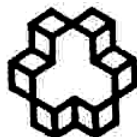


بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ



تاسیس ۱۳۰۷

دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی

دانشکده برق

بایان نامه کارشناسی ارشد

مهندسی برق - قدرت

بهبود عملکرد درایو کنترل مستقیم گشتاور در موتورهای القائی

استادان راهنما

دکتر شکرا... شکری دکتر علی خاکی صدیق

استاد مشاور

دکتر احمد رادان

نگارش

مهدی دلربائی

تیرماه

۱۳۸۲

تقریب به مردم که اینست از علم آخرت
به مردم که اینست از علم آخرت

راهنمایی اساتید گرامی در انجام این تحقیق
را ارج می نهم و از ایشان سپاسگزارم .

چکیده

در سالهای اخیر ، روشهای کنترل درایو موتورهای القائی - به عنوان جایگزینی برای سرو درایوهای DC - پیشرفتهای قابل توجهی داشته اند . در روش کنترل مستقیم گشتاور (DTC) ایده کنترل بر پایه انتخاب بردارهای ولتاژ مناسب ، به منظور محدود کردن شار و گشتاور داخل باندهای هیستریزس شار و گشتاور است . افزایش پهنای باند هیستریزس شار موجب افزایش تموج شار و هارمونیکهای جریان ، در نتیجه تلفات هارمونیکی می شود . همچنین افزایش پهنای باند گشتاور افزایش ضربانهای گشتاور ، در نتیجه افزایش ارتعاشات مکانیکی و نویز شنوایی را به دنبال خواهد داشت . اگر این باندها کوچک انتخاب شوند ، اشکالات ذکر شده برطرف می شوند اما در مقابل تلفات کلید زنی مبدل افزایش خواهد یافت .

یکی از مشکلات عمده درایوهای DTC ، فرکانس کلیدزنی غیر قابل پیش بینی مبدل است که در اثر تغییر سرعت ، شرایط بار و پارامترهای موتور تغییر می کند . در نتیجه بایستی پهنای باندهای هیستریزس به حدی بزرگ انتخاب شوند تا از افزایش بیش از حد فرکانس کلیدزنی جلوگیری شود . با تنظیم باندها در بدترین حالت کارائی درایو کاهش خواهد یافت . در این پایان نامه ، پس از بررسی اثر پهنای باندهای هیستریزس بر عملکرد درایو ، روشی ارائه خواهد شد تا با در نظر گرفتن حد اکثر فرکانس کلیدزنی مبدل ، پهنای باندها به نحوی انتخاب شوند که علاوه بر کاهش تموج شار و گشتاور ، فرکانس کلیدزنی نیز در حد مجاز باقی بماند . همچنین با کنترل دامنه شار مطابق با فرمان گشتاور ، بهبود بازده مورد توجه قرار گرفته است .

فهرست مطالب

فصل اول : مقدمه ای بر درایوهای کنترل گشتاور

۱-۱	مقدمه	۱
۲-۱	گشتاور القاء شده در یک موتور القائی	۱
۳-۱	روشهای کنترل موتورهای القائی	۶
۱-۳-۱	روشهای کنترل اسکالر	۷
۱-۱-۳-۱	کنترل ولتاژ و فرکانس	۷
۲-۱-۳-۱	کنترل جریان	۸
۲-۲-۱	روشهای کنترل برداری	۸
۱-۲-۲-۱	کنترل میدان گرا	۱۰
۲-۲-۲-۱	کنترل مستقیم گشتاور	۱۳
۴-۱	خلاصه	۱۴
	مراجع	۱۶

فصل دوم : کنترل مستقیم گشتاور در موتورهای القائی

۱-۲	مقدمه	۱۸
۲-۲	اصول درایوهای کنترل مستقیم گشتاور	۱۸
۳-۲	مبانی ریاضی و فیزیکی تولید گشتاور سریع	۲۱
۴-۲	انتخاب بهینه بردارهای کلید زنی ولتاژ	۲۸
۵-۲	مبانی تخمین شار استاتور و گشتاور الکترومغناطیسی	۳۰
۶-۲	خلاصه	۳۲
	مراجع	۳۳

فصل سوم : پیشرفتهای روش کنترل مستقیم گشتاور در موتورهای القائی

۱-۳	مقدمه	۳۴
۲-۳	کنترل مستقیم گشتاور موتورهای القائی بدون سنسور سرعت	۳۴
۱-۲-۳	درایوهای AC بدون سنسور	۳۴
۲-۲-۳	تکنیکهای پیشرفته کنترل مستقیم گشتاور موتورهای القائی بدون سنسور	
	سرعت	۳۶

۴۴	..... ۳-۳ کاهش موج شار استاتور و گشتاور الکترومغناطیسی
۴۶	..... ۴-۳ بهبود تخمین شار استاتور
۴۷	..... ۵-۳ کنترل بهینه بازده
۴۸	..... ۶-۳ بهبود انتخاب بردارهای کلیدزنی به کمک الگوریتم پیش بین
۵۰	..... ۷-۳ بررسی یک نمونه عملی درایو DTC بدون سنسور سرعت
۵۳	..... ۸-۳ خلاصه و نتیجه گیری
۵۵	..... مراجع

فصل چهارم : اثر باندهای هیستریزیس بر عملکرد درایو کنترل مستقیم گشتاور

۵۸	..... ۱-۴ مقدمه
۵۸	..... ۲-۴ شبیه سازی درایو کنترل مستقیم گشتاور
۶۲	..... ۳-۴ اثر پهنای باندهای هیستریزیس شار و گشتاور
۶۶	..... ۴-۴ قواعد ارزیابی عملکرد درایو
۶۹	..... ۵-۴ نتیجه گیری
۶۹	..... مراجع

فصل پنجم : بهبود عملکرد درایو کنترل مستقیم گشتاور

۷۰	..... ۱-۵ مقدمه
۷۰	..... ۲-۵ تعیین پهنای باندهای هیستریزیس و مرجع شار
۷۰	..... ۱-۲-۵ تعیین پهنای باند هیستریزیس شار
۷۲	..... ۲-۲-۵ تعیین پهنای باند هیستریزیس گشتاور
۷۳	..... ۳-۲-۵ تعیین سطح مرجع شار
۷۵	..... ۳-۵ نتایج شبیه سازی درایو DTC بهبود یافته
۸۶	..... مراجع

فصل ششم : تحلیل نتایج و پیشنهادها

۸۷ تحلیل نتایج و پیشنهادها
----	-------------------------------

پیوست

۹۰	..... پیوست (۱) : جزئیات سیستم شبیه سازی شده
۹۳	..... پیوست (۲) : نتایج عملی تغییر باندهای هیستریزیس

فهرست شکل ها

- شکل (۱-۱): یک ماشین AC با میدانهای مغناطیسی رتور و استاتور ۲
- شکل (۲-۱): مراحل القای گشتاور در یک موتور القایی ۳
- شکل (۳-۱): موتور القایی در حالت بی باری و زیر بار ۴
- شکل (۴-۱): نمودار گشتاور - سرعت یک موتور القایی ۵
- شکل (۵-۱): کنترل ولتاژ فرکانس با تنظیم فرکانس لغزش ۷
- شکل (۶-۱): مبدل PWM کنترل شده با جریان ، با کنترل فرکانس لغزش ۸
- شکل (۷-۱): موقعیت مکانی سیم پیچهای استاتور ۱۰
- شکل (۸-۱): دو روش کنترل میدان گرا در موتورهای القایی ۱۲
- شکل (۹-۱): نمونه کنترل برداری غیر مستقیم ۱۳
- شکل (۱۰-۱): ساختار ابتدائی روش کنترل مستقیم گشتاور ۱۴
- شکل (۱-۲): یک درایو DTC بر مبنای شار استاتور ۱۹
- شکل (۲-۲): بردارهای فضائی شار پیوستگی و جریان استاتور ۲۱
- شکل (۳-۲): بردارهای فضائی شار استاتور و رتور و جریان استاتور ۲۳
- شکل (۴-۲): مبدل PWM-VSI حالتی کلید زنی و بردارهای ولتاژ ۲۵
- شکل (۵-۲): کنترل بردار شار استاتور ۲۶
- شکل (۶-۲): نحوه تغییر موقعیت بردار شار استاتور ۲۷
- شکل (۷-۲): بردار شار و شش ناحیه ۲۹
- شکل (۱-۳): تخمین حلقه باز سرعت رتور با استفاده از پنج پارامتر موتور ۲۸
- شکل (۲-۳): مدار آشکار ساز ولتاژ هارمونیک سوم ۲۸
- شکل (۳-۳): تعیین سرعت رتور با استفاده از بردار شار استاتور ۳۹
- شکل (۴-۳): روش تخمین سرعت بر مبنای MRAS ۴۱
- شکل (۵-۳): یک روش تخمین سرعت تطبیقی ۴۲
- شکل (۶-۳): ساختار فیلتر کالمن تعمیر یافته ۴۳
- شکل (۷-۳): تخمینگر سرعت رتور بر مبنای MRAS حاوی یک ANN ۴۴
- شکل (۸-۳): شمای داخلی یک ANN دو لایه ۴۴
- شکل (۹-۳): کاهش موج شار و گشتاور با کاربرد دو مبدل PWM موازی ۴۵
- شکل (۱۰-۳): تخمینگر شار استاتور و رتور با کاربرد عنصر تاخیر دار مرتبه اول .. ۴۷

- شکل (۱۱-۳): نمائی از درایو DTC ساخت شرکت ABB ۵۱
- شکل (۱۲-۳): نتایج عملی بدست آمده از درایو ACS 600 ۵۳
- شکل (۱-۴): نمائی کلی روش DTC ۵۸
- شکل (۲-۴): نتایج شبیه سازی درایو DTC ۶۰
- شکل (۳-۴): نتایج شبیه سازی درایو DTC (ادامه) ۶۱
- شکل (۴-۴): بررسی اثر پهنای باندهای هیستریزس ۶۳
- شکل (۵-۴): بررسی اثر پهنای باندهای هیستریزس (ادامه) ۶۴
- شکل (۶-۴): بررسی اثر پهنای باندهای هیستریزس (ادامه) ۶۵
- شکل (۷-۴): نحوه تغییر ضریب THD ۶۷
- شکل (۸-۴): ضریب پراکندگی گشتاور بر حسب پهنای باند گشتاور ۶۸
- شکل (۹-۴): نحوه تغییر میانگین فرکانس کلید زنی مبدل ۶۸
- شکل (۱-۵): کنترل دامنه شار استاتور در درایو DTC ۷۱
- شکل (۲-۵): مؤلفه های عمودی و افقی بردار شار استاتور ۷۱
- شکل (۳-۵): اثر کاهش سطح شار بر تلفات بی باری و سطح نویز شنوایی ۷۴
- شکل (۴-۵): نمودار بردارهای جریان ۷۴
- شکل (۵-۵): نمائی کلی روش DTC بهبود یافته ۷۶
- شکل (۶-۵): نتایج شبیه سازی روش ارائه شده ۷۷
- شکل (۷-۵): ولتاژ استاتور و فرکانس کلید زنی مبدل در روش ارائه شده ۷۸
- شکل (۸-۵): ولتاژ استاتور و فرکانس کلید زنی مبدل در درایو DTC متداول ۷۹
- شکل (۹-۵): مقایسه نتایج شبیه سازی درایو DTC متداول و روش پیشنهاد شده ۸۱
- شکل (۱۰-۵): مقایسه نتایج شبیه سازی درایو DTC متداول و روش پیشنهاد شده (ادامه) ۸۲
- شکل (۱۱-۵): شکل موج مرجع گشتاور؛ به منظور بررسی کارائی درایو پیشنهادی ۸۳
- شکل (۱۲-۵): مقایسه عملکرد دو درایو حین تغییر مرجع گشتاور ۸۴
- شکل (۱۳-۵): مقایسه عملکرد دو درایو حین تغییر مرجع گشتاور (ادامه) ۸۵

فهرست جدول ها

- جدول (۱-۲): جدول انتخاب بهینه بردارهای کلیدزنی ۲۹
- جدول (۲-۲): تعیین ناحیه بردار فضائی شار استاتور ۳۰

فهرست علائم و اختصارات

AC	جریان متناوب
DC	جریان مستقیم
DTC	کنترل مستقیم گشتاور
FD	کاهش شار
FI	افزایش شار
$D, (d)$	مولفه افقی
$Q, (q)$	مولفه عمودی
TD	کاهش گشتاور
TI	افزایش گشتاور
T_d	پراکندگی گشتاور
THD	اعوجاج کلی هارمونیکی جریان
VSI	مبدل منبع ولتاژ
B_R	بردار چگالی شار رتور
B_S	بردار چگالی شار استاتور
B_m	چگالی شار ماکزیمم
B_{net}	بردار کل چگالی شار مغناطیسی
e_{ind}	ولتاژ القاء شده در میله های رتور
f	فرکانس ورودی
F_s	فرکانس کلید زنی مبدل
n_s	سرعت سنکرون
N_s	تعداد کلید زنی در یک پریود کامل
P	تعداد زوج قطب
U_{BA}, U_{AC}	بردارهای ولتاژ خط استاتور
U_s	بردار ولتاژ استاتور
U_k, U_i	بردار ولتاژ خروجی مبدل
V	سرعت میله های رتور
L	طول میله های رتور
V_s	بردار ولتاژ استاتور
V_s	ولتاژ تغذیه استاتور

w_b	فرکانس زاویه ای مینا
w_s	فرکانس تغذیه استاتور
i_{as}, i_{bs}, i_{cs}	جریانهای اعمال شده به سیم پیچهای استاتور
i_s	بردار جریان استاتور
I	مقدار موثر جریان
I_0	جریان معادل هسته
I_1	هارمونیک اول جریان
t_c	دوره تناوب اساسی
T	مقدار لحظه ای گشتاور
T_0	مقدار میانگین گشتاور
τ_c	گشتاور الکترومغناطیسی
τ_{ref}	مرجع گشتاور
τ_{ind}	گشتاور القاء شده در ماشین
τ_L	گشتاور بار
$d\tau_c$	پرچم گشتاور
τ_m	گشتاور الکترومغناطیسی ماکزیمم
$\Delta\tau_c$	پهنای باند گشتاور
ψ_s	بردار شار استاتور در دستگاه مرجع ساکن
ψ_r	بردار شار رتور در دستگاه مرجع ساکن
ψ_{sref}	مرجع شار استاتور
$\Delta\psi_s$	پهنای باند شار
$\Delta\psi_{sx}$	مولفه افقی تغییر بردار شار
$\Delta\psi_{sy}$	مولفه عمودی تغییر بردار شار
$d\psi_s$	پرچم شار
α	شتاب رتور
α_s	زاویه بردار جریان استاتور نسبت به محور مستقیم
ρ_s	زاویه بردار شار استاتور نسبت به محور مستقیم
ρ_r	زاویه بردار شار رتور نسبت به محور مستقیم
δ	زاویه بردار چگالی شار استاتور و بردار کل چگالی شار
γ	زاویه دو بردار شار رتور و استاتور
λ	زاویه بردار شار و بردار ولتاژ اعمال شده
θ_R	زاویه ضریب توان

فصل اول مقدمه‌ای بر درایوهای کنترل گشتاور

۱-۱ مقدمه

بیش از یکصد سال از ساخت اولین موتور القائی می‌گذرد و در خلال این سالها موتورهای القائی به سبب ارزان بودن نسبی و عدم نیاز به تعمیر و نگهداری جدی نقشی فراگیر در صنعت یافته‌اند. از کاربردهای این موتورها می‌توان به موارد زیر اشاره کرد:

- کنترل سرعت پنکه‌های صنعتی، کمپرسورها، پمپها، دمنده‌ها، آسیابها و...
- محرک قطارها، جرثقیلها، ماشینهای حفاری، بالابرها و...
- به عنوان سرو درایو در انواع ماشین ابزار، رباتها، پرینترها و...

اگرچه مهمترین مزیت این موتورها بی‌نیازی به حلقه‌های لغزان و کموتاتور است. اما هنگام راه‌اندازی، ترمز و کنترل سرعت و گشتاور، سیستم کنترل ماشین نیازمند توجه بیشتری است. در این بخش پس از مروری اجمالی بر روشهای کنترل موتورهای القائی و درایوهای کنترل گشتاور به بررسی روش کنترل مستقیم گشتاور پرداخته می‌شود. روش کنترل مستقیم گشتاور (DTC) یک ایده روشمند در بهبود مشخصات عملکرد درایو موتورهای القائی است که براساس کنترل مستقیم شار استاتور و گشتاور الکترومغناطیسی مطرح شده است.

انتظار می‌رود با پیشرفتهای سریعی که در علوم میکروالکترونیک روی می‌دهد، کنترل گشتاور انواع ماشینهای AC در سطح وسیعتری مورد استفاده واقع شود و هرچند پاسخ دینامیکی سریع مورد نظر نباشد، عمل کنترل با کارائی بالاتر و قابلیت اطمینان بیشتر انجام شود. تحقیقات نشان می‌دهند با کاربرد کنترل هوشمند شار پیوستگی و گشتاور الکترومغناطیسی، می‌توان در مصرف انرژی نیز صرفه‌جویی نمود.

۲-۱ گشتاور القاء شده در یک موتور القائی

در یک ماشین AC که تحت شرایط عادی کار می‌کند، دو میدان مغناطیسی وجود دارد. میدان مغناطیسی مدار رتور و میدان مغناطیسی مدار استاتور. از تداخل عمل

(اندر گنیش^(۱)) این دو میدان مغناطیسی گشتاور القاء شده^(۲) در ماشین ایجاد خواهد شد.

در شکل (۱-۱) چکالی شار رتور B_R و چکالی شار استاتور B_S به ترتیب توسط جریانهای رتور و استاتور ایجاد شده‌اند و گشتاور القاء شده در ماشین از رابطه زیر بدست می‌آید که در آن K ضریبی است ثابت و γ زاویه بین دو بردار چکالی شار مذکور.

$$\tau_{ind} = K B_R \times B_S = K B_R B_S \sin \gamma \quad (1-1)$$

در این ماشین کل میدان مغناطیسی برابر است با جمع برداری میدانهای رتور و استاتور.

$$B_{net} = B_R + B_S \quad (2-1)$$

از این رابطه می‌توان برای تعریف معادلی که گاهی مفیدتر است استفاده نمود.

$$\tau_{ind} = K B_R \times B_S = K B_R \times (B_{net} - B_R)$$

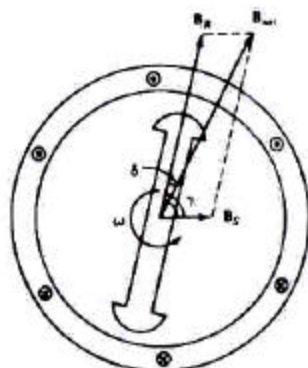
$$\tau_{ind} = K (B_R \times B_{net}) - K (B_R \times B_R)$$

و از آنجا که ضرب هر بردار در خودش صفر است:

$$\tau_{ind} = K B_R \times B_{net} \quad (3-1)$$

با فرض δ زاویه میان بردار چکالی شار رتور و بردار معادل

$$\tau_{ind} = K B_R B_{net} \sin \delta \quad (4-1)$$



شکل (۱-۱): یک ماشین AC با میدانهای مغناطیسی رتور و استاتور

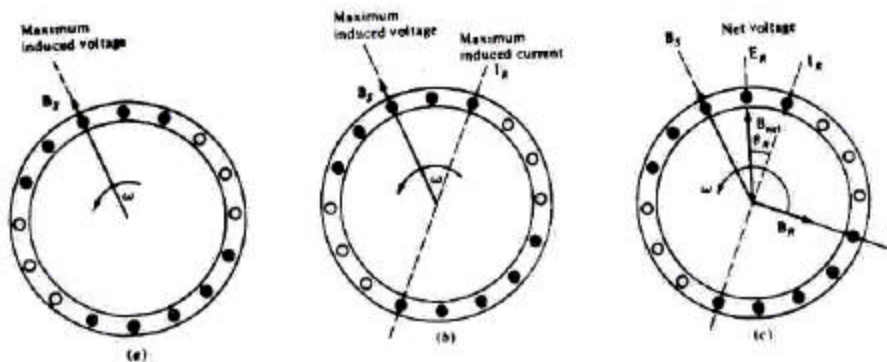
یک موتور القائی قفس سنجایی در شکل (۲-۱) نشان داده شده. یک سری ولتاژ سه فاز به استاتور تحویل شده و جریانه‌های سه فاز در مدار استاتور جاری می‌شوند. این جریانه‌ها منجر به ایجاد میدان مغناطیسی B_S می‌شوند که در جهت خلاف عقربه‌های ساعت با سرعتی برابر با n_s می‌چرخد.

$$n_s = 120 f / P \quad (5-1)$$

میدان B_S از بالای میله‌های رتور عبور کرده و ولتاژی برابر با e_{ind} در آنها القا می‌کند:

$$e_{ind} = (V \times B_S) \cdot L \quad (6-1)$$

که در آن V سرعت میله‌های رتور نسبت به میدان مغناطیسی و L طول این میله‌ها است. این حرکت نسبی رتور در مقایسه با میدان استاتور باعث القای ولتاژ در میله‌های رتور و در نتیجه پخش جریان در آنها می‌شود که این جریان میدان مغناطیسی B_R را تولید می‌کند. این دو میدان مغناطیسی طبق روابط (۱-۱) تا (۳-۱) در موتور تولید گشتاور می‌کنند و موتور در همان جهت شتاب می‌گیرد.

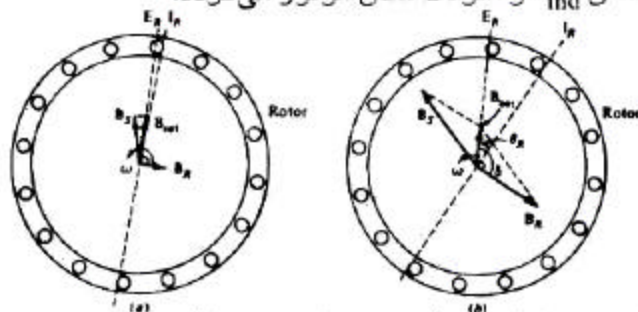


شکل (۲-۱): مراحل القای گشتاور در یک موتور القائی

(a) میدان گردان استاتور در میله‌های رتور تولید ولتاژ می‌کند (b) ولتاژ رتور به پخش جریان در آن منجر می‌شود که به سبب اندوکتانس رتور با ولتاژ اختلاف فاز دارد (c) جریان رتور، میدان مغناطیسی B_R با اختلاف فاز 90° را تولید می‌کند. B_{net} با B_S تداخل می‌کند تا گشتاور ایجاد شود. شکل (۳-۱) یک موتور القائی را در حالت بدون بار و زیر بار نشان می‌دهد. در حالت بی‌باری لغزش رتور بسیار کم بوده و ولتاژ کمی را در میله‌های رتور القاء می‌کند (شکل (۳-۱) (a)). در نتیجه جریان رتور کم خواهد بود و به دلیل کوچک بودن فرکانس رتور، راکتانس آن تقریباً برابر صفر بوده و حداکثر جریان با ولتاژ رتور

تقریباً هم فاز است. بدین ترتیب جریان رتور، میدان مغناطیسی کوچک B_R را در زاویه‌ای کمی بزرگتر از 90° نسبت به B_{net} تولید می‌کند. نکته قابل توجه آن است که جریان استاتور حتی در حالت بی‌باری هم باید به اندازه‌ای باشد تا میدان مغناطیسی لازم را فراهم کند. میدان مغناطیسی کل، B_{net} ، در این ماشین توسط پخش جریان مغناطیس‌کنندگی در مدار معادل رتور ایجاد می‌شود. مقدار این جریان و در نتیجه میدان مغناطیسی کل با ولتاژ تحویلی به رتور نسبت مستقیم دارند. با توجه به اینکه ولتاژ تحویلی به رتور تقریباً ثابت است، میدان مغناطیسی کل نیز نسبت به تغییرات بار ثابت است [1]. به همین علت است که جریانهای بدون بار در موتورهای القائی بیشتر از انواع دیگر ماشینها است. در این حالت گشتاور القاء شده کم بوده و تنها برای غلبه بر تلفات سرگردان رتور کافی است.

حال فرض کنیم موتور تحت بار قرار گرفته است (شکل ۱-۳(b)). در حالیکه بار موتور افزایش می‌یابد بر لغزش آن افزوده شده و سرعت رتور افت می‌کند. اکنون به سبب کاهش سرعت رتور و حرکت نسبی بیشتر ولتاژ القاء شده در رتور افزایش یافته و در نتیجه جریان رتور و B_R نیز افزایش می‌یابند. از آنجا که لغزش رتور بیشتر است، فرکانس آن بالا رفته و راکتانس رتور افزایش یافته و میدان مغناطیسی B_R جابجا می‌شود. باید توجه داشت که B_R و زاویه δ هر دو افزایش یافته‌اند. افزایش در B_R تمایل به افزایش گشتاور دارد، در حالیکه افزایش در زاویه δ سعی در کاهش آن (گشتاور متناسب است با $\sin \delta$ ، $\delta > 90^\circ$). از آنجا که اثر اول قوی‌تر است، رویهم رفته گشتاور القاء شده افزایش می‌یابد، تا قادر به تأمین بار افزون شده باشد. در صورتیکه حین افزایش بار، کاهش $\sin \delta$ بیش از افزایش B_R باشد، افزایش بار منجر به کاهش T_{ind} و متوقف شدن موتور می‌گردد.



شکل (۱-۳): (a) موتور القائی در حالت بی‌باری (b) موتور القائی زیر بار

با در نظر گرفتن مطالب بیان شده، جهت بررسی رفتار ماشین هریک از اجزاء را می‌توان جداگانه مدنظر قرار داد. اجزاء تفکیک شده عبارتند از:

۱. B_p : تا زمانی که رتور اشباع نشده است، میدان مغناطیسی آن با پخش جریان نسبت مستقیم دارد. پخش جریان نیز در رتور با افزایش لغزش افزایش می‌یابد [1]. نمودار این پخش جریان در شکل (۱-۴(a)) نشان داده شده است.

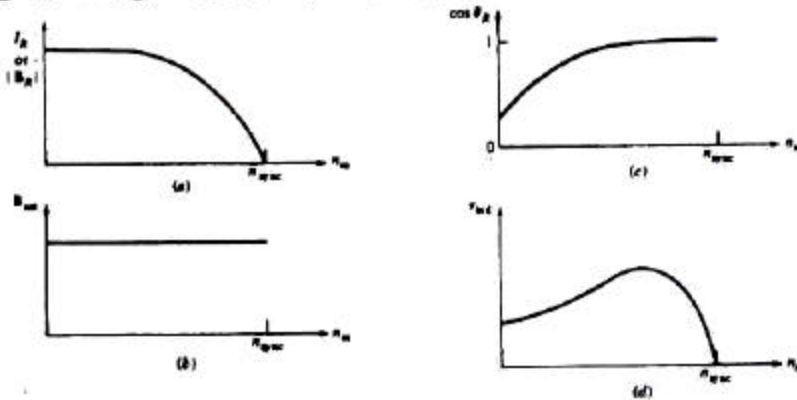
۲. B_{net} : کل میدان مغناطیسی موتور با ولتاژ القا شده به رتور متناسب است. ولتاژ القا شده به رتور با افزایش جریان اندکی کاهش می‌یابد اما این اثر قابل چشم‌پوشی است. بنابراین میدان مغناطیسی کل تقریباً ثابت است. نمودار (۱-۴(b)) منحنی B_{net} را در مقابل سرعت نشان می‌دهد.

۳. δ : زاویه δ زاویه بین میدان مغناطیسی کل و رتور، برابر است با زاویه ضریب توان رتور به اضافه 90° [1].

$$\delta = \theta_R + 90$$

$$\sin \delta = \cos \theta_R = \text{P.f.}_R \quad (7-1)$$

نمودار ضریب توان رتور در برابر سرعت در شکل (۱-۴(c)) رسم شده است. چون گشتاور القاء شده با حاصل ضرب این سه جزء برابر است می‌توان مشخصه گشتاور - سرعت یک موتور القائی را از ضرب گرافیکی سه نمودار قبلی بدست آورد. شکل (۱-۴(d)) مشخصه گشتاور - سرعت یک موتور القائی را نشان می‌دهد.



شکل (۱-۴): نمودار گشتاور - سرعت یک موتور القائی (a) نمودار جریان رتور ($|B_R|$) (b) نمودار میدان مغناطیسی کل (c) نمودار ضریب توان رتور (d) مشخصه گشتاور - سرعت بدست آمده

۳-۱ روشهای کنترل موتورهای القائی

هنکامیکه یک موتور القائی با گشتاور ثابت و بی‌نیاز از تنظیم دقیق سرعت کار می‌کند کنترل حلقه باز ماشین با تغییر ولتاژ و فرکانس بدون اشکال است. اما در صورتیکه رفتار دینامیکی ماشین و کنترل دقیق سرعت و گشتاور تأثیر قابل توجهی بر عملکرد کلی سیستم داشته باشد، کنترل حلقه باز نتایج رضایت بخشی ندارد و کنترل حلقه بسته الزامی است. از طرفی گشتاور در موتور القائی به دو عامل شار فاصله هوایی و سرعت بستگی دارد اما روابط گشتاور برحسب شار و گشتاور برحسب سرعت خطی نیستند و این عامل مهمی است که طراحی سیستم کنترل موتورهای القائی را پیچیده می‌سازد [3-11].

روشهای متعددی جهت کنترل موتورهای القائی ارائه شده‌اند که به دو دسته کلی قابل تقسیم هستند:

● کنترل اسکالر:

- کنترل ولتاژ و فرکانس
- کنترل جریان استاتور و فرکانس لغزش

● کنترل برداری:

- کنترل میدان گرا^(۱)
 - روش غیرمستقیم
 - روش مستقیم
 - کنترل مستقیم شار و گشتاور
- در بخشهای آینده روشهای مذکور اجمالاً شرح داده شده، مزایا و معایب هر کدام بررسی خواهد شد.

1- Field Oriented Control (FOC)

۱-۳-۱ روشهای کنترل اسکالر

۱-۳-۱-۱ کنترل ولتاژ و فرکانس

به منظور ایجاد بیشترین میزان گشتاور نسبت به جریان استاتور و در نتیجه بهترین استفاده از ظرفیت جریانی درایو، سطح شار ماشین بایستی ثابت و نزدیک به مقدار نامی آن نگه داشته شود. به منظور کارکرد در سطح شار ثابت دو پارامتر قابل کنترل، ولتاژ تغذیه استاتور V_s و فرکانس w_s بایستی متناسب با شرایط کار تنظیم شوند. رابطه (۸-۱) نشان می‌دهد که در صورت ثابت ماندن نسبت ولتاژ به فرکانس، شار فاصله هوایی ثابت می‌ماند.

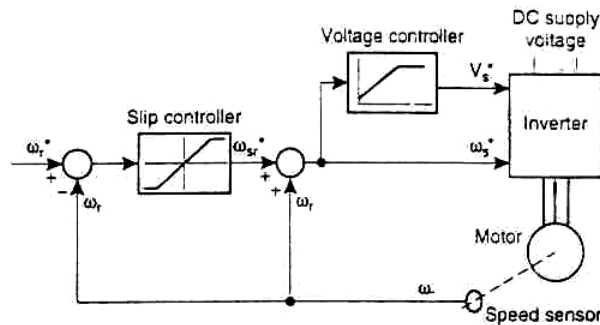
$$\psi_s = \frac{V_s}{K_m \cdot w_s} \quad (8-1)$$

رابطه (۹-۱) نیز نشان می‌دهد که حداکثر گشتاور (که مستقل از فرکانس است) را می‌توان تقریباً ثابت نگه داشت [2].

$$T_m = \frac{3}{2 \cdot w_b (X_s + X_r)} \cdot \left(\frac{V_s}{\beta} \right)^2 \quad (9-1)$$

$$w_s = \beta W_b$$

البته در فرکانسهای پائین، شار فاصله هوایی به خاطر کاهش امپدانس استاتور کم می‌شود و در نتیجه ولتاژ باید افزایش یابد تا بتوان گشتاور را ثابت نگه داشت. روش ساده‌ای از کنترل $\frac{V}{f}$ در شکل (۵-۱) مشاهده می‌شود.



شکل (۵-۱): کنترل ولتاژ فرکانس با تنظیم فرکانس لغزش [12]

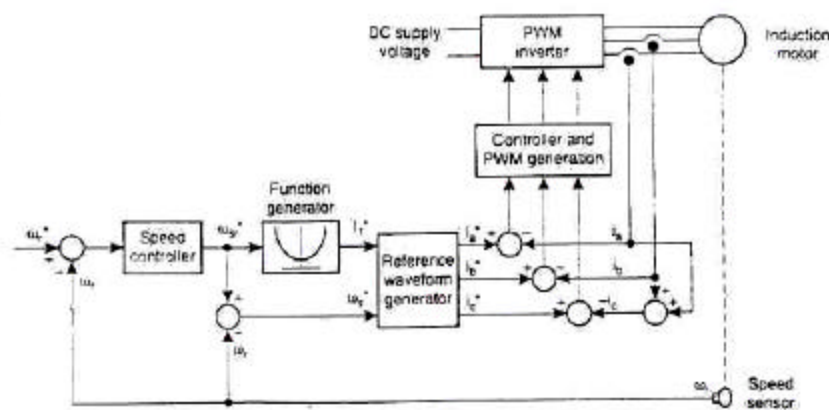
از آنجا که فرکانس نسبت نزدیکی با سرعت رتور داشته و بسته به نیاز موتور اعمال می‌شود، تنها پارامتری که بطور مستقل جهت تنظیم شار در دست است ولتاژ استاتور، می‌باشد. روش کنترل ولتاژ فرکانس در شکل (۵-۱) مشاهده می‌شود.

شار ثابت تعریف شده است. جهت توضیحات بیشتر به مرجع [13] مراجعه شود.

۲-۱-۳-۱ کنترل جریان

یک سیستم کنترل موتور القائی بصورت مبدل PWM کنترل شده با جریان^(۱) در شکل (۶-۱) مشاهده می‌شود.

در این نوع مبدل، جریانهای مبنای سینوسی سه فاز با مقادیر لحظه‌ای جریان موتور مقایسه می‌شوند و مقدار خطا (اختلاف جریانها) به قسمت کنترل کننده و تولید پالسهای PWM ارسال می‌شوند. مقادیر جریانهای مبنای واحد تولید شکل موج مبنا بدست آمدادند.



شکل (۶-۱) مبدل PWM کنترل شده با جریان، با کنترل فرکانس لغزش [12]

مقدار فرکانس استاتور نیز با اضافه کردن سیگنال فرکانس لغزش به سیگنال فرکانس رتور که از حسگر ارسال شده بدست می‌آید. همچنین فرکانس لغزش، که می‌تواند خروجی کنترل کننده سرعت باشد یا از طریق یک جدول مقادیر لغزش که بازده را بهینه می‌سازد، بدست می‌آید. جهت توضیحات بیشتر به مرجع [13] مراجعه شود.

۲-۳-۱ روشهای کنترل برداری

در حالت ماندگار، کنترل موتور القائی با استفاده از مبدلهای AC به خوبی

1- Current Controlled PWM (Pulse Width Modulation) Inverter.

موتورهای DC با تحریک جداگانه انجام می‌شود، اما در حالت گذرا عمل کنترل به آن خوبی نیست. منظور از عملکرد گذرا، میزان سرعتی است که موتور به تغییرات فرمانهای سرعت و گشتاور پاسخ می‌دهد. بنابراین علی‌رغم پیشرفتهایی که در جهت طراحی مبدل‌های AC با قابلیت اطمینان زیاد و عملکرد مناسب انجام شده، در مواردی که به عملکرد حالت گذرای سریع نیاز بوده، موتورهای DC جایگاه خود را در صنعت حفظ کرده‌اند.

در یک موتور DC، به دلیل اینکه مدار آرمیچر و مدار میدان به صورت مغناطیسی مجزا (دکوپله) هستند، عملکرد دینامیکی از کیفیت بالایی برخوردار است. در این نوع موتورها mmf ساخته شده توسط جریان آرمیچر و mmf ساخته شده توسط جریان میدان، به صورت فضائی عمود بر هم هستند. بنابراین تزویج مغناطیسی میان مدار میدان و مدار آرمیچر از میان می‌رود و این عمل به دلیل کلیدزنی مکرر کموتاتورها (مستقل از موقعیت زاویه‌ای رتور) ادامه می‌یابد. بدین ترتیب هرگونه تغییر در جریان آرمیچر بدون ایجاد مانع به وسیله اندوکتانس میدان به سرعت تأثیر خود را بر عملکرد موتور نشان می‌دهد. اما به این دلیل که در موتورهای القائی توان صرفاً از سمت استاتور تغذیه می‌شود، جریان تولیدکننده گشتاور و جریان تولیدکننده شار به راحتی قابل جداسازی نیستند (گشتاور نتیجه تقابل شار و جریان است). در سالهای اخیر تحولی در روشهای کنترل موتورهای AC ایجاد شده که کنترل برداری نامیده می‌شود و این نوع کنترل تغییراتی بنیادین در خصوص عملکرد حالت گذرای این ماشینها ایجاد کرده است.

نظریه کنترل برداری اول بار در سال ۱۹۶۹ مطرح شد [14] ولی نتوانست جای خود را در صنایع باز کند زیرا نیاز به انجام محاسبات زیاد در زمان کم بود و در آن زمان میکروپروسسورها این توانائی را نداشتند. اولین کاربرد عملی این نظریه تحت عنوان کنترل میدان‌گرا در سال ۱۹۷۱ مطرح شده است [15].

کنترل برداری با جداسازی دو مؤلفه جریان (تولیدکننده شار و تولیدکننده گشتاور) ممکن ساخت تا یک موتور AC مشابه با یک موتور DC تحریک جداگانه و با همان کیفیت پاسخ حالت گذرا کنترل شود.

کنترل برداری این حقیقت را مشخص کرد که عملکرد دینامیکی نامناسب یک موتور القائی به دلیل محدودیتهای ذاتی آن نیست بلکه به نحوه تغذیه موتور و