در ساختار روتور و استاتور به شکل دیسک هستند. شکل۱-۱۳ چند نمونه از این ساختار را نشان می‌دهد[۵]و[۳].

[10] ***Tangentially magnetized PM machines***

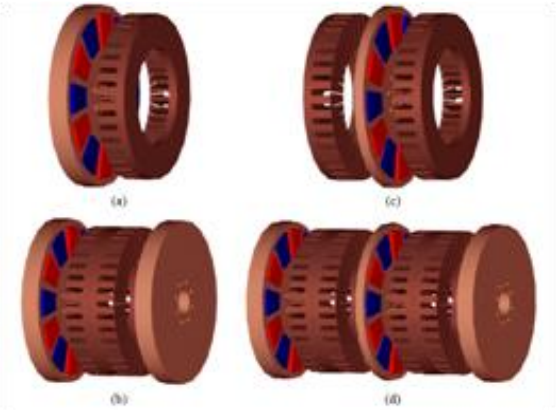
[11] Axial flux PM machines

a) Single rotor – single stator

b) Two rotor – single stator

c) Single rotor – two stator

d) Multistage structur



شکل۱-۱۳: ماشین‌های شار محوری

مزایای ماشین‌های شار محوری نسبت به ماشین‌های شارشعاعی را می‌توان به صورت زیر خلاصه کرد :

۱ -چگالی گشتاور در این ساختار بیشتر است.

۲ -فاصله هوایی در این ماشین‌ها قابل تنظیم است.

۳ -نویز و نوسان ماشین در این ساختار کمتر است.

۴ -این ساختار دارای وزن کمتر و طول محوری کوتاه‌تری می‌باشد.

۵ -خنک‌سازی وتهویه سیم‌پیچ‌های استاتور در این ساختار به خوبی انجام می‌شود.

۶ -برای افزایش فاصله هوایی موثر می‌توان از چند رتور و استاتور استفاده کرد.

۱-۳-۳ ماشین‌های مغناطیس دائم Line-start [۱۲]

همان‌طور که در شکل۱-۱۴ دیده‌می‌شود، LSPM یک ماشین مغناطیس دائم با یک قفس سنجابی در رتور می-باشد. قفسه سنجابی باعث‌می‌شود ماشین بدون کمک اینورتر راه‌اندازی شود. این ساختار به کمک قفسه سنجابی به صورت آسنکرون راه‌اندازی می‌شود و در حالت پایدار به صورت سنکرون عمل می‌کند[۳].

مزایای این ساختار نسبت به ماشین‌های القائی :

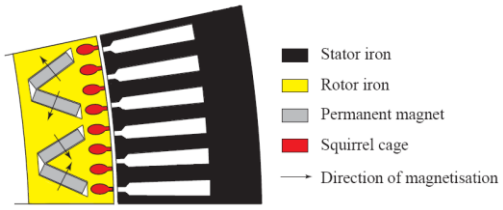
- راندمان بالا
- ضریب توان بیشتر

معایب این نسبت به ماشین‌های القائی :

- توانائی راه‌اندازی ماشین کاهش می‌یابد.
- هزینه ساخت بالا

در حال حاضر این ساختار کاربرد زیادی ندارد.

[12] Line-start PM machines



شکل۱-۱۴: ماشین Line-start

۱-۳-۴ ماشین‌های مغناطیس دائم عرضی[۱۳]

همان طور که در شکل۱-۱۵ مشاهده می‌شود، این ساختار دارای دو سیم‌پیچ استاتور است. مگنت‌ها در این ساختار بر روی روتور قرارگرفته‌اند. سیم‌پیچ‌های استاتور به شکل حلقه هستند که جهت جریان در آنها مطابق جهت چرخش روتور می‌باشد. شار در این ساختار به صورت عرضی در صفحات می‌چرخد[۳].

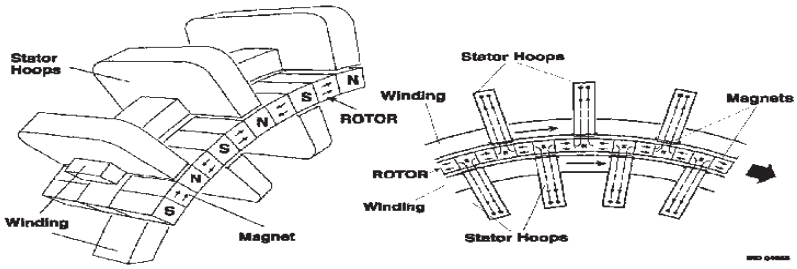
از مزایای این ماشین می‌توان به موارد زیر اشاره کرد :

- گشتاور بالا که اجازه می‌دهد ماشین فشرده شود.
- فقدان پیشانی کلاف در سیم‌پیچی استاتور که تلفات مسی را کاهش‌می‌دهد.

معایب اصلی این ماشین به شرح زیر است :

- ضریب توان پائین در گشتاورهای بالا
- پیچیدگی ساختار که هزینه ساخت را بالا می‌برد
- ریپل گشتاور بالا

این ساختار در حال حاضر کاربرد زیادی ندارد.



شکل۱-۱۵: ماشین مغناطیس دائم عرضی

[13] Transverse PM machines