

الله الرحمن الرحيم



دانشکده برق و رباتیک

پایان نامه کارشناسی ارشد

گرایش برق قدرت

مدل سازی و کنترل توربین بادی سرعت متغیر مجهز به ژنراتور القایی تغذیه

دوگانه در حالت های خطای شبکه

صابر نقدی گنجی

استاد راهنما:

دکتر احمد دارابی

استاد مشاور:

دکتر محسن اصیلی

تابستان ۱۳۹۰

تقدیم بہ

پدر عزیزم

برپاس دیای بی کران صبر و سخاوتش
او کہ در طوفان زندگی، همچون کوهی استوار بر ایمن تکیہ گاہی بی ہمتاست

و مادر دلسوزم

بر یاد لحظہ لحظہ عشقی کہ شمارم کرد
او کہ برب تر نعم دعا دارد و در دل عشقی سوزان

و بہ ہمسر مہربانم

او کہ با نجابت معصومانہ و محبت دلنوازش ہموارہ سردی یاس را از ضمیر وجودم می زداید
ہمو کہ یادش سیان آرامشم است و دستہایش مرا بہ آرزو ہایم پیوند می دہد.

و برادرانم

ہمانان کہ تا ہمیشہ نگاہم محتاج نگاہ مہربانان خواہد بود

مشکر و قدردانی

در ابتدا اجازه می‌خواهم سپاس و تشکر ویژه خود را به استاد بزرگوارم، جناب آقای دکتر احمد دارابی نثار کنم.

چه بسا که نظر لطف ایشان در جای‌جای این پایان‌نامه قابل مشاهده است.

در اینجا جادار و از تلاش‌های جناب آقای دکتر محسن اصیلی، استاد مشاور عزیز بنده به دلیل همکاری مؤثر

ایشان در به‌ثمر رسیدن این پایان‌نامه کمال تشکر و قدردانی را داشته باشم.

همین‌طور سپاس بی‌دریغ خود را نثار و پدر و مادر عزیزم که پشتوانه روحی بنده بودند و همسر مهربانم که محظی آرام را

برای بنده فراهم کردند، می‌کنم.

صابر نقدی گنجی

تابستان ۱۳۹۰.

چکیده

بسیاری از کشورهای توسعه یافته در پی استفاده از انرژی باد در مناطق دورافتاده، محروم و مناطق نظامی-عملیاتی هستند. همچنین در صنایع دفاع از این طریق می‌توان انرژی لازم برای ابزار و تجهیزات نظامی در مناطق پشتیبانی نظامی را فراهم نمود. در حال حاضر این امکان سنجی در مناطق آبی کشورمان نیز بوجود آمده که مزارع بادی را در دریاها از جمله دریای خزر، خلیج فارس و دریای عمان بنا نهیم. همچنین در مقیاسی کوچکتر می‌توان توربین های بادی قابل حمل را ساخت و به تولید انبوه رساند. با نفوذ رو به رشد توربین‌های بادی، مطالعه و تحقیق در مورد رفتار آن‌ها در هنگام اغتشاشات گذرا و پشتیبانی از آن‌ها با قابلیت‌های در مدار باقی ماندن در حین خطا، تبدیل به یک ضرورت شد. این قابلیت بدان معناست که تمام واحدهای تولیدی، از جمله واحد تولیدی باد، باید توانایی متصل باقی ماندن در هنگام خطاها و حالت‌های کاهش ولتاژ را در محدوده مشخصی را داشته باشند. در بین انواع ژنراتورهای به کار رفته در توربین‌های بادی، ژنراتورهای القایی تغذیه دوگانه دارای قابلیت‌های بسیار جالبی هستند. در این پایان نامه ابتدا با استفاده از معادلات و روابط کنترل برداری میدان گرا، شارها و جریان‌های مرجع بدست آمد. سپس با استفاده از روش کنترل گشتاور مستقیم جریان‌های پیش‌گویانه ارائه شد. برخلاف روش‌های موجود که معمولاً از روش کروربار جهت در مدار باقی ماندن توربین بادی از آن استفاده می‌کنند در روش پیشنهادی نیازی به استفاده از تجهیزات اضافی نیست و جریان‌های رتور در هنگام خطا کنترل شده بدست خواهند آمد. چگونگی این مطلب نیز به وسیله نتایج شبیه سازی بررسی شده است. در پایان نیز رفتار گذرای ماشین در حین و بعد از خطای شبکه در ولتاژ ترمینال به عنوان نمونه، شبیه سازی شده است. نتایج حاکی از آن است که روش پیشنهادی در مقایسه با روش‌های مرسوم این معیار کارایی را بهبود بخشیده است.

کلید واژه‌ها: در مدار باقی ماندن هنگام خطا، ژنراتور القایی تغذیه دوگانه، شبیه سازی، کنترل توربین بادی.

فهرست مطالب

صفحه	عنوان
د.....	فهرست علایم و نشانه‌ها.....
ح.....	فهرست جدول‌ها.....
ط.....	فهرست شکل‌ها.....
۲.....	فصل ۱- مروری بر کارهای گذشته.....
	۱-۱- مقدمه ۲
۴.....	۲-۱- پیشینه پژوهشی.....
۱۰.....	۳-۱- ساختار گزارش.....
۱۲.....	فصل ۲- انرژی باد و مروری بر ژنراتورهای بکار رفته در توربین های بادی.....
	۱-۲- مقدمه ۱۲
۱۳.....	۲-۲- آمار نیروگاه بادی نصب شده در ایران و جهان.....
۱۶.....	۳-۲- معادلات پایه مربوط به انرژی باد.....
۱۷.....	۴-۲- محاسبه توان استخراجی از باد.....
۲۲.....	۱-۴-۲- کنترل انحرافی ناسل توربین بادی.....
۲۲.....	۲-۴-۲- کنترل توان با تغییر زاویه پره.....
۲۳.....	۳-۴-۲- کنترل توان با روش استال.....
۲۳.....	۴-۴-۲- کنترل استال فعال.....
۲۴.....	۵-۲- معرفی انواع ژنراتورهای بکار رفته در توربینهای بادی.....
۲۵.....	۱-۵-۲- ژنراتورهای القایی.....
	۱-۵-۲- قفس سنجابی ۲۶

- ۲-۱-۵-۲- ژنراتور القایی رتور سیم پیچی شده ۲۹
- ۲-۱-۵-۳- ژنراتورهای القایی تغذیه دوگانه ۳۰
- ۲-۵-۲- ژنراتورهای سنکرون ۳۴
- ۱-۲-۵-۲- ژنراتور سنکرون با تحریک کلاسیک ۳۵
- ۲-۲-۵-۲- ژنراتورهای سنکرون با تحریک آهنربای دائم ۳۵
- ۶-۲- مقایسه انواع ژنراتورهای بکار رفته در نیروگاههای بادی ۳۶

فصل ۳- مدلسازی توربین بادی با ژنراتور القایی تغذیه دوگانه ۴۰

- ۱-۳- مقدمه ۴۰
- ۲-۳- مدل آیرودینامیک پره ۴۰
- ۳-۳- مدل جعبه دنده ۴۲
- ۴-۳- مدلسازی ژنراتور القایی ۴۴
- ۵-۳- بررسی مرتبه های مختلف یک مدل ژنراتور القایی ۴۹
- ۶-۳- مدل سازی مبدل فرکانسی ۵۰
- ۷-۳- مدل مدار کنترل رتور ۵۱

فصل ۴- بررسی و شبیه سازی ژنراتور القایی تغذیه دوگانه با استفاده از روش کنترلی جریان

پیشگویانه ۵۵

- ۱-۴- مقدمه ۵۵
- ۲-۴- روش کنترل مستقیم گشتاور DTC ۵۵
- ۱-۲-۴- اصول روش DTC ۵۵
- ۲-۲-۴- معادله گشتاور بر مبنای شار استاتور و رتور ۵۶
- ۳-۲-۴- نحوه محاسبه شار و گشتاور ۵۸
- ۴-۲-۴- پیاده سازی روش DTC با استفاده از اینورتر منبع ولتاژ سه فاز ۵۹
- ۵-۲-۴- منطق انتخاب بردارهای کلیدزنی ۶۱

۶۴	.....FOC روش جهت یابی شار	۳-۴
۶۶	..... طرح اساسی کنترل جهت یابی میدان	۱-۳-۴
۶۷	..... کنترل مستقیم جهت یابی میدان	۲-۳-۴
۶۹	..... مدولاسیون بردار فضایی سنتی (SVM)	۳-۳-۴
۷۲	..... کنترل جریان پیش‌گویانه	۴-۴
۷۲	..... کنترل جریان پیش‌گویانه در اینورتر تکفاز	۱-۴-۴
۷۵	..... کنترل جریان پیش‌گویانه اینورتر سه فاز	۲-۴-۴
۷۶	..... معادلات حاکم بر کنترل جریان پیش‌گویانه	۵-۴
۸۲	..... ارزیابی روش کنترلی پیشنهادی با استفاده از شبیه‌سازی	۶-۴
۸۸	..... شرح عملکرد چند بلوک به کار رفته در شبیه‌سازی	۷-۴
۹۱	..... نتیجه‌گیری و پیشنهادها	۵
۹۱	..... نتیجه‌گیری	۱-۵
	..... پیشنهادها	۲-۵
۹۴	..... فهرست مراجع	
۹۷	..... واژه‌نامه‌ی فارسی به انگلیسی	
۱۰۰	..... واژه‌نامه‌ی انگلیسی به فارسی	

فهرست علائم و نشانه‌ها

عنوان	علامت اختصاری
انرژی جنبشی	E
جرم	m
سرعت باد	V_w
چگالی وزنی هوا	ρ
سطح موثر	A
ضریب توان رتور	C_p
نسبت سرعت خطی نوک پره‌ها به سرعت باد	λ
سرعت زاویه‌ای نوک پره‌ها	w_{rot}
زاویه گام پره	θ
زمان	t
تعداد قطب‌ها	P
فرکانس	f
سرعت خطی	n
سرعت مکانیکی محور	ω_m
سرعت زاویه‌ای ولتاژ استاتور	ω_s
سرعت زاویه‌ای ولتاژ رتور	ω_r
لغزش	s
توان استاتور	P_s
توان رتور	P_r

P_m	توان مکانیکی محور
β	زاویه پره
D_t	میرایی خودی توربین
D_g	میرایی خودی ژنراتور
D_m	میرایی متقابل
K_{sh}	سختی محور
T_T	گشتاور توربین
T_{sh}	گشتاور محور
J_t	ضریب اینرسی توربین
J_g	ضریب اینرسی ژنراتور
ω_t	سرعت زاویه‌ای توربین
ω_g	سرعت زاویه‌ای ژنراتور
θ_t	زاویه توربین
θ_g	زاویه ژنراتور
v_{ds}	ولتاژ استاتور محور d ژنراتور
v_{qs}	ولتاژ استاتور محور q ژنراتور
v_{os}	ولتاژ استاتور محور خنثی ژنراتور
v_s	ولتاژ استاتور ژنراتور
v_{dr}	ولتاژ رتور محور d ژنراتور
v_{qr}	ولتاژ رتور محور q ژنراتور
v_{or}	ولتاژ رتور محور خنثی ژنراتور
v_r	ولتاژ رتور ژنراتور
i_{ds}	جریان استاتور محور d ژنراتور

i_{qs}	جریان استاتور محور q ژنراتور
i_{os}	جریان استاتور محور خنثی ژنراتور
i_s	جریان استاتور ژنراتور
i_{dr}	جریان رتور محور d ژنراتور
i_{qr}	جریان رتور محور q ژنراتور
i_{or}	جریان رتور محور خنثی ژنراتور
i_r	جریان رتور ژنراتور
ψ_{ds}	شار پیوندی استاتور محور d ژنراتور
ψ_{qs}	شار پیوندی استاتور محور q ژنراتور
ψ_{dr}	شار پیوندی رتور محور d ژنراتور
ψ_{qr}	شار پیوندی رتور محور q ژنراتور
λ_{ds}	شاردور استاتور محور d ژنراتور
λ_{qs}	شاردور استاتور محور q ژنراتور
λ_{dr}	شاردور رتور محور d ژنراتور
λ_{qr}	شاردور رتور محور q ژنراتور
λ_s	شاردور استاتور ژنراتور
λ_r	شاردور رتور ژنراتور
γ	زاویه بین دو شاردور λ_s و λ_r
R_s	مقاومت استاتور ژنراتور
R_r	مقاومت رتور ژنراتور
L_s	ضریب القایی استاتور ژنراتور
L_r	ضریب القایی رتور ژنراتور
L_m	ضریب القایی متقابل ژنراتور

X_s	اندوکتانس استاتور ژنراتور
X_r	اندوکتانس رتور ژنراتور
X_m	اندوکتانس متقابل ژنراتور
ω_s	سرعت زاویه‌ای شبکه
ω_b	سرعت زاویه‌ای پایه
ω_r	سرعت زاویه‌ای رتور
T_{em}	گشتاور الکترومغناطیسی ژنراتور
T_m	گشتاور مکانیکی ژنراتور

فهرست جدول‌ها

صفحه	عنوان
۱۵	جدول ۱-۲: ظرفیت نصب شده در نیروگاه منجیل و رودبار [۴۶].....
۱۶	جدول ۲-۲: ظرفیت نصب شده نیروگاه بینالود [۴۶].....
۳۳	جدول ۳-۲: حالات عملکرد ممکن برای ژنراتور القایی تغذیه دوگانه.....
۳۶	جدول ۴-۲: مزایا و معایب انواع ژنراتورها.....
۵۰	جدول ۱-۳: مدل ژنراتورهای القایی با مراتب مختلف.....
۶۳	جدول ۱-۴: چگونگی انتخاب بردارهای ولتاژ مناسب.....
۷۱	جدول ۲-۴: الگوی انتخاب بردار ولتاژ مناسب.....

فهرست شکل‌ها

عنوان	صفحه
شکل ۱-۲: رشد انرژی باد در تولید انرژی [۴۵].....	۱۴
شکل ۲-۲: اجزای بکار رفته در یک نمونه از توربین بادی.....	۱۶
شکل ۳-۲: جریان باد در اطراف توربین.....	۱۸
شکل ۴-۲: نمودار ضریب عملکرد رتور.....	۱۹
شکل ۵-۲: منحنی توان - سرعت [۴۹].....	۲۱
شکل ۶-۲: منحنی توان سرعت با دو سرعت سنکرون.....	۲۷
شکل ۷-۲: نحوه اتصال ژنراتورهای القایی قفس سنجابی به شبکه.....	۲۸
شکل ۸-۲: نحوه اتصال سیستم راه انداز به ژنراتور القایی.....	۲۹
شکل ۹-۲: نحوه اتصال DFIG به شبکه.....	۳۱
شکل ۱۰-۲: منحنی عملکرد یک ژنراتور DFIG (الف) زیر سنکرون (ب) فوق سنکرون.....	۳۳
شکل ۱۱-۲: نحوه اتصال ژنراتورهای SG.....	۳۵
شکل ۱۲-۲: هزینه تقریبی قسمت‌های مختلف یک توربین بادی.....	۳۷
شکل ۱۳-۲: سهم انواع مختلف ژنراتورها در نیروگاههای بادی [۵۳].....	۳۸
شکل ۱-۳: نمودار C_p بر حسب λ برای مقادیر مختلف زاویه ی پره.....	۴۱
شکل ۲-۳: مدل نظری جعبه دنده شامل سرعت، گشتاور و میرایی های رتور و ژنراتور.....	۴۲
شکل ۳-۳: بلوک شبیه سازی ژنراتور به روش فضای حالت.....	۴۷
شکل ۴-۳: مدل ماشین پیاده سازی شده در محیط Matlab/Simulink با قابلیت تخمین پارامترها.....	۴۸
شکل ۵-۳: کنترل اعمال شده در سمت رتور ژنراتور.....	۵۲
شکل ۱-۴: شمای کلی کنترل ماشین القایی به روش DTC.....	۵۶

- شکل ۴-۲: نمایش بردارهای شار استاتور و رتور و جریان های استاتور (با صرفنظر از مقاومت استاتور). ۵۷
- شکل ۴-۳: بلوک دیاگرام تخمین گر شار و گشتاور (Flux and torque estimator). ۵۹
- شکل ۴-۴: بلوک دیاگرام یک اینورتر منبع ولتاژ سه فاز. ۶۰
- شکل ۴-۵: نمایش بردارهای مبدل دو سطحی. ۶۱
- شکل ۴-۶: تأثیر بردارهای شش گانه روی شار استاتور و گشتاور موتور. ۶۲
- شکل ۴-۷: تقسیم بندی فضای کار موتور در یک سیکل. ۶۳
- شکل ۴-۸: دیاگرام فازوری جهت یابی میدان ماشین القایی. ۶۵
- شکل ۴-۹: بلوک دیاگرام عمومی برای سیستم کنترل جهت یابی میدان. ۶۷
- شکل ۴-۱۰: طرح جهت یابی مستقیم میدان. ۶۸
- شکل ۴-۱۱: ولتاژ خروجی تولیدی توسط بردارهای فضایی. ۶۹
- شکل ۴-۱۲: الگوی کلیدزنی در وضعیتی از مقادیر احتمالی Δi_d و Δi_q زاویه رتور. ۷۱
- شکل ۴-۱۳: اینورتر پل تک فاز با بار غیر خطی. ۷۲
- شکل ۴-۱۴: نحوه ردیابی جریان مرجع در یک پریود T. ۷۴
- شکل ۴-۱۵: طرح مدار فیلتر اکتیو موازی. ۷۵
- شکل ۴-۱۶: مدار ماشین القایی در مرجع dq. ۷۷
- شکل ۴-۱۷: شماتیک مدل شبیه سازی شده مزرعه بادی در شبکه قدرت و محل وقوع خطا. ۸۲
- شکل ۴-۱۸: شکل موج سه فاز در پایانه خروجی ژنراتورهای القایی تغذیه دوگانه در حین خطا و پس از آن. ۸۳
- شکل ۴-۱۹: کاهش اندازه ولتاژ به ۱۰ درصد مقدار نامی آن و تغییرات شکل موج ولتاژ استاتور در حین خطا. ۸۴
- شکل ۴-۲۰: شکل موج جریان استاتور فاز b بدون استفاده از روش کنترلی جریان پیشگویانه. ۸۵
- شکل ۴-۲۱: شکل موج جریان استاتور فاز b با استفاده از روش کنترلی جریان پیشگویانه. ۸۵
- شکل ۴-۲۲: شکل موج توان اکتیو خروجی از ژنراتورهای القایی تغذیه دوگانه در حین و پس از خطا. ۸۶

شکل ۴-۲۳: شکل موج توان راکتیو خروجی از ژنراتورهای القایی تغذیه دوگانه در حین و پس از خطا.. ۸۶

شکل ۴-۲۴: شکل موج گشتاور الکترومغناطیسی ژنراتورهای القایی تغذیه دوگانه در حین و پس از خطا.

۸۷

شکل ۴-۲۵: پارامترهای ماشین اعمالی به کنترل اصلی..... ۸۸

شکل ۴-۲۶: تبدیل کد بردار به سیگنال‌های آتش مناسب برای اینورتر..... ۸۹

شکل ۴-۲۷: دیاگرام شبیه سازی شده حافظه موقت برای تثبیت فرکانس کلیدزنی..... ۸۹

فصل اول

مروری بر کارهای گذشته

امروزه به علت کاهش منابع سوخت‌های فسیلی و افزایش نگرانی‌ها در مورد افزایش آلودگی و گرمای زمین، تمایل به استفاده از منابع غیر فسیلی و تجدید پذیر جهت تولید برق افزایش یافته است. منابع متفاوت تجدید پذیر مانند خورشید، زمین گرمایی، باد و غیره برای این منظور معرفی شده‌اند که در حال حاضر انرژی باد از سایر موارد مورد بیشترین توجه قرار گرفته و بیشترین رشد را داشته است به طوری که بسیاری از کشورها مانند آلمان و دانمارک برنامه ریزی بلند مدتی انجام داده‌اند تا در چند سال آینده بخش قابل ملاحظه‌ای از انرژی خود را از طریق باد تأمین نمایند. انرژی باد و توربین‌های بادی در ابتدا به عنوان تلمبه‌هایی جهت بالا کشیدن آب از زیر زمین استفاده می‌شدند ولی با پیشرفت تکنولوژی فکر استفاده از این توربین‌ها برای تولید برق به ذهن بشر رسوخ کرد. همچنین همان‌طور که از نشانه‌هایی که توسط باستان‌شناسان کشف شده است توربین‌های بادی در ابتدا به صورت محور عمودی بوده‌اند که بسیاری از آنان در ایران یافت شده است. استفاده از باد جهت تولید برق در ابتدا ساده به نظر می‌رسد زیرا با استفاده از این نیرو و گرداندن یک ژنراتور می‌توان برق تولید کرد. با این حال عملاً بکار بردن این نیرو نیاز به تکنولوژی نسبتاً پیچیده‌ای دارد که یکی از دلایل آن غیر قابل پیش بینی و غیر قابل کنترل بودن نیروی باد می‌باشد. این نیرو مانند آب در پشت سدها قابل مهار نبوده و در ابتدا جهت کنترل آن باید فکری شود. به همین منظور جهت افزایش کارایی و کیفیت برق تولیدی از این نیروگاه‌ها روش‌های متفاوتی از جمله مکانیکی و الکتریکی اجرا شده و همچنان به علت تازگی این نوع تکنولوژی در حال انجام است.

انرژی باد نظیر سایر منابع انرژی تجدید پذیر از نظر جغرافیایی گسترده و در عین حال به صورت پراکنده و غیر متمرکز و تقریباً همیشه در دسترس می‌باشد. انرژی باد طبیعتی نوسانی و متناوب داشته و وزش دائمی ندارد. هزاران سال است که انسان با استفاده از آسیاب‌های بادی تنها جزء بسیار کوچکی از آن را استفاده می‌کند. این انرژی تا پیش از انقلاب صنعتی به عنوان یک منبع انرژی به طور گسترده‌ای مورد بهره‌برداری قرار می‌گرفت، ولی در دوران انقلاب صنعتی، استفاده از سوخت‌های فسیلی به دلیل

ارزانی و قابلیت اطمینان بالا جایگزین انرژی باد شد. در این دوره توربین‌های بادی قدیمی دیگر از نظر اقتصادی قابل رقابت با بازار انرژی‌های نفت و گاز نبودند. تا اینکه در سال‌های ۱۹۷۳ و ۱۹۷۸ دو شوک بزرگ نفتی ضربه بزرگی به اقتصاد انرژی‌های حاصل از نفت و گاز وارد آورد. به این ترتیب هزینه انرژی تولید شده به وسیله توربین‌های بادی، در مقایسه با نرخ جهانی قیمت انرژی بهبود یافت. پس از آن مراکز و مؤسسات تحقیقاتی و آزمایشگاهی متعددی در سراسر دنیا به بررسی تکنولوژی‌های مختلف جهت استفاده از انرژی باد به عنوان یک منبع بزرگ انرژی پرداختند. به علاوه این بحران باعث ایجاد تمایلات جدیدی در زمینه کاربرد تکنولوژی انرژی باد جهت تولید برق متصل به شبکه، پمپاژ آب و تأمین انرژی الکتریکی نواحی دور افتاده شد. همچنین در سال‌های اخیر مشکلات زیست محیطی و مسائل مربوط به تغییر آب و هوای کره زمین به علت استفاده از منابع انرژی فسیلی بر شدت این تمایلات افزوده است.

تاریخچه استفاده از ژنراتورهای القایی تغذیه دوگانه (DFIG) در بین ژنراتورهای توربین بادی چند-مگاواتی (WTG) افزون بر ۲۰ سال است. به دلیل بحران قیمت نفت در دهه ۷۰ میلادی تلاش‌های ارزشمندی در آلمان و آمریکا صرف توسعه ژنراتورهای توربین بادی چند-مگاواتی برای پیوستن به سیستم‌های انتقال و توزیع الکتریکی شده است.

از سال ۱۹۷۵ پیشرفت‌های شگرفی در زمینه توربین‌های بادی در جهت تولید برق به عمل آمده است. در سال ۱۹۸۰ اولین توربین برق بادی متصل به شبکه سراسری نصب گردید. بعد از مدت کوتاهی اولین مزرعه برق بادی چند مگاواتی در آمریکا نصب و به بهره برداری رسید.

در پایان سال ۱۹۹۰ ظرفیت توربین‌های برق بادی متصل به شبکه در جهان به ۲۰۰ مگاوات رسید که توانایی تولید سالیانه ۳۲۰۰ گیگا وات ساعت برق را داشته که تقریباً تمام این تولید مربوط به ایالت کالیفرنیا آمریکا و کشور دانمارک بود. امروزه کشورهای دیگری نظیر هلند، آلمان، بریتانیا، ایتالیا، اسپانیا، چین و هندوستان برنامه‌های ملی پروژه‌ای را در جهت توسعه و عرضه تجاری انرژی باد آغاز کرده‌اند.

در طی دهه گذشته هزینه‌های تولید انرژی به کمک توربین‌های بادی به طور قابل ملاحظه‌ای کاهش یافته است. در حال حاضر توربین‌های بادی از کارایی و قابلیت اطمینان بیشتری در مقایسه با ۱۵ سال پیش برخوردارند. با این همه استفاده وسیع از سیستم‌های مبدل انرژی باد (WECS) هنوز آغاز نگردیده

است. در مباحث مربوط به انرژی باد بیشتر تاکیدها بر توربین‌های بادی مولد برق جهت اتصال به شبکه است زیرا این نوع از کاربرد انرژی باد می‌تواند سهم مهمی در تأمین برق مصرفی جهان داشته باشد. بر اساس پیش‌بینی‌های صورت گرفته توسط انجمن انرژی بادی (WWEA) انرژی بادی تا سال ۲۰۲۰ قادر به تأمین حداقل ۱۲٪ از برق مصرفی جهان خواهد بود و همچنین ظرفیت نصب شده جهانی در این سال به حداقل ۱۵۰۰ گیگاوات خواهد رسید. به طور کلی با استفاده از انرژی باد به عنوان یک منبع انرژی در دراز مدت می‌توان دو برابر مصرف انرژی الکتریکی فعلی جهان را تأمین کرد.

۱-۲- پیشینه پژوهشی

استفاده از نیروی باد برای تولید برق با بکار بردن توربین‌های بادی ساده شروع شد ولی برق تولیدی آن‌ها از کیفیت و قابلیت اطمینان بالایی برخوردار نبود. در ابتدا با اضافه کردن تجهیزاتی به همان نوع توربین‌ها سعی در بهبود برق تولیدی نمودند و تلاش‌ها فقط در جهت شبیه‌سازی خود توربین بادی صورت می‌گرفت [۱] و [۲]. به عنوان مثال در [۳] با استفاده از مدل درجه پنجم DFIG یک مدل ساده استخراج نموده و تأثیر خطاهای مختلف را بر مدل پیشنهادی در نرم‌افزار PSCAD/EMTDC آزمایش کرده است. با این حال نتایج حاصل از شبیه‌سازی را می‌توان مشابه با نتایج یک مدل پیچیده‌تر نیز دید. با گذشت زمان به طور کلی توربین‌های بادی جدید و پیشرفته‌تری پیشنهاد و به شبکه متصل گردید؛ بنابراین بررسی تأثیر آن‌ها بر شبکه لازم به نظر می‌رسید. [۴] به بررسی تأثیر توربین بادی بر پارامترهای شبکه و پایداری آن در هنگام اتصال به شبکه پرداخته ولی روشی را جهت بهبود آن ارائه نداده است. [۵] توربین بادی با ژنراتور القایی تغذیه دوگانه را در یک شبکه بسیار ساده ولی نامتقارن مدل کرده و برای بهبود کارایی آن در کنترلرها (DFIG) پارامترهای توالی مثبت و منفی را پس از جداسازی به طور مجزا کنترل نموده است ولی نوآوری در استفاده از کنترلرهای پیچیده‌تر یا تغییر نوع مبدل‌ها دیده نمی‌شود. همچنین با اعمال یک فیلتر در خروجی توربین بادی در حقیقت خواننده را از مشاهده خروجی واقعی توربین بادی محروم کرده است.

به طور سنتی، کنترل DFIG به وسیله کنترل برداری (VC)¹ حاصل می‌شود، [۶]، [۷]، [۸] و [۹]، که در آن جریان‌های رتور به مؤلفه‌های توان اکتیو (یا گشتاور) و توان راکتیو (یا شار) تجزیه می‌شوند و آن‌ها را جداگانه در یک قالب مرجع با شار استاتور ثابت [6] و [7] یا ولتاژ ثابت شده [8] و [9] تنظیم می‌کنند. سپس کنترلرهای جریان برای تنظیم جریان‌های رتور به کار گرفته شدند. عیب اساسی VC طبیعت خطی آن است که عملیات گسسته سازی مبدل‌های منبع ولتاژ (VSCs)² را در نظر نمی‌گیرد؛ بنابراین جهت حفظ پایداری سیستم بر روی کل محدوده کاری و پاسخ دینامیکی مناسب چه در حالت نرمال و چه در حالت‌های خطا و غیرعادی، کنترلر جریان و پارامترهای کنترلی آن باید با دقت تنظیم شوند [7]. در [۱۰] به صورت روابط ریاضی این مفهوم مورد بحث قرار گرفته است.

کنترل گشتاور مستقیم (DTC)³ [۱۱] و کنترل توان مستقیم (DPC)⁴، [۱۲]، [۱۳] و [۱۴]، که خود برای ماشین‌های القایی [۱۵] و [۱۶] از DTC نشأت گرفته است برای DFIG پیشنهاد شد. چنین روش‌هایی کنترل مستقیم گشتاور یا توان ماشین را فراهم می‌سازد و از پیچیدگی الگوریتم VC می‌کاهد. روش‌های DTC و DPC در خود کنترل هیستریزس توان/گشتاور را دارند و خروجی‌های مبدل از طریق یک جدول مراجعه‌ای (LUT)⁵ از پیش تعیین شده انتخاب می‌شوند. با این حال فرکانس کلیدزنی مبدل با حالت‌های کاری از جمله سرعت رتور و توان خروجی سیستم تغییر می‌کند که این خود به پیچیدگی طراحی فیلترهای هارمونیک مدار قدرت ac می‌افزاید؛ به این دلیل که باید به گونه‌ای طراحی شوند که هارمونیک‌های دارای باند پهن را نیز جذب کنند. علاوه بر آن، فرکانس نمونه‌برداری بالایی باید برای DTC/DPC مورد استفاده قرار گیرد تا عملکردهای حالت دائمی و دینامیکی قابل قبول تضمین شوند [11]، [13] و [14]. چندین روش DTC/DPC اصلاح شده مرکب با مدولاسیون بردار فضایی (SVM) برای دستیابی به فرکانس کلیدزنی ثابت برای درایو ماشین‌های القایی، [۱۷]، [۱۸]، [۱۹] و [۲۰]، و

¹ Vector Control

² Voltage Source Converters

³ Direct Torque Control

⁴ Direct Power Control

⁵ Look-Up Table

VSC متصل به شبکه، [۲۱]، [۲۲] و [۲۳]، پیشنهاد شده است. با این حال معایب بیشتری توسط این چنین کنترلی مانند محاسبه پیچیده برخط^۱، [17]، [21]، [22]، پارامترهای اضافی کنترلر PI و استحکام ضعیف نسبت به تغییرات پارامتری ماشین، [17] – [20]، معرفی شد. همچنین چندین روش DPC با فرکانس کلیدزنی ثابت برای DFIG پیشنهاد شد [۲۴]، [۲۵]، [۲۶] و [۲۷]. حالت‌های کلیدزنی اولیه بر اساس LUT سنتی در [24] و [25] انتخاب شدند که در دوره‌های آن هدف را بر اساس نوسانات کاهش یافته گشتاور و شار محاسبه کردند. با این حال، در این مورد نیاز به محاسبات برخط پیچیده و داشتن مشکلات نوسانی وقتی که DFIG در سرعت سنکرون خود در حال کار بود، دیده می‌شد. در [26]، [27] و [۲۸] روش‌های DPC با فرکانس کلیدزنی ثابت برای VDC و DFIG پیشنهاد شد. با این حال مطالعات شبیه‌سازی اولیه فقط در [27] و [28] انجام شد و اثر کلی از چندین بردار ولتاژ بر روی تغییرات توان یا اثر جنبه‌های جزئی همانند تأخیر نمونه‌برداری بر عملکرد سیستم مورد توجه قرار نگرفت.

مشابه روش‌های DTC و DPC، کنترل جریان پیش‌گویانه (PCC)^۲ به همراه تکنیک SVM برای VSC، [۲۹]، [۳۰]، [۳۱]، [۳۲] و [۳۳]، و درایوهای ماشین‌های ac [۳۴]، [۳۵] و [۳۶] پیشنهاد شد. عملکرد کنترلر جریان برای یک VSC متصل به شبکه سه فاز در سیستم‌های تولید پراکنده [29]، با در نظر گرفتن تأخیر کنترلی جهت نمونه‌برداری و محاسبه بهبود یافتند. روشی یکپارچه از PCC برای یک VSC در [30] پیشنهاد داده شد که در آن از یک مشاهده‌گر جریان پیش‌گو با مدل داخلی و فقی^۳ جهت جبران تأخیر کنترلی و بهبود پهنای باند کنترل و پایداری استفاده گردیده است. با این حال، یک تقریب-زنی خطی ساده از خطای جریان در [29] – [31] مورد استفاده قرار گرفته است که باعث ایجاد ناپایداری به جهت طبیعت غیرخطی عملیات SVM می‌شود. روش کمترین مربع از محاسبه پارامتر برخط در [32] جهت تقریب‌زنی مقاومت و اندوکتانس بار در یک یکسوکننده کنترل کننده فاز جهت تضمین خطای حالت دائم صفر در PCC مورد استفاده قرار گرفت. [33] یک روش DPC پیش‌گویانه را برای سیستم‌های

¹ Online

² Predictive Current Control

³ Adaptive Internal Model

تولیدی از انرژی باد مجهز به DFIG را پیشنهاد می‌دهد که در آن از فرکانس کلیدزنی ثابت استفاده شده است و عملکرد حالت دائم و گذرا بهبود یافته است.

در نهایت با بررسی روش‌های کنترلی مختلف در این پایان‌نامه ترکیبی از روش‌های DTC و FOC برای کنترل DFIG به کار برده شد. تقریباً ۳۰ سال پیش، در سال ۱۹۷۱، اولین مقاله در مورد FOC برای موتورهای القایی چاپ شد. از آن پس تا به حال، این تکنیک تا به امروز در حال رشد بوده و امروزه از نقطه نظر صنعتی بالغ شده است. ۱۳ سال بعد، یک روش جدید کنترلی برای ماشین‌های القایی به نام DTC ارائه شد. از زمان معرفی این روش جدید، سادگی، کارایی خوب و استحکام عالی آن باعث شده است که به عنوان یک روش کنترلی فراگیر شود. استفاده از DTC این امکان را ایجاد می‌کند تا کنترل دینامیکی خوبی از گشتاور بدون هیچ مبدل دینامیکی صورت پذیرد.

عموماً توربین‌های بادی جدید دارای قسمت الکترونیک قدرت هستند که نسبت به اتفاقات و خطاها حساسیت بالایی از خود نشان داده و در اکثر موارد غیر عادی، برای محافظت این قسمت‌ها بلافاصله کل توربین بادی را غیر فعال می‌کردند. با اتصال توربین‌های بادی به شبکه و افزایش سهم برق تولیدی این توربین‌ها نسبت به سایر نیروگاه‌ها، امکان جدا کردن این نیروگاه‌ها از شبکه در شرایط غیر عادی امکان‌پذیر نمی‌باشد. زیرا خارج کردن این توربین‌ها و کاهش ناگهانی توان تولیدی ممکن است باعث ناپایداری کل شبکه گردد؛ بنابراین تعریف یا استاندارد جدیدی به نام قابلیت کارکرد در شرایط غیر عادی یا خطا^۱ برای این نوع نیروگاه‌ها معرفی گردید [۳۷] و [۳۸]؛ بنابراین نیاز بود روش‌های کنترلی در جهت در مدار باقی ماندن توربین‌های بادی در هنگام خطا به خدمت گرفته شوند. برای این منظور باید خطاهای شبکه شناسایی شوند.

^۱ Fault Ride-Through Capability

در حالت کلی با توجه به نحوه کاربرد ژنراتور القایی تغذیه دوگانه در شبکه‌های قدرت و اتصال مستقیم استاتور این ژنراتورها به سیستم قدرت، این ژنراتورها به اغتشاشات شبکه حساسند. اغتشاشات شبکه را به طور کل به دو صورت تغییرات فرکانس و یا تغییر در ولتاژ شبکه می‌توان در نظر گرفت. تغییرات فرکانس در نتیجه‌ی عدم تعادل بین تولید و مصرف و یا ورود و خروج یک بار بزرگ از سیستم قدرت به وجود می‌آید و بر عملکرد واحدهای متصل شده به سیستم قدرت اثر می‌گذارد. تحلیل این موضوع در مورد نیروگاه‌های بادی مختلف، متفاوت است و در حالت کنترلی معمول، ژنراتورهای القایی تغذیه دوگانه به دلیل داشتن مبدل الکترونیک قدرت، تأثیر چندانی از تغییرات فرکانسی نمی‌پذیرد. البته بحث تغییر فرکانس در مقالات به عنوان اغتشاش برای ژنراتورها مورد تحلیل قرار نگرفته است و بحث پاسخ اینرسی و عملکرد ژنراتور در تبادل توان در طول انحراف فرکانسی از موارد تحقیق است. مقالاتی نمونه از این مبحث در پاراگراف بعد بیان شده است.

در مرجع [۳۹] پاسخ گشتاور ژنراتور القایی تغذیه دوگانه و ژنراتور القایی قفس سنجابی به تغییرات فرکانسی شبکه مقایسه شده است. این مرجع نشان داده ژنراتور القایی تغذیه دوگانه بدون کنترل اضافی حساسیت زیادی نسبت به تغییر فرکانس شبکه از خود نشان نمی‌دهد و در ادامه سیستم کنترلی جهت بهبود پاسخ اینرسی این ژنراتورها پیشنهاد کرده است. در مرجع [۴۰] نیز مانند دو مرجع قبل، ابتدا پاسخ اینرسی دو نوع ژنراتور القایی را مقایسه کرده است و در ادامه اثر سرعت پاسخ کنترلرها بر نتایج را بررسی کرده است.

عامل دیگری که برای ژنراتور به عنوان اغتشاش در نظر گرفته می‌شود افت ولتاژ است. افت ولتاژ از ورود بارهای بزرگ و ناگهانی و یا بروز خطا در سیستم قدرت پدید می‌آید و می‌تواند به صورت افت متعادل و نامتعادل ولتاژ باشد. شدت افت ولتاژ بر عملکرد ژنراتور القایی تغذیه دوگانه اثرگذار است و در صورتی که افت ولتاژ به اندازه‌ای باشد که سبب آسیب رساندن به مبدل الکترونیک قدرت قرار گرفته در سمت رتور و یا خازن میانی آن شود سیستم تغییر حالت می‌دهد. روشی که بسیاری از مقالات از آن استفاده کرده‌اند استفاده از اتصال مقاومت کروبار به سیم‌پیچی رتور است.

عملکرد در طول اغتشاش ولتاژ در این پایان‌نامه به صورت افت ولتاژ و اتصال کوتاه متعادل در نظر گرفته شده است. در بحث نامتقارنی ولتاژ اثر اتصال کوتاه‌های نامتقارن نیز به طور اجمالی در این پایان‌نامه مورد بررسی قرار گرفته است؛ بنابراین عملکرد در طول اغتشاش ولتاژ شامل چند قسمت مختلف است که در هر زمینه مقالاتی موجود است.

در تحلیل عملکرد در طول افت ولتاژ چگونگی مدل‌سازی واحد نیروگاه بادی از اهمیت زیادی برخوردار است. در این پایان‌نامه اثر مدل دو جرمه محور رتور ژنراتور-محور توربین در طول افت ولتاژ بررسی شده است. این مدل‌سازی در مراجع معدودی بررسی شده است. در مرجع [۴۱] به معرفی مدل مکانیکی توربین به طور جامع پرداخته و مرجع [۴۲] عملکرد ژنراتور در طول خطا را با در نظر گرفتن این مدل بررسی کرده است. همچنین اثر مرتبه مدل‌سازی ژنراتور بر نتایج افت ولتاژ نیز بررسی و بحث شده است.

در طول افت ولتاژهای کم سیستم کنترل اعمالی به رتور در نحوه عملکرد ژنراتور موثر است. در ادامه بخش مربوط به افت ولتاژ اثر استراتژی‌های کنترل مختلف بر عملکرد ژنراتور در یک سیستم قدرت با افزایش پله‌ای بار بررسی شده است. مقالات موجود در این زمینه در مورد توانایی تولید توان راکتیو این ژنراتورها در طول خطاهاست، مرجع [۴۳] نمونه‌ای از این مراجعند.

بدترین حالت افت ولتاژ زمانی است که اتصال کوتاه در پایانه استاتور رخ دهد. در این مورد بررسی رفتار جریان در طول اتصال کوتاه مهم است. در این پایان‌نامه، روش تحلیلی محاسبه جریان صورت گرفته و با نتایج شبیه‌سازی مقایسه شده است و همچنین تأثیر بعضی از عوامل بر آن بررسی شده است. محاسبه و بررسی تحلیلی جریان ژنراتور در طول خطا در مقاله‌های معدودی بررسی شده است. در این روش با استفاده از پارامترهای حالت دائم ماشین می‌توان جریان رتور در طول خطا را تخمین زد.

۱-۳- ساختار گزارش

در فصل دوم پایان نامه انرژی باد معرفی شده و آمار نیروگاه‌های بادی نصب شده در ایران و جهان آمده است. در ادامه انواع ژنراتورهای بکار رفته در نیروگاه بادی معرفی شده و با توجه به مزایا و معایب هر یک جایگاه ژنراتورهای القایی تغذیه دوگانه در صنعت نیروگاه‌های بادی بیان شده است.

در فصل سوم مدل‌سازی نیروگاه بادی شامل مدل‌سازی آیرودینامیکی پره‌ها و مدل جعبه دنده به عنوان مدل‌سازی بخش مکانیکی و مدل‌سازی ژنراتور و سیستم کنترل اعمالی به رتور به عنوان بخش الکتریکی انجام شده است.

در فصل چهارم روش کنترلی به کار رفته در این پایان نامه بررسی شده است و با استفاده از شبیه‌سازی نشان داده شده است که چطور این روش از پیچیدگی‌های معمول روش‌های موجود می‌کاهد. در فصل آخر خلاصه‌ای از نتایج بدست آمده در فصل‌های قبل بیان شده و همچنین پیشنهاداتی جهت ادامه تحقیقات ارائه شده است.

فصل دوم

**انرژی باد
و مروری بر ژنراتورهای بکار رفته
در توربین‌های بادی**

باد هوای در حال حرکت است. باد به وسیله گرمای غیر یکنواخت سطح کره زمین که حاصل عملکرد خورشید است، به وجود می‌آید. از آنجایی که سطح زمین از سازنده‌های خشکی و آبی تشکیل شده است، اشعه خورشید را به طور غیریکنواخت جذب می‌کند. وقتی خورشید در طول روز می‌تابد، هوای روی سرزمین‌های خشکی سریع‌تر از هوای روی سرزمین‌های آبی گرم می‌شود. هوای گرم روی خشکی ضبط شده و بالا می‌رود و هوای خنک‌تر و سنگین‌تر روی آب جای آن را می‌گیرد که این فرآیند بادهای محلی را می‌سازد. در شب، از آنجا که هوا روی خشکی سریع‌تر از هوای روی آب خنک می‌شود، جهت باد برعکس می‌شود. به همین طریق بادهای بزرگ جوی که زمین را دور می‌زنند به این علت است که هوای سطحی نزدیک استوا در اثر گرمای خورشید بیشتر از هوای قطب شمال و جنوب گرم شده، می‌شود. از آنجا که باد تا زمانی که خورشید به زمین می‌تابد، به طور پیوسته تولید خواهد شد، آن را منبع انرژی تجدید شونده می‌نامند [۴۴].

در راستای تولید انرژی الکتریکی از انرژی باد، دو عامل کارایی و گنجایش مطرح است. کارایی به این موضوع بر می‌گردد که چقدر می‌توان انرژی مفید از منبع انرژی کسب کرد. کارایی در واقع همان راندمان کلی یک نیروگاه بادی است. در یک نیروگاه بادی دو قسمت وجود دارد قسمت الکتریکی که با راندمان قابل قبولی کار می‌کند و انرژی از دست رفته در این قسمت معمولاً به شکل گرمای پراکنده شده در هوا است و نمی‌توان از آن بهره اقتصادی مجدد برد و قسمت مکانیکی که درصدی از توان باد را به انرژی مکانیکی تبدیل می‌کند. در همه ماشین‌های تبدیل انرژی وقتی که شکلی از انرژی به شکل دیگر تبدیل می‌شود، مقداری از انرژی دست می‌رود. به طور کل ماشین‌های بادی ۳۰ تا ۴۰ درصد انرژی متحرک باد را به برق تبدیل می‌کند.

واژه گنجایش به توانایی دستگاه نیرو در تولید برق بر می‌گردد. عملکرد در تمام طول روز و هفته برای یک واحد تولید انرژی تقریباً غیرممکن است. به طور مثال دستگاه‌های زغالی اگر تمام روزهای سال و به طور شبانه روزی کار کنند، دارای ظرفیت ۷۵ درصد خواهند بود. دستگاه‌های نیروی باد متفاوت از

دستگاه‌های مولد نیروی سوخت سوز هستند و بهره‌وری آن‌ها به میزان باد و میزان سرعت باد بستگی دارد؛ بنابراین ماشین‌های بادی نمی‌توانند در طول سال به طور ۲۴ ساعت در روز کار کنند. یک توربین بادی در یک مزرعه بادی شاخص در ۶۵ تا ۸۰ درصد زمان کار می‌کند، اما معمولاً کمتر از گنجایش کامل خود عمل می‌کند، زیرا سرعت باد همیشه در بیشترین مقدار خود قرار دارد.

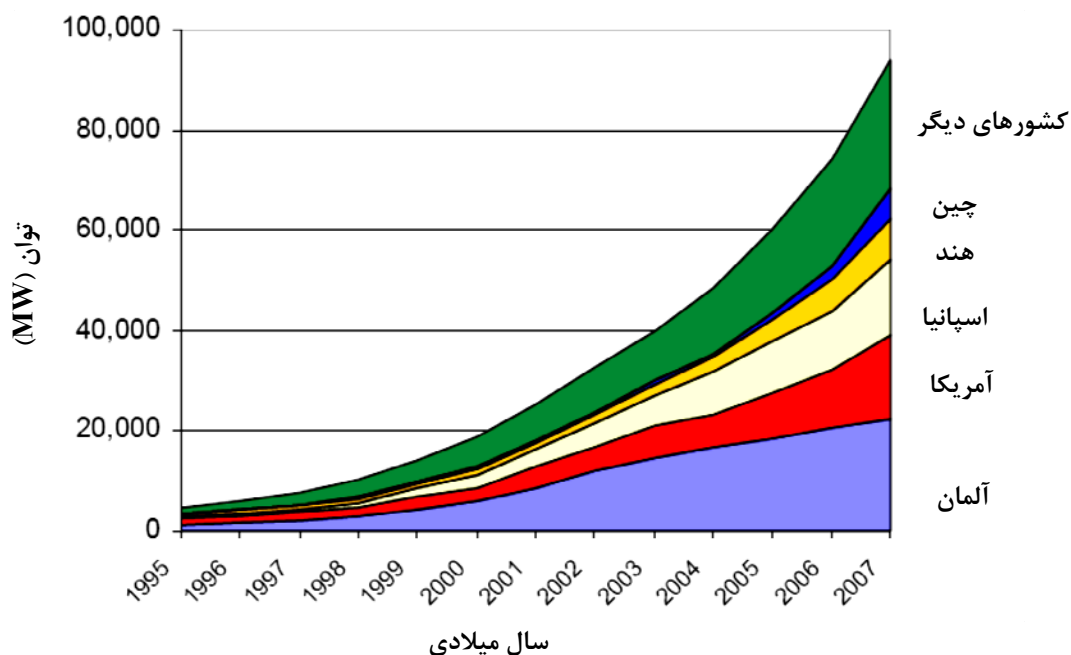
نکته قابل توجه برای استفاده از انرژی باد تقاضای مصرف کننده برای انرژی‌های سبز-انرژی‌هایی که به محیط زیست آسیبی نمی‌رسانند- است. در سال ۱۹۷۰، ذخایر نفت بر توسعه منابع جایگزین انرژی فشار آورد. در سال ۱۹۹۰، از دیدگاه تجدید پذیری محیط زیست، در برابر مطالعه دانشمندان که نشان‌دهنده تغییرات بالقوه آب و هوای جهانی در صورت افزایش استفاده مداوم از سوخت‌های فسیلی فشاری نیز به وجود آمد. انرژی بادی یک گزینه اقتصادی و راهبردی برای دستگاه‌های نیروی سنتی در بسیاری از نواحی کشور ارائه می‌دهد، باد سوخت پاک است و مزارع بادی از آنجا که هیچ سوختی را نمی‌سوزانند، هیچ آلودگی آبی یا هوایی نیز ایجاد نمی‌کنند. جدی‌ترین آسیب زیست محیطی ماشین‌های بادی شاید تأثیر منفی آن‌ها روی جمعیت پرندگان وحشی و برخورد دیداری غیرطبیعی در چشم انداز محیط زیست باشد، برای برخی افراد، برق زدن تیغه‌های آسیاب‌های بادی در افق می‌تواند آزار دهنده باشد و برای برخی دیگر آن‌ها جایگزین زیبایی برای دستگاه‌های نیروی سنتی هستند.

۲-۲- آمار نیروگاه بادی نصب شده در ایران و جهان

در این قسمت آماری از نیروگاه‌های بادی نصب شده در ایران و جهان ارائه شده است. با توجه به مزایای موجود در به‌کارگیری از منابع بادی، کشورها به طور قابل توجهی در این زمینه سرمایه‌گذاری کرده‌اند. گزارش منتشر شده توسط انجمن انرژی باد جهان (GWEC)^۱ در فوریه ۲۰۰۸ که شامل ارقام مربوط به توسعه انرژی باد در بیش از ۷۰ کشور در سراسر دنیا می‌باشد، نشان می‌دهد که در این سال میزان نصب در جهان به ۲۰۰۷۳ مگاوات رسیده، که با توجه به این امر میزان کل نصب از ۷۴۱۳۳

^۱ Global Wind Energy Council

مگاوات در سال ۲۰۰۶ به ۹۴۱۲۲ مگاوات در سال ۲۰۰۷ افزایش یافته است. شکل ۱-۲ انرژی بدست آمده از نیروگاه‌های بادی را تا سال ۲۰۰۷ و به ازای سهم کشورهای پیشرو در آن نشان داده است [۴۵].



شکل ۱-۲: رشد انرژی باد در تولید انرژی [۴۵].

با توجه به شکل فوق کشورهای آلمان، آمریکا و اسپانیا از کشورهایی هستند که بیشترین توان بادی نصب شده را دارا می‌باشند.

در ایران با توجه به وجود مناطق بادخیز طراحی و ساخت آسیاب‌های بادی از ۲۰۰۰ سال پیش از میلاد مسیح رایج بوده و هم اکنون نیز بستر مناسبی جهت گسترش بهره‌برداری از توربین‌های بادی است. مطالعات و محاسبات انجام شده در زمینه تخمین پتانسیل انرژی باد در ایران نشان داده‌اند که تنها در ۲۶ منطقه از کشور (شامل بیش از ۴۵ سایت مناسب) میزان ظرفیت اسمی سایت‌ها، با در نظر گرفتن یک راندمان کلی ۳۳٪، در حدود ۶۵۰۰ مگاوات است و این در شرایطی است که ظرفیت اسمی کل نیروگاه‌های برق کشور، (در حال حاضر) ۳۶۰۰۰ مگاوات است.

نیروگاه بادی منجیل و رودبار به عنوان اولین نیروگاه بادی است که در ایران در تولید انرژی الکتریکی مورد بهره‌برداری قرار گرفته است. اطلاعاتی در مورد ظرفیت مزارع بادی نصب شده در سایت‌های منجیل، هرزویل و سیاه‌پوش واقع در استان گیلان در سال‌های مختلف در جدول ۱-۲ آمده است [۴۶].

جدول ۱-۲: ظرفیت نصب شده در نیروگاه منجیل و رودبار [46].

ردیف	توان نامی توربین بادی (کیلو وات)	تعداد	مجموع ظرفیت نصب شده (مگاوات)	تاریخ
۱	۵۵۰ & ۳۰۰	۲۸	۱۲	۱۳۸۲
۲	۳۰۰	۱۰	۳	۱۳۸۴
۳	۵۵۰	۱۰	۵/۵	۱۳۸۵
۴	۶۶۰	۲۲	۱۴/۵۲	۱۳۸۵
۵	۶۶۰	۱۷	۱۱/۲۲	۱۳۸۶
مجموع ظرفیت نصب شده (مگاوات)			۴۶/۲۴	

نیروگاه دیگری که در شبکه برق ایران قرار گرفته نیروگاه بادی بینالود است. این نیروگاه با هزینه ۲۸۰ میلیارد ریال و در زمینی به مساحت ۷۰۰ هکتار ساخته شده است. ظرفیت نصب شده این نیروگاه به میزان ۲۸/۳ مگاوات است که شامل ۴۳ دستگاه توربین بادی ۶۶۰ کیلو واتی است. بر اساس گزارش سازمان انرژی‌های نو ایران ساخت این نیروگاه به گونه‌ای است که سبب صرفه جویی ۲۰ میلیون متر مکعب گاز و جلوگیری از تولید گاز آلاینده دی اکسید کربن به میزان ۴۰ میلیون متر مکعب در سال خواهد شد و در ساخت آن از توان علمی کارشناسان ایرانی استفاده شده است.

جدول ۲-۲ ظرفیت مزارع بادی نصب شده در سایت بینالود واقع در استان خراسان رضوی در سال-

های مختلف و توان ژنراتور به کار رفته در آن را نشان می‌دهد [46].

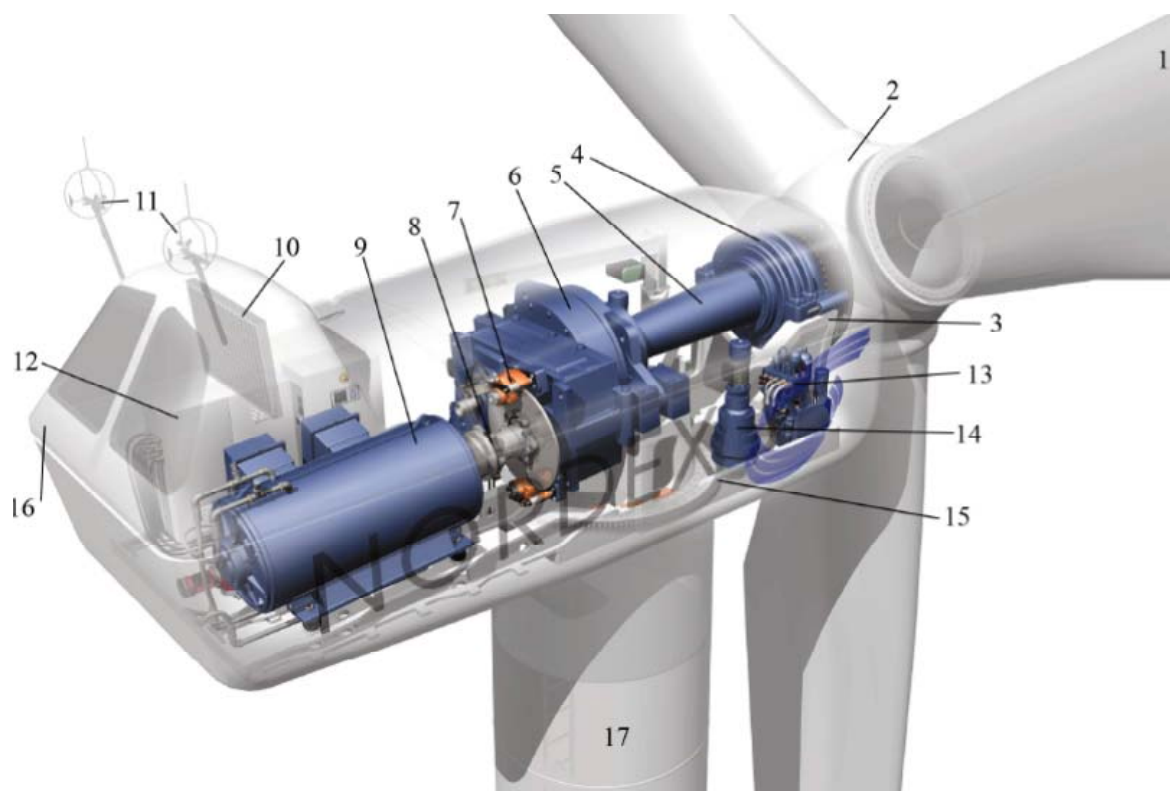
مجموع ظرفیت مزارع بادی نصب شده در ایران تا پایان سال ۱۳۸۶، ۷۴/۶۴ مگاوات بوده است.

جدول ۲-۲: ظرفیت نصب شده نیروگاه بینالود [46].

ردیف	توان نامی توربین بادی (کیلووات)	تعداد	مجموع ظرفیت نصب شده (مگاوات)	تاریخ
۱	۶۶۰	۲۰	۱۳/۲	۱۳۸۴ & ۱۳۸۳
۲	۶۶۰	۲۳	۱۵/۱۸	۱۳۸۶
مجموع ظرفیت نصب شده (مگاوات)		۲۸/۳۸		

۲-۳- معادلات پایه مربوط به انرژی باد

در شکل ۲-۲ قسمت‌های مختلف تشکیل دهنده‌ی یک توربین بادی نشان داده شده است.



شکل ۲-۲: اجزای بکار رفته در یک نمونه از توربین بادی.

قسمت‌های مختلف شماره‌گذاری شده در شکل عبارتند از: ۱- پره‌ها ۲- توپی^۱ رتور ۳- قاب ناسل^۲ ۴- بلبرینگ اصلی ۵- شفت رتور ۶- جعبه دنده ۷- ترمز ایمنی ۸- اتصال ژنراتور ۹- ژنراتور ۱۰- خنک کننده ژنراتور و جعبه دنده ۱۱- سنسورهای باد ۱۲- کنترل ناسل ۱۳- سیستم هیدرولیکی ۱۴- سیستم کنترل انحرافی ۱۵- بلبرینگ سیستم کنترل ۱۶- پوشش ناسل ۱۷- برج.

با توجه به شکل توربین از طریق برخورد باد به پره انرژی دریافت می‌کند. روابط حاکم بر تولید انرژی از باد از انرژی جنبشی حرکت هوا حاصل می‌شود، رابطه (۱-۲) انرژی حاصل از برخورد باد با سرعت V_w بر حسب متر بر ثانیه (m/s) را با پره‌های یک توربین بادی را بیان می‌کند [۴۷]:

$$E = \frac{1}{2} m V_w^2 \quad (1-2)$$

در رابطه فوق در روابط فوق، m ، وزن هوای برخوردی به پره‌ها بر حسب کیلوگرم (Kg) است که با جایگزینی آن رابطه توان به رابطه زیر تبدیل می‌شود:

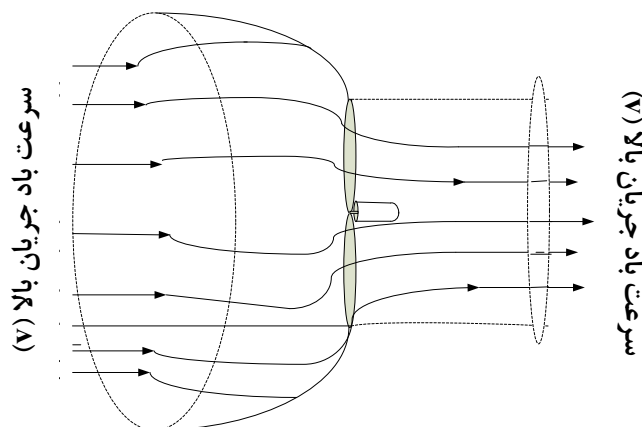
$$P = \frac{1}{2} (\rho A V_w) V_w^2 \quad (2-2)$$

در رابطه (۲-۲)، ρ ، چگالی وزنی هوا بر حسب کیلوگرم بر متر مکعب ($\frac{Kg}{m^3}$) و A سطح مؤثری که پره‌ها در بر می‌گیرند بر حسب متر مربع (m^2) است.

۲-۴- محاسبه توان استخراجی از باد

توان واقعی که به وسیله‌ی پره‌های رتور استخراج می‌شود برابر با تفاوت بین توان باد جریان بالا^۳ و جریان پایین^۴ است. جریان بالا و پایین باد در توربین بادی در شکل ۲-۳ نشان داده شده است [۴۸].

^۱ Hub
^۲ Nacelle frame
^۳ Upstream
^۴ Downstream



شکل ۳-۲: جریان باد در اطراف توربین.

بنابراین رابطه توان بدست آمده در (۲-۲) را می توان به صورت رابطه (۳-۲) نوشت:

$$p_0 = \frac{1}{2} (\text{نرخ توده هوای عبوری بر حسب کیلوگرم بر ثانیه}) (V_w^2 - V_{w0}^2) \quad (3-2)$$

سرعت باد در سطح رتور ناپیوسته است و از مقدار V_w به V_{w0} تغییر می یابد؛ بنابراین نرخ توده ای هوای عبوری از حاصل ضرب تراکم در متوسط سرعت به دست می آید. در رابطه (۴-۲) نرخ توده هوای عبوری نشان داده شده است.

$$\text{نرخ توده هوای عبوری} = \rho \cdot A \cdot \frac{V_w + V_{w0}}{2} \quad (4-2)$$

با قرار دادن رابطه (۴-۲) در (۳-۲)، توان مکانیکی که به وسیله رتور استخراج شده و به ژنراتور

الکتریکی تحویل داده می شود به صورت رابطه زیر بدست می آید:

$$p_0 = \frac{1}{2} \left[\rho \cdot A \cdot \frac{(V_w + V_{w0})}{2} \right] \cdot (V_w^2 - V_{w0}^2) \quad (5-2)$$

رابطه ای فوق را می توان به صورت زیر نوشت:

$$p_0 = \frac{1}{2} \rho \cdot A \cdot v^3 \cdot \frac{(1 + \frac{V_{w0}}{V_w}) [1 - (\frac{V_{w0}}{V_w})^2]}{2} \quad (6-2)$$

توان استخراجی توسط پره ها به طور معمول به عنوان تابعی از توان باد جریان بالا تعریف می شود:

$$p_o = \frac{1}{2} \rho A V_w^3 C_p \quad (7-2)$$

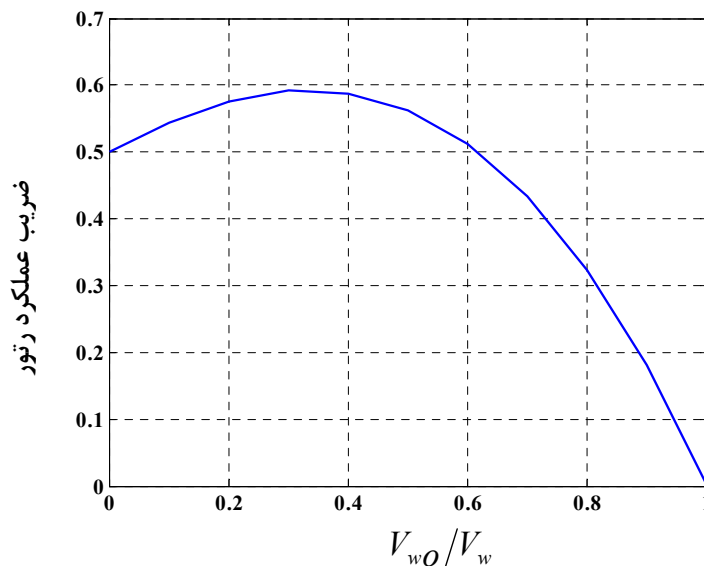
که در رابطه‌ی فوق، C_p به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$C_p = \frac{(1 + \frac{V_{w0}}{V_w})(1 - (\frac{V_{w0}}{V_w})^2)}{2} \quad (8-2)$$

C_p کسری از توان باد جریان بالا می‌باشد که توسط پره‌های رتور استخراج می‌شود. توان باقی‌مانده در باد جریان پایین تخلیه می‌شود. فاکتور C_p ضریب توان رتور^۱ یا راندمان رتور^۲ نامیده می‌شود. ضریب توان رتور نشان‌دهنده‌ی بخشی از توان باد است که به وسیله‌ی رتور استخراج شده است و ژنراتور الکتریکی را تغذیه می‌کند.

شکل (۴-۲) نمودار ضریب عملکرد رتور را بر حسب $(\frac{V_{w0}}{V_w})$ نشان می‌دهد که در آن C_p یک تابع با

یک مقدار بیشینه می‌باشد. C_p بیشینه مقدار 0.59 را وقتی $(\frac{V_{w0}}{V_w}) = \frac{1}{3}$ است، را دارا است.



شکل ۴-۲: نمودار ضریب عملکرد رتور.

در این شرایط توان بیشینه از رابطه‌ی (۹-۲) بدست می‌آید.

¹ Power Coefficient of the rotor

² Rotor Efficiency

$$p_{\max} = \frac{1}{2} \times 0.59 \rho \cdot A \cdot V_w^3 \quad (9-2)$$

مقدار بیشینه C_p از لحاظ تئوری برابر با 0.59 می‌باشد. اما در طرح‌های عملی، مقدار بیشینه C_p برای توربین‌های دو پره‌ای سرعت بالا کمتر از 0.5 و برای توربین‌های با تعداد پره‌های بیشتر سرعت پایین بین 0.2 - 0.4 است [48].

در ملاحظات فنی برای بهبود عملکرد ژنراتور C_p را تا حد امکان کنترل می‌کنند و آن را به صورت تابعی از θ, λ در نظر می‌گیرند، که در آن λ نسبت سرعت خطی نوک پره‌ها به سرعت باد یا TSR¹ است و رابطه آن به صورت رابطه (۲-۱۰) است [49]:

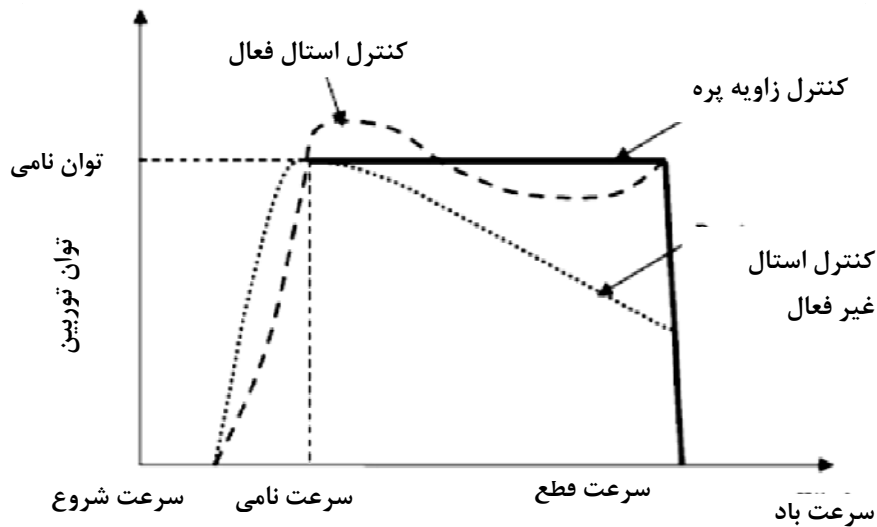
$$\lambda = \frac{R \omega_{rot}}{V_w} \quad (10-2)$$

در رابطه فوق، R طول پره و یا شعاع دایره‌ای است که پره‌ها در بر می‌گیرند. ω_{rot} سرعت زاویه‌ای نوک پره‌ها و V_w سرعت باد است.

عامل موثر دیگر بر ضریب عملکرد، θ ، زاویه گام پره است. این عامل را می‌توان با تغییر زاویه پره کنترل کرد. بنابراین با تغییر سرعت باد و زاویه پره ضریب عملکرد رتور می‌تواند تغییر کند و در هر سرعت باد به ازای یک زاویه پره عملکرد بهینه حاصل خواهد شد. حداکثر بهره‌برداری از انرژی باد زمانی روی می‌دهد که به ازای سرعت‌های مختلف باد ضریب عملکرد توربین در مقدار بیشینه خود قرار می‌گیرد که بدین منظور سرعت رتور در سرعت‌های مختلف باد به گونه‌ای مناسب تغییر داده می‌شود. روش فوق در توربین‌هایی که توربین سرعت متغیر نامیده می‌شوند، بکار گرفته می‌شود.

رابطه بین توان و سرعت باد، با اعمال مقدار مناسب θ, λ و در نتیجه ضریب عملکرد مطلوب به ازای سیستم‌های کنترلی مختلف، منحنی توان - سرعتی به شکل زیر خواهد شد:

¹ Tip Speed Ratio



شکل ۲-۵: منحنی توان - سرعت [49].

شکل فوق را می‌توان به چهار ناحیه عملکردی تقسیم کرد [۴۹]:

۱- ناحیه‌ای که به دلیل محتوای کم انرژی باد توانی تولید نمی‌شود و توربین به چرخش خود ادامه می‌دهد ولی توانی تولید نمی‌کند. سرعت‌های باد کمتر از $4 m/s$ در این ناحیه تعریف می‌شوند.

۲- در این ناحیه هدف دست یافتن به ضریب عملکرد بهینه و انرژی دریافتی بیشینه از باد است. در این ناحیه سیستم کنترلی در جهتی عمل می‌کند تا بتوان بیشترین توان را از باد دریافت کرد. در شکل فوق این ناحیه بین سرعت شروع و سرعت نامی است.

۳- در این ناحیه محتوای انرژی باد برای تولید توان نامی کافی است و با افزایش سرعت باد از سرعت نامی سیستم کنترلی با کاهش ضریب عملکرد رتور در جهتی عمل می‌کند تا توان نامی بدست آید و مانع از افزایش بیش از حد مجاز توان می‌شود. این ناحیه بین سرعت نامی و سرعت قطع تعریف می‌شود.

۴- در این ناحیه به دلیل سرعت خیلی زیاد باد در طول طوفان‌ها و تندبادها، برای ممانعت از صدمه دیدن سیستم مکانیکی، سیستم از شبکه خارج می‌شود و توانی تولید نمی‌کند. در این ناحیه سیستم کنترلی به شکلی عمل می‌کند تا از مسیر باد خارج شود و سیستم ترمز مکانیکی نیز عمل می‌کند. به طور معمول سرعت باد بالاتر از $25 - 30 m/s$ در این ناحیه قرار می‌گیرد.

اعمال اهداف فوق با استراتژی‌های کنترلی مختلفی در توربین‌های باد مورد استفاده قرار گرفته است. توربین‌های بادی باید طوری بهینه شوند تا بیشینه توان خروجی را در حدود محتمل سرعت باد تولید کنند و طراحی آن‌ها برای سرعت‌های بالا و غیر محتمل باد غیر اقتصادی است. در سرعت‌های بالای باد در تمام توربین‌های بادی لازم است تا توان خروجی محدود شود در غیر این صورت در حین عملکرد، توربین با اضافه بار در رتور همراه بود و قسمت گردنده مکانیکی و همچنین ژنراتور الکتریکی با مشکل مواجه خواهد شد.

۲-۴-۱- کنترل انحرافی ناسل توربین بادی

برای عملکرد بهینه، توربین بادی باید در جهت باد قرار بگیرد و این کار توسط مکانیزمی با نام کنترل انحرافی^۱ صورت می‌گیرد. همچنین در شرایط سرعت بالا و غیر مطلوب باد، ترمزهایش باید بکار گرفته شود. در ماشین‌های بادی قدیمی این کنترل‌ها به صورت مکانیکی انجام می‌شود ولی در ماشین‌های جدیدتر این عمل به صورت هیدرولیکی و در انواع مدرن‌تر و طراحی‌های جدیدترین عمل توسط موتورهای پله‌ای صورت می‌گیرد.

۲-۴-۲- کنترل توان با تغییر زاویه پره

در توربین‌های بادی در روش کنترل توان با تغییر زاویه پره^۲، کنترل‌کننده الکترونیکی، متوسط توان خروجی توربین را در چند ثانیه اندازه‌گیری می‌کند، اگر مقدار توان از مقدار ایمن از پیش تعیین شده‌ی توان تجاوز کند، سیگنال الکتریکی تولید می‌شود که پره‌ها را به سمتی غیر از جهت باد می‌چرخاند. اگر مقدار توان از مقدار ایمن از پیش تعیین شده‌ی توان کمتر باشد، بال طوری چرخانده می‌شود تا در زاویه بهینه‌ای از برخورد باد به مقطع آیرودینامیکی پره قرار بگیرد. به منظور قرار گرفتن پره‌ها در

¹ Yaw control

² Pitch power control

زاویه بهینه و دریافت توان خروجی بیشینه طراحی دقیقی لازم است. مکانیزم کنترل زاویه به صورت هیدرولیکی کنترل می‌شود و در روش‌های مدرن‌تر این کار توسط موتورهای پله‌ای صورت می‌گیرد.

۲-۴-۳ - کنترل توان با روش استال

کنترل غیر فعال در توربین‌ها بر پایه مشخصه ذاتی رتور ماشین استوار است و در آن مشخصه آیرودینامیکی رتور گشتاور تولیدی در سرعت‌های بالای باد را محدود می‌کند. در این روش هندسه پره‌های رتور طوری طراحی شده است تا وقتی که سرعت باد خیلی زیاد شد پره رتور در سمتی که با باد مواجه است، جریان گردابی از باد به وجود آورد تا مانع از انتقال گشتاور زیاد شود.

در توربین‌های کنترل شده به روش استال^۱ برای اطمینان از شرایط ایجاد جریان گردابی به طور پیوسته از ریشه‌ی بال اتفاق می‌افتد، بال تابیده شده است. مزیت اصلی توربین‌های بادی کنترل شده به روش استال نبود قسمت متحرک و سیستم کنترل است. از مشکلات این روش کنترلی طراحی آیرودینامیکی بسیار پیچیده و مشکلات ناشی از دینامیک ساختاری توربین مانند (نوسانات ایجاد شده) است.

۲-۴-۴ - کنترل استال فعال

روش کنترلی استال فعال^۲، ترکیبی از دو روش قبلی است و در سرعت‌های بالای باد با استفاده از روش استال غیر فعال توان را محدود می‌کند و در سرعت‌های متوسط و کم باد با استفاده از روش کنترل زاویه پره بیشینه توان را در خروجی به ما می‌دهد.

مزیت این روش در سرعت‌های کم دریافت توان بیشینه از ژنراتور می‌باشد. در سرعت‌های بالای باد مزیت آن بدین صورت است که سطح توان را مانند ژنراتورهای سرعت ثابت در سطح ثابتی نگه می‌دارد.

¹ Stall control

² Active stall control method

منحنی عملکردی و مقایسه این سه روش در شکل ۲-۵ نشان داده شده است. اجزای کنترلی معرفی شده در این بخش، قسمت‌های ۷، ۱۱، ۱۲، ۱۳، ۱۴ و ۱۵ نشان داده شده در شکل ۲-۲ هستند.

۲-۵- معرفی انواع ژنراتورهای بکار رفته در توربین‌های بادی

یک توربین بادی از قسمت‌های مختلفی تشکیل شده که در شکل ۲-۲ نشان داده شده است. مهم‌ترین قسمت توربین که بر تعیین دیگر المان‌های قرار گرفته در ناسل اثر مستقیمی دارد ژنراتور بکار رفته در آن است که وظیفه تبدیل انرژی مکانیکی به انرژی الکتریکی را به عهده دارد.

ژنراتورهای بکار رفته در توربین‌های بادی را می‌توان از چند طریق دسته‌بندی کرد. به طور مثال اتصال ژنراتورها با و یا بدون جعبه دنده به پرها و ژنراتورهای با و یا بدون مبدل قدرت از انواع تقسیم بندی‌ها هستند. دسته بندی دیگری که در این پایان‌نامه نیز بدین روش صورت گرفته بر اساس نوع ژنراتور بکار رفته است که به صورت زیر دسته بندی شده است:

شده است.

- ژنراتورهای القایی

ژنراتور القایی قفس سنجابی (SCIG)^۱

ژنراتور القایی رتور سیم‌پیچی شده با مقاومت متغیر در رتور (OSIG)^۲

ژنراتور القایی تغذیه دوگانه (DFIG)^۳

- ژنراتورهای سنکرون

ژنراتور سنکرون با رتور سیم‌پیچی شده (WRSIG)^۴

ژنراتور سنکرون با آهنربای دائم (PMSG)^۵

¹ Squirrel Cage Induction Generator

² Opti-Slip Induction Generator

³ Doubly-Fed Induction Generator

⁴ Wound Rotor Synchronous Generator

⁵ Permanent Magnet Synchronous Generator

- ژنراتورهای خاص

ژنراتورهای ولتاژ بالا (HVG)^۱

ژنراتورهای سوئیچ رلوکتانس (SRG)^۲

ژنراتورهای شار معکوس (TFG)^۳

لازم به ذکر است که ژنراتورهای سنکرون با مغناطیس دائم در دو نوع سرعت پایین و سرعت متوسط تولید می‌شود که نوع سرعت متوسط آن تنها در کارخانه ABB تولید می‌شود و هنوز به مرحله تولید تجاری کامل نرسیده است.

در این قسمت به هر یک از انواع ژنراتورهای بکار رفته در توربین‌های بادی پرداخته شده است. برای این کار، ژنراتورها به دو نوع کلی ژنراتورهای القایی و سنکرون تقسیم شده‌اند و ابتدا به کلیات هر کدام از این دو نوع ژنراتور پرداخته شده است و در ادامه در هر بخش انواع هر یک از این ژنراتورها با توضیحات مربوطه آمده است.

۲-۵-۱- ژنراتورهای القایی

اکثر ماشین‌های الکتریکی دوار را می‌توان در دو حالت موتوری و ژنراتوری بکار برد. ژنراتور القایی از دو بخش اصلی استاتور و رتور تشکیل شده است. استاتور حاوی سیم‌پیچ‌های سه فاز در شیارهای استاتور است و بخش رتور که بسته به نوع عملکرد و شرایط می‌تواند انواع مختلفی داشته باشد. در حالت ژنراتوری محور توسط گرداننده (توربین بادی) چرخانده می‌شود، همچنین سیم‌پیچ‌های استاتور با دریافت توان راکتیو مورد نیاز خود برای مغناطیس‌کنندگی هسته، در هادی‌های در حال چرخش رتور جریانی القا می‌کند که این جریان میدان مغناطیسی چرخانی را ایجاد می‌کند، سرعت نسبی بین میدان

¹ High-Voltage Generator

² Switch Reluctance Generator

³ Transverse Flux Generator

مغناطیسی چرخان پدید آمده و میدان دوار حاصل از سیم‌پیچی‌های استاتور، سبب ایجاد ولتاژ در سیم-پیچی‌های استاتور می‌شود.

ژنراتور آسنکرون، ذاتاً یک ژنراتور با ولتاژ و فرکانس متغیر است و قادر به ثابت نگه داشتن ولتاژ و فرکانس خروجی تحت شرایط بار متغیر نیست. ماشین آسنکرون از نظر اقتصادی ارزان‌تر از ماشین سنکرون تمام می‌شود و همچنین از سادگی و استحکام بیشتری نسبت به ژنراتور سنکرون برخوردار است، بنابراین اگر بتوان معایب مربوط به ثابت نبودن ولتاژ و فرکانس خروجی ژنراتور آسنکرون را برطرف ساخت به یک مولد انرژی الکتریکی ارزان و قابل اطمینان دست یافته‌ایم که می‌تواند در مناطق دورافتاده نصب‌شده و با استفاده از منابع انرژی کوچک محلی مانند رودخانه‌های کوچک یا انرژی باد و گاز و غیره و با حداقل نیاز به تعمیر و نگهداری نیاز این مناطق به انرژی الکتریکی را تأمین کند.

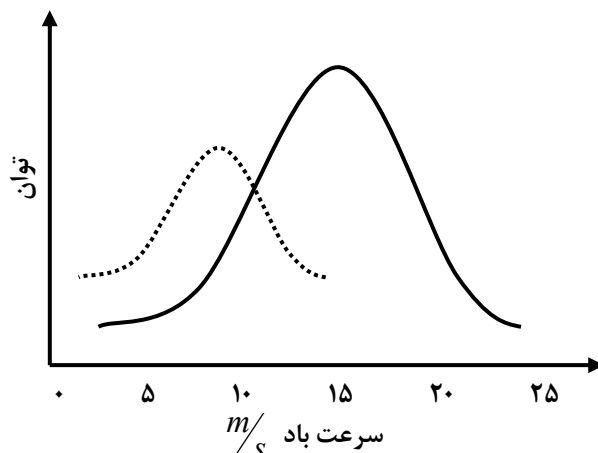
۲-۵-۱-۱- قفس سنجابی

در این نوع از ژنراتورها، هادی در رتور به صورت میله‌هایی مورب (معمولاً از جنس آلومینیوم) بوده که در دو انتها اتصال کوتاه شده‌اند. این نوع رتور در ژنراتورهای القایی مزایایی نظیر استحکام مکانیکی بیشتر و هزینه کمتر را در پی خواهد داشت.

با تغییر سرعت باد، لغزش در این ژنراتورها تغییر زیادی نمی‌کند و تغییرات آن به 1-2% محدود می‌شود و همچنین از طرف دیگر منحنی گشتاور - سرعت و به همان نسبت منحنی توان - سرعت نیز فقط در یک سرعت، بیشینه گشتاور و یا بیشینه توان را نتیجه می‌دهد بنابراین این نوع از ژنراتورهای القایی در توربین‌های بادی با سرعت ثابت بکار می‌روند و با تغییر در سرعت باد به دلیل خارج شدن از نقطه بهینه در منحنی توان - سرعت، توان تولیدی بهینه نخواهد بود و تغییرات در سرعت باد به صورت استرس مکانیکی بر ژنراتور تحمیل شده و میرا می‌شود.

در گذشته در مواردی برای بهبود راندمان عملکرد، توربین بادی با دو ژنراتور بکار گرفته شده است که یکی در سرعت کم و دیگری در سرعت‌های بالاتر باد توان بهینه را نتیجه می‌داده است. ولی امروزه با تغییر تعداد قطب‌های یک ژنراتورهای القایی قفس سنجابی، دو منحنی توان - سرعت حاصل می‌شود که

می‌توان دو سرعت سنکرون داشت و توان بیشتری از آن استخراج کرد، شکل ۶-۲ منحنی توان سرعت در این حالت را نشان می‌دهد.

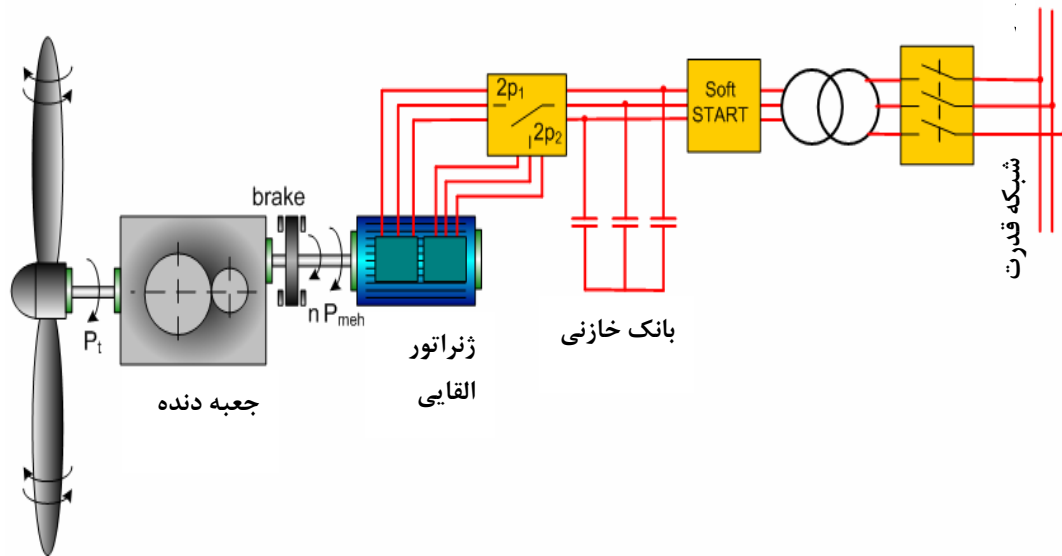


شکل ۶-۲: منحنی توان سرعت با دو سرعت سنکرون.

در این صورت با تغییر در سرعت باد، ضریب عملکرد (C_p) مناسب‌تری نسبت به حالت تک‌سرعت بدست خواهد آمد و بنابراین توان بیشتر و راندمان بالاتری نسبت به مدل تک‌سرعت از خود نشان می‌دهد علاوه بر مسائل فوق تلفات الکتریکی رتور و نویز صوتی حاصل از جعبه دنده نیز کاهش خواهد یافت.

یکی از بزرگ‌ترین معایب این ژنراتورها نیاز به توان راکتیو جهت مغناطیس‌کنندگی هسته است. توان راکتیو مصرفی در این ژنراتورها غیر قابل کنترل است و به شرایط باد بستگی دارد و به ازای باد بیشتر، توربین توان اکتیو بیشتری تولید می‌کند اگر توان راکتیو بیشتری جذب کند. این توان راکتیو یا از شبکه جذب می‌شود و یا باید توسط بانک خازنی فراهم شود.

شکل ۷-۲ نحوه قرار گرفتن ژنراتورهای القایی قفس سنجابی در توربین بادی متصل شده به شبکه را نشان می‌دهد.



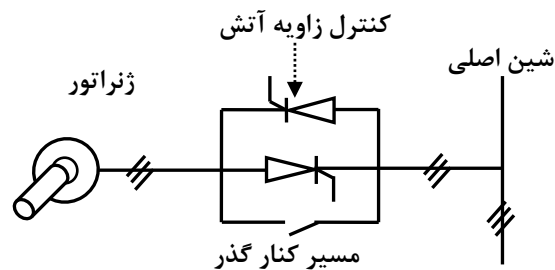
شکل ۲-۷: نحوه اتصال ژنراتورهای القایی قفس سنجابی به شبکه.

برای عملکرد تنها وجود بانک خازنی برای تولید توان راکتیو ضروری است ولی در هنگام اتصال به شبکه این توان راکتیو می‌تواند بدون حضور بانک خازنی توسط شبکه تأمین شود که در این صورت سبب ضعیف شدن شبکه و افزایش تلفات شبکه می‌شود.

با توجه به شکل بین سیم‌پیچ استاتور و شبکه راه‌انداز نرم^۱ قرار گرفته است. به هنگام اتصال ژنراتور به سیستم قدرت جهت مغناطیس‌کنندگی و راه‌اندازی، ژنراتور هفت الی هشت برابر جریان نامی از شبکه می‌کشد و اگر شبکه ضعیف باشد سبب افت ولتاژ در شبکه می‌شود؛ بنابراین برای جلوگیری از این وضعیت راه‌انداز را در مسیر قرار می‌دهند تا جریان هجومی را محدود کند و ژنراتور به صورت تدریجی به حالت نرمال خود برسد. وقتی سرعت ژنراتور بیشتر از سرعت سنکرون شود نیز راه‌انداز نرم عمل خواهد کرد و در غیر از حالات فوق توسط یک کلید اتصال کوتاه از مدار حذف می‌شود.

^۱ Soft starter

شکل ۸-۲ طرح ساده‌ای از یک راه‌انداز نرم را نشان می‌دهد که با استفاده از کنترل زاویه آتش تریستور ژنراتور به آرامی می‌تواند به شبکه متصل می‌شود. در هر فاز دو تریستور برای هدایت قرار گرفته که در جهت‌های مخالف هم به صورت موازی قرار گرفته‌اند [49].



شکل ۸-۲: نحوه اتصال سیستم راه‌انداز به ژنراتور القایی.

همان‌طور که در شکل ۷-۲ نشان داده شده است در این نوع اتصال محور پره‌ها با استفاده از جعبه دنده به رتور ژنراتور متصل می‌شود و استاتور مستقیماً به شبکه با فرکانس ثابت، f ، (50 یا 60 هرتز) متصل شده است که این عامل هزینه جعبه دنده را به سیستم اضافه می‌کند.

از مزایای سیستم سرعت ثابت با ژنراتور القایی قفس سنجابی علاوه بر سادگی، استحکام مکانیکی و قیمت ارزان‌تر آن نسبت به دیگر انواع ژنراتورها، تلفات کم رتور است و دلیل آن است که در سرعت ثابت محور، لغزش در حدود 1-2% است و تلفات رتور نیز کم و مطلوب خواهد بود.

۲-۱-۵-۲ ژنراتور القایی رتور سیم پیچی شده

سیم‌پیچی استاتور در این نوع ژنراتورها و نحوه تولید گشتاور در آن، مشابه انواع دیگر ژنراتورهای القایی بوده و تفاوت آن در شکل رتور آن است.

در این نوع از ژنراتورها مقاومت رتور تغییر می‌یابد، که این تغییر مقاومت در مدل‌های قدیمی‌تر از طریق حلقه‌های لغزانی که به یک سری مقاومت متغیر، متصل شده‌اند انجام می‌شود که در آن با توجه به سرعت باد می‌توان مقدار مقاومت متغیر رتور را به شکلی انتخاب کرد تا توان بهینه از ژنراتور حاصل شود. در مدل‌های پیشرفته‌تر، برای رفع مشکلات ناشی از فرسایش، خرابی و نگهداری حلقه‌های لغزان و

جاروبک متصل شده به آن، واحد تغییر مقاومت رتور شامل میکروپروسسور، سنسور و مقاومتی است که از راه دور کنترل می‌شود.

این ژنراتورها در رنجی از تغییرات سرعت باد (حدود $\pm 10\%$) توان بیشینه را می‌دهند و نسبت به ژنراتور القایی قفس سنجابی که فقط در سرعت مشخصی از باد توان بیشینه بدست می‌آید، راندمان بالاتری دارند و به عنوان ژنراتورهای با سرعت نیمه متغیر نیز مشهورند. این روش کنترل که روش لغزش بهینه^۱ نامیده می‌شود توسط آقای وستاس^۲ ابداع شده و امروزه نیز در کارخانه وستاس بکار گرفته می‌شود.

نحوه اتصال به شبکه در این نوع از ژنراتورها مشابه ژنراتور القایی قفس سنجابی بوده و همچنان نیاز به جذب توان راکتیو، سیستم راه‌انداز و بانک خازنی نیز وجود خواهد داشت.

۲-۵-۱-۳- ژنراتورهای القایی تغذیه دوگانه

ژنراتور القایی رتور سیم‌پیچی شده دارای سیم‌پیچی سه فاز روی رتور و استاتور است. ترمینال این دو سیم‌پیچ استاتور و رتور به منبع انرژی متصل هستند، از این رو به عنوان ژنراتورهای القایی تغذیه دوگانه و یا ژنراتور القایی با دو خروجی (DOIG)^۳ شناخته می‌شوند [۵۰].

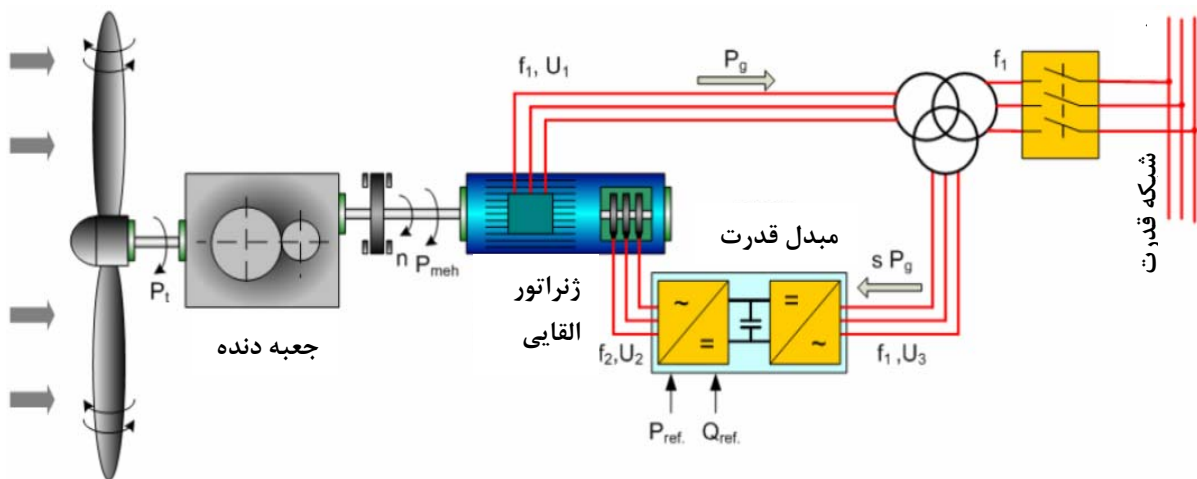
با فراهم کردن مبدل الکترونیک قدرت که مدار رتور را از طریق حلقه‌های لغزان و جاروب‌ها تغذیه می‌کند، عملکرد هم برای حالت موتوری و هم برای حالت ژنراتوری امکان‌پذیر است و می‌تواند توان را در هر دو جهت اداره کند. شکل ۲-۹ چگونگی اتصال به شبکه و چگونگی کاربرد این نوع از ژنراتورها در توربین بادی را نشان می‌دهد.

^۱ Optimum Slip (OptiSlip)

^۲ Vestas

^۳ Double Output Induction Generator

در این ژنراتورها مبدل قدرت در سمت رتور قرار گرفته و توان رتور از آن عبور می‌کند. اگر توان مبدل توان نامی در نظر گرفته شود در کل رنج تغییرات سرعت باد، ژنراتور عملکرد مطلوبی خواهد داشت ولی به این دلیل که تغییرات باد به ندرت به این حدود می‌رسد این امر اقتصادی نیست و توان مبدل به طور معمول در حدود 30% توان نامی در نظر گرفته می‌شود؛ بنابراین در این حدود توان بهینه را می‌توان دریافت کرد.



شکل ۲-۹: نحوه اتصال DFIG به شبکه.

با کنترل مناسب تغذیه رتور، در رنجی از تغییرات باد (±30%) می‌توان توان بهینه را از انرژی باد دریافت کرد و راندمان عملکردی مناسبی را بدست آورد؛ بنابراین استفاده از این نوع ژنراتورها در توربین‌های بادی سرعت متغیر بسیار مطلوب خواهد بود.

فرکانس استاتور ثابت و برابر فرکانس شبکه است، با کنترل فرکانس اعمالی به رتور با توجه به تغییر در سرعت باد و محور ژنراتور، می‌توان سیستم را کنترل کرد. روابط زیر چگونگی کنترل مطلوب ژنراتور توسط فرکانس اعمالی به رتور را نشان می‌دهد [۵۱]:

$$n_1 = n + n_2 \quad \frac{f_1}{p_1} = n + n_2 \Rightarrow f_1 = np_1 + n_2 p_1 \quad (11-2)$$

برای تولید ولتاژ باید شرط $p_1 = p_2 = p$ برقرار باشد.

$$\stackrel{p_1=p_2=p}{\Rightarrow} f_1 = nP + f_2 \Rightarrow n = \frac{f_1 \pm f_2}{p} \quad (12-2)$$

در روابط فوق P_1 و P_2 ، تعداد جفت قطب مدار استاتور و رتور، f_1 و f_2 ، فرکانس ولتاژ اعمالی بر استاتور و رتور، n ، سرعت محور ژنراتور، n_1 سرعت میدان ناشی از سیم پیچ استاتور و n_2 سرعت میدان ناشی از سیم پیچ رتور است.

در روابط فوق n برابر است با حاصل ضرب سرعت محور پره‌ها در نسبت جعبه دنده. n در هر لحظه بسته به سرعت باد مقدار مشخصی دارد، بنابراین با کنترل فرکانس اعمالی به رتور (f_2)، فرکانس استاتور (f_1) ثابت و برابر فرکانس شبکه حاصل می‌شود؛ بنابراین ژنراتور ولتاژ و فرکانس ثابتی در استاتور فراهم می‌کند، در صورتی که رتور با ولتاژ و فرکانس متغیری توسط مبدل قدرت تغذیه شده است.

سرعت مکانیکی محور (ω_m) در حالت ماندگار مطابق قضیه فرکانسی بیان شده در بالا از رابطه (۱۳-۲) پیروی می‌کند.

$$\omega_m = \omega_s \pm \omega_r \quad (13-2)$$

در رابطه قبل ω_{sh} ، ω_s و ω_r به ترتیب سرعت زاویه‌ای ولتاژ استاتور، سرعت زاویه‌ای ولتاژ اعمالی بر رتور و سرعت زاویه‌ای شفت است. علامت مثبت در رابطه فوق زمانی است که توالی فاز رتور و استاتور مشابه بوده و $\omega_m < \omega_s$ باشد، به این حالت عملکرد زیر سنکرون می‌گویند. علامت منفی در معادله فوق متناظر با حالتی است که توالی فاز رتور منفی بوده (یعنی بر خلاف توالی فاز استاتور باشد) و $\omega_m > \omega_s$ باشد، به این حالت عملکرد فوق سنکرون می‌گویند.

با توجه به معادلات این ژنراتور به سادگی می‌توان ثابت کرد که توان استاتور، P_s ، توان رتور، P_r و توان مکانیکی شفت ژنراتور، P_m ، با توجه به روابط زیر به هم وابسته‌اند:

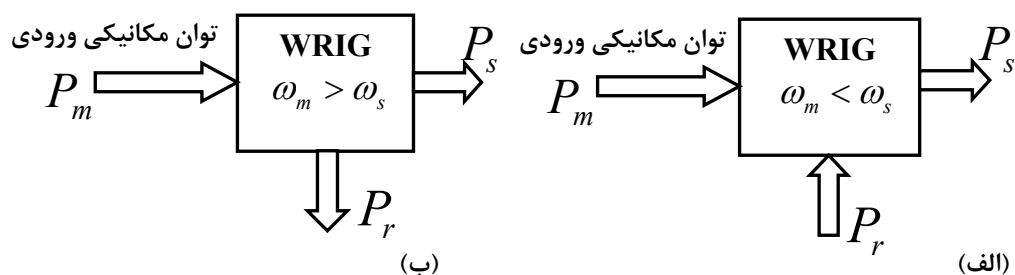
$$P_m = P_s \pm P_r \quad (14-2)$$

$$P_r = -sP_s \quad (15-2)$$

در رابطه فوق، فرض شده در حالت ژنراتوری $P_s > 0$ است و لغزش برابر است با $s = \frac{\omega_s - \omega_r}{\omega_s}$ ؛

بنابراین جهت شارش توان در رتور به سرعت عملکرد رتور بستگی دارد. با توجه به رابطه (۱۵-۲)، جهت

توان در حالت ژنراتوری برای دو حالت زیر سنکرون و فوق سنکرون در شکل ۲-۱۰ نشان داده شده است؛ بنابراین مدار رتور در حالت ژنراتوری می‌تواند هم توان الکتریکی را جذب و هم توان الکتریکی آزاد سازد. به طور کل جهت شارش توان رتور و استاتور در حالات عملکرد موتوری و ژنراتوری در جدول ۲-۳ لیست شده است.



شکل ۲-۱۰: منحنی عملکرد یک ژنراتور DFIG (الف) زیر سنکرون (ب) فوق سنکرون.

جدول ۲-۳: حالات عملکرد ممکن برای ژنراتور القایی تغذیه دوگانه.

حالت عملکردی	زیر سنکرون		فوق سنکرون	
	موتوری	ژنراتوری	موتوری	ژنراتوری
P_m	< 0	> 0	< 0	> 0
P_s	< 0	> 0	< 0	> 0
P_r	> 0	< 0	< 0	> 0

تحويل توان راکتيو توسط DFIG، به ظرفيت مبدل سمت رتور بستگی دارد. در DFIG رنج تغییرات لغزش حدود $\pm 30\%$ است و با توجه به اینکه تغییرات در سرعت باد قابل پیش بینی نیست، رنج تغییرات لغزش، سیستم را برای دریافت توان بهینه انعطاف پذیر خواهد کرد. این امر باعث افزایش استفاده از DFIG شده است. در این ژنراتورها نسبت جعبه دنده طوری انتخاب می‌شود تا سرعت سنکرون ژنراتور حدود 90% سرعت نامی توربین باشد و در این صورت سرعت توربین می‌تواند حدود

(60-120) % تغییر کند. از مشکلات این نوع ژنراتورها می‌توان به کنترل پیچیده، فرسایش و خرابی جاروبک و حلقه‌های لغزان و مشکلات مربوط به تعمیر و نگهداری و نیاز به جعبه دنده اشاره کرد.

۲-۵-۲ ژنراتورهای سنکرون

ماشین‌های سنکرون تحت سرعت ثابتی بنام سرعت سنکرون می‌چرخند و جزء ماشین‌های جریان متناوب (AC) محسوب می‌شوند. در این ماشین‌ها بر خلاف ماشین‌های القایی (آسنکرون) میدان گردان در فاصله هوایی و رتور با یک سرعت که همان سرعت سنکرون است می‌چرخند. امروزه ژنراتورهای سنکرون در نیروگاه‌ها بیشترین برق را در جهان تولید می‌کنند، البته ژنراتورهای سنکرون بکار رفته در نیروگاه‌های بادی از بعضی جهات با ژنراتورهای سنکرون در نیروگاه‌های معمول دیگر متفاوت است، ولی از لحاظ عملکرد در تولید برق مشابهند.

رتور ژنراتورهای سنکرون بر دو نوع است :

رتور قطب برجسته : عمدتاً در ماشین‌هایی بکار می‌رود که سرعت سنکرون آن‌ها کم است.

رتور استوانه‌ای : عمدتاً در ماشین‌هایی بکار می‌رود که سرعت سنکرون آن‌ها زیاد است.

به طور مثال در نیروگاه‌های بخاری از ژنراتور با رتور استوانه‌ای و در نیروگاه‌های بادی از رتور قطب برجسته استفاده می‌شود.

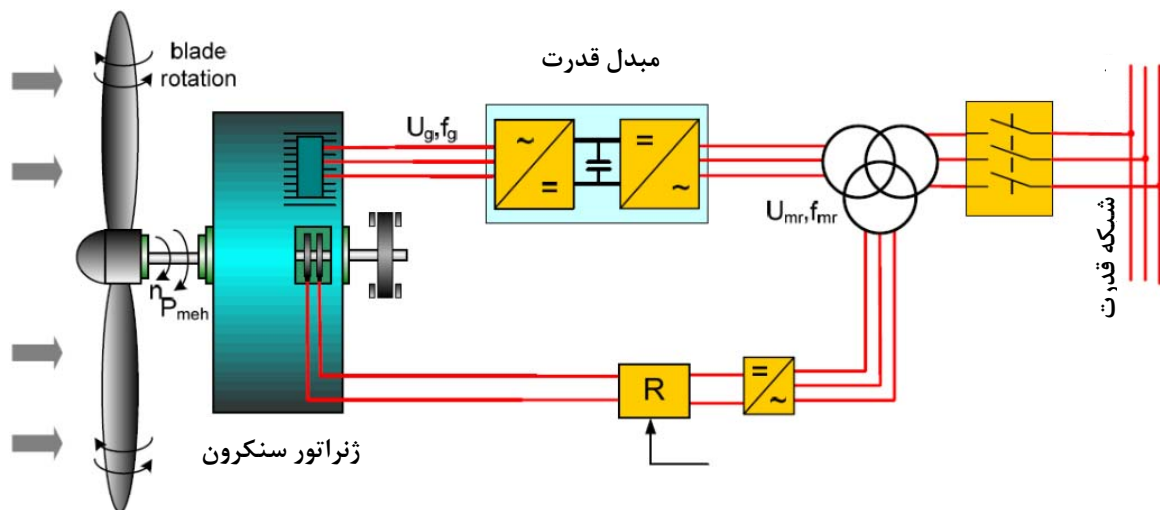
ژنراتورهای سنکرون معمولاً برای کاربرد به صورت اتصال مستقیم به محور پره‌های توربین مورد استفاده قرار می‌گیرند و فاقد جعبه دنده هستند، بنابراین با تعداد قطب‌های بالا ساخته می‌شوند. به علت تعداد قطب‌های زیاد و سرعت چرخش کم، ژنراتور باید با گشتاور زیاد باشد که این سبب افزایش وزن و حجم این نوع ژنراتورها می‌شود [۵۲].

این ژنراتورها مطابق با رابطه (۲-۱۱) نوسانات در تغییر باد را به خروجی ژنراتور منتقل می‌کنند و با تغییر باد و در نتیجه تغییر سرعت رتور، فرکانس خروجی آن نیز تغییر می‌کند؛ بنابراین به طور مستقیم به شبکه متصل نمی‌شوند و بین خروجی سیم پیچی‌های استاتور ژنراتور و شبکه، مبدل قدرتی که توان

آن برابر با توان نامی ماشین است قرار می‌گیرد. مبدل قدرت عملکرد بهینه و مطلوب ژنراتور را در رنج وسیعی از تغییرات باد فراهم می‌کند و همچنین در هنگام ایجاد خطا در شبکه، سبب عدم انتقال آن به ژنراتور می‌شود.

۲-۵-۲-۱ ژنراتور سنکرون با تحریک کلاسیک

این نوع از ژنراتورهای سنکرون رتور سیم‌پیچی شده هستند که از طریق حلقه لغزان و جاروبک، سیم پیچ‌های رتور با ولتاژ DC تغذیه می‌شوند و به سیستم تحریک نیاز دارد. سیستم تحریک با استفاده از سیستم تنظیم ولتاژ (AVR) کنترل می‌شود. شکل ۱۱-۲ نحوه اتصال این نوع ژنراتورها را در توربین بادی نشان می‌دهد.



شکل ۱۱-۲: نحوه اتصال ژنراتورهای SG.

۲-۵-۲-۲ ژنراتورهای سنکرون با تحریک آهنربای دائم

در این ژنراتورهای سنکرون، تحریک رتور با استفاده از آهنربای دائم صورت می‌گیرد و رتور فاقد حلقه لغزان، جاروبک و سیم پیچی رتور می‌باشد. نحوه اتصال این نوع ژنراتورها به شبکه از طریق مبدل قدرت است.

قیمت، تنوع و توانایی آهنرباهای دائم موجود در بازار، نقش مهمی در پیشرفت این نوع ژنراتورهای سنکرون ایفا می‌کنند. از معایب این ژنراتورها می‌توان به مشکلات نصب آهنربا در رتور، هزینه آهنربا و

کامبود تجربه در ساخت اشاره کرد. راندمان بالاتر به دلیل تلفات کم رتور، مدار خنک کننده ساده‌تر، اندازه و ابعاد کمتر رتور، نگهداری ساده‌تر و عدم وجود سیستم تحریک جداگانه از مزایای ژنراتور سنکرون آهنربای دائم بر ژنراتور سنکرون با تحریک کلاسیک است.

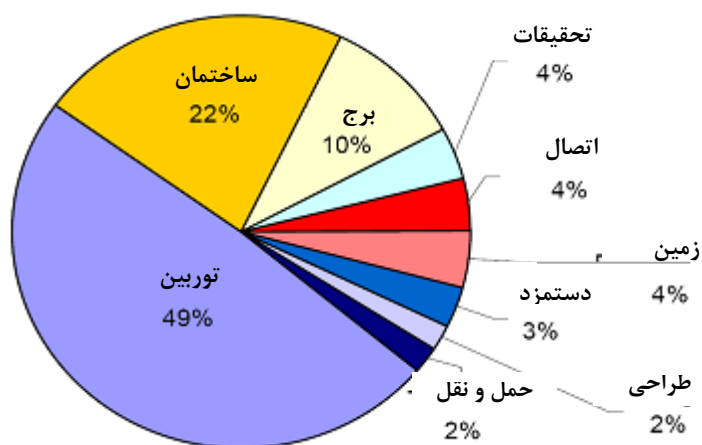
۲-۶- مقایسه انواع ژنراتورهای بکار رفته در نیروگاه‌های بادی

در جدول ۲-۴ مزایا و معایب هر یک از این نوع ژنراتورها به طور خلاصه آمده است:

جدول ۲-۴: مزایا و معایب انواع ژنراتورها.

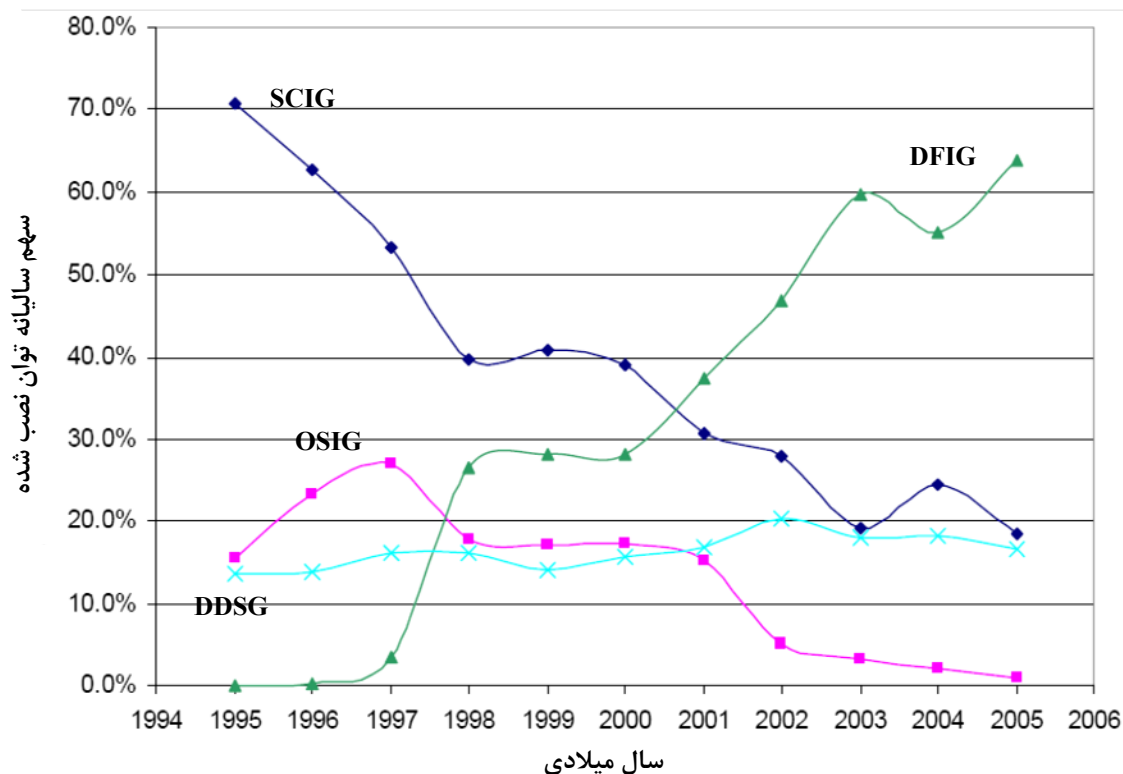
ژنراتور	مزایا	معایب
ژنراتور القایی قفس سنجابی تک‌سرعته دوسرعته ۴ یا ۶ p	ساختمان ساده - نگهداری ساده و آسان - گشتاور در توربین کاهش پالس - هزینه کمتر - اتصال مستقیم به شبکه قدرت -	نیاز به توان راکتیو - نیاز به سیستم راه‌انداز - کاربرد فقط برای توربین‌های سرعت ثابت - احتیاج به جعبه دنده -
ژنراتور القایی تغذیه دوگانه	کاهش قابل توجه توان، هزینه و تلفات - مبدل قدرت امکان تنظیم سرعت برای استفاده - بهینه از انرژی (حدود ۲۵-۲۰٪) و عملکرد زیرسنکرون و فوق سنکرون امکان کنترل توان اکتیو و راکتیو -	فرسایش، خرابی و نگهداری مربوط به جاروبک - لغزان و حلقه سیستم کنترل پیچیده کل واحد - مشکلات مرتبط با اتصال مستقیم به شبکه -
ژنراتور سنکرون با تحریک کلاسیک (با رتور سیم‌پیچی شده) با اتصال مستقیم	کنترل ساده توان راکتیو - عمل در رنج وسیعی از سرعت - عدم نیاز به جعبه دنده - راندمان بالاتر -	نیاز به مبدل قدرت با توانی مشابه توان ژنراتور - نیاز به سیستم تحریک - فرسایش، خرابی و نگهداری مربوط به جاروبک - حجم و وزن زیاد، مشکلات ساخت و انتقال -
ژنراتور سنکرون با آهنربای دائم با اتصال مستقیم	ساختمان ساده رتور بدون مشکلات - ناشی از حلقه لغزان و جاروبک تلفات خیلی کم رتور و راندمان بالاتر - عدم نیاز به گیربکس -	هزینه بالای آهنربای دائم - احتمال غیر مغناطیس شدن آهنربای دائم - تجربه کم در ساخت، حمل و نقل و نصب آن - حجم و وزن زیاد، مشکلات حمل و نقل و نصب -

با توجه به جدول ۲-۴ و علاقه صنعت، ژنراتور القایی تغذیه دوگانه و ژنراتور سنکرون با اتصال مستقیم بدون جعبه دنده دو رقیب برای کاربرد در نیروگاه بادی هستند. در ژنراتور سنکرون جعبه دنده حذف شده که این سبب حذف هزینه و مشکلات ناشی از جعبه دنده می‌شود ولی حذف جعبه دنده سبب افزایش قابل توجه تعداد قطب و در نتیجه افزایش قابل توجه سایز، وزن و هزینه ژنراتور می‌شود که این عامل، فونداسیون، برج و عوامل مکانیکی محکم‌تری را می‌طلبد که با توجه به شکل ۲-۱۲ این عوامل نیز درصد قابل توجهی از هزینه ساخت نیروگاه بادی را تشکیل می‌دهند [45]. از طرف دیگر مبدل قدرت بکار رفته در ژنراتور سنکرون در سمت استاتور آن قرار می‌گیرد و بنابراین باید با توان نامی استاتور باشد، در صورتی که در ژنراتورهای القایی تغذیه دوگانه مبدل در سمت رتور و با توانی در حدود 20-30% توان نامی است که این امر هم سبب کاهش قابل ملاحظه هزینه مبدل بکار رفته در ژنراتورهای القایی تغذیه دوگانه در برابر مبدل بکار رفته در ژنراتور سنکرون می‌شود. در کل با توجه به مطالب بیان شده هزینه نهایی ساخت یک نیروگاه بادی با استفاده از ژنراتور القایی تغذیه دوگانه بسیار کمتر از نیروگاه با ژنراتور سنکرون می‌شود؛ بنابراین در سال‌های اخیر ژنراتورهای القایی تغذیه دوگانه با توجه به عملکرد قابل قبول و هزینه مناسب آن به عنوان ژنراتور غالب در مزارع بادی مطرح شده‌اند.



شکل ۲-۱۲: هزینه تقریبی قسمت‌های مختلف یک توربین بادی.

شکل ۲-۱۳ منحنی نصب انواع ژنراتورها در نیروگاه‌های بادی را تا سال ۲۰۰۵ نشان می‌دهد که در آن با توجه به شکل افت شدید استفاده از ژنراتورهای القایی قفس سنجابی معمولی را در سال‌های اخیر مشاهده شده است که با پیشرفت دیگر انواع ژنراتورها جای خود را به آن‌ها داده که در این میان ژنراتور القایی با تغذیه دوگانه (منحنی مثلثی) از ۰٪ در سال ۱۹۹۶ به ۶۴٪ در سال ۲۰۰۵ بیشترین رشد از لحاظ نصب در جهان را داشته و در طول مدت کوتاهی به ژنراتور غالب در نیروگاه‌های بادی تبدیل شده است. استفاده از ژنراتورهای القایی با رتور سیم‌پیچی شده که از روش مقاومت متغیر بهره می‌برند (منحنی مربعی) نیز با ظهور ژنراتورهای القایی تغذیه دوگانه و مزایای آن کاهش زیادی یافته است. کاربرد ژنراتورهای سنکرون نیز در این مدت تقریباً ثابت مانده است [۵۳].



شکل ۲-۱۳: سهم انواع مختلف ژنراتورها در نیروگاه‌های بادی [53].

فصل سوم

**مدل سازی توربین بادی
با ژنراتور القایی دو سو تغذیه**

۳-۱- مقدمه

یک واحد توربین بادی از قسمت‌های مختلف الکتریکی و مکانیکی تشکیل شده که بر عملکرد ژنراتور موثر است و باید در مدل‌سازی لحاظ شود؛ بنابراین برای مدل‌سازی یک توربین بادی باید قسمت‌های مختلف مکانیکی و الکتریکی آن را مدل کرد. در این فصل ابتدا خاصیت آیرودینامیکی و کنترلی پره‌ها و در ادامه مدل محور پره-جعبه دنده-محور ژنراتور به صورت یک مدل دو-جرمه به عنوان مدل‌سازی بخش مکانیکی مدل شده است. بعد از مدل‌سازی قسمت‌های مکانیکی، مدل‌سازی ژنراتور القایی و سیستم کنترلی اعمالی به رتور آن به عنوان بخش الکتریکی مدل شده است.

۳-۲- مدل آیرودینامیک پره

با توجه به مطالب بیان شده، پره‌ها با توجه به سرعت باد و زاویه‌ای که با جهت باد می‌سازند ضریبی از توان باد (C_p) را دریافت می‌کنند، این ضریب در عمل به نسبت سرعت نوک پره (λ) و زاویه‌ی پره^۱ (β) بستگی دارد. یک راه برای دست آوردن C_p استفاده از جدول داده‌ها است که در مرجع [۵۴] از آن استفاده شده است. در مراجع [۴۲ و ۵۵] روش تقریب C_p توسط یک تابع غیرخطی بکار رفته است. در این پایان‌نامه روش دوم مورد استفاده قرار گرفته است، چون هم نتایج دقیق‌تر و هم سرعت شبیه‌سازی بالاتری دارد.

در مرجع [۵۵] تابع غیرخطی (۳-۱) برای محاسبه‌ی C_p به کار رفته است.

$$C_p = C_1(C_2 - C_3\beta - C_4\beta^x - C_5)e^{-C_6(\lambda,0)} \quad (۳-۱)$$

در معادله‌ی بالا C_1 ، C_3 ، C_4 ، C_5 و x ثابت هستند اما C_2 و C_6 به صورت زیر تعریف شده‌اند:

^۱ Blade angle

$$\begin{cases} C_2 = v/\omega_T \\ C_6 = 0.17v/\omega_T \end{cases} \quad (2-3)$$

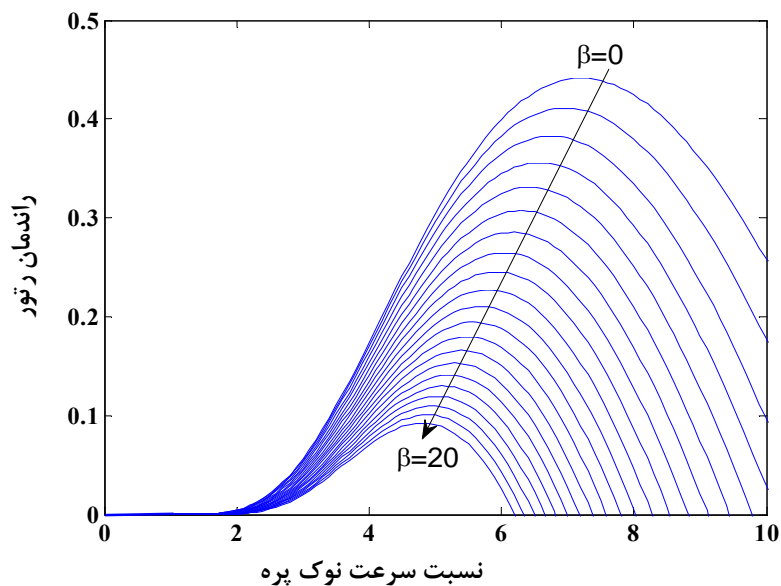
در شرایطی که کنترل زاویه‌ی پره وجود نداشته باشد، مقدار β ثابت در نظر گرفته می‌شود و C_p تنها به λ وابسته خواهد شد. البته این تابع منحصر به فرد نیست و در مقالات مختلف از توابع مختلف برای این منظور استفاده شده است. در مرجع [۵۶] از تابع غیر خطی زیر برای محاسبه‌ی C_p استفاده شده است که همین رابطه در این پایان‌نامه نیز برای مدل‌سازی خاصیت آیرودینامیکی پره بکار رفته است:

$$C_p(\lambda, \beta) = 0.73 \left(\frac{151}{\lambda_i} - 0.58\beta - 0.002\beta^{2.14} - 13.2 \right) e^{\left(\frac{-18.4}{\lambda_i} \right)} \quad (3-3)$$

که λ_i با استفاده از رابطه‌ی (۳-۴) به دست می‌آید:

$$\lambda_i = \left[\left(\frac{1}{\lambda - 0.02\beta} \right) - \left(\frac{-0.003}{\beta^3 + 1} \right) \right]^{-1} \quad (4-3)$$

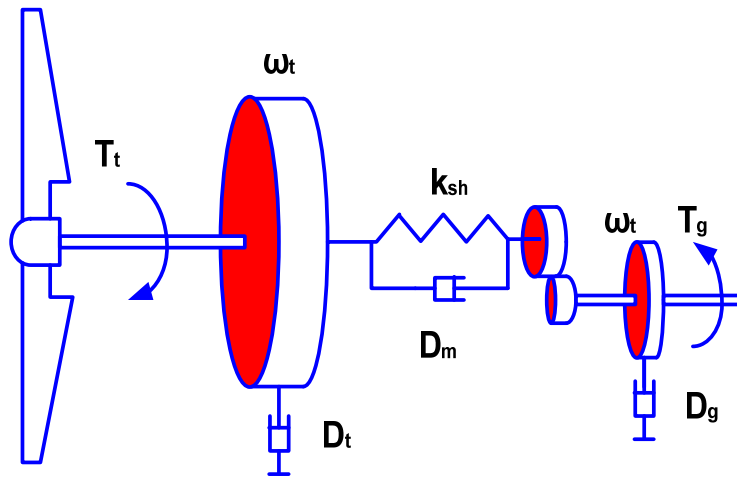
نمودار C_p بر حسب λ برای مقادیر مختلف β در شکل ۱-۳ رسم شده است.



شکل ۱-۳: نمودار C_p بر حسب λ برای مقادیر مختلف زاویه‌ی پره.

۳-۳- مدل جعبه دنده

با توجه به شکل ۲-۲ پره‌ها از طریق جعبه دنده به شفت ژنراتور متصل شده‌اند. رایج‌ترین روش برای مدل‌سازی دینامیک مکانیکی توربین‌های بادی این است که رتور به صورت تعدادی جرم گسسته که به وسیله فنرهای فنرهای که به صورت ضریب سختی و ثابت میرایی تعریف می‌شوند و به هم اتصال دارند، تعریف شود. در مرجع [41] به طور جامع به انواع مختلف مدل‌سازی رتور در چنین حالتی پرداخته شده و مدل‌هایی با مرتبه‌های ۶، ۳، ۲ و ۱ برای رتور پیشنهاد شده است. در اکثر مقالات، ژنراتور القایی تغذیه دوگانه با رتوری با مرتبه یک مدل‌سازی شده است. در مطالعات معدودی مرتبه رتور بالاتر در نظر گرفته شده است. در این پایان‌نامه رتور از مرتبه دو در نظر گرفته شده است. شکل ۲-۳ مدل نظری رتور که بر پایه‌ی مدل دو جرمه است را نشان می‌دهد که برای به دست آوردن روابط حاکم بر آن به کار می‌رود. در این شکل جرم اول از اینرسی توربین و شفت پایین (گشتاور بالا) و جرم دوم از اینرسی رتور ژنراتور و شفت سرعت بالا (گشتاور پایین) تشکیل شده است.



شکل ۲-۳: مدل نظری جعبه دنده شامل سرعت، گشتاور و میرایی های رتور و ژنراتور.

سه جزء میرایی مختلف، میرایی خودی توربین^۱ (D_t)، میرایی خودی ژنراتور^۲ (D_g) و میرایی متقابل^۳ (D_m) در مدل مکانیکی شکل فوق لحاظ شده‌اند. میراکننده‌ی خودی ژنراتور نشان‌دهنده‌ی اصطکاک مکانیکی و بادخوری و میرایی متقابل نمایش‌دهنده‌ی دینامیک متعادل‌کننده است که به خاطر اختلاف سرعت بین رتور ژنراتور و شفت توربین اتفاق می‌افتد، K_{sh} نیز بیانگر سختی شفت است [54].

روابط (۵-۳) تا (۷-۳) معادله‌ی ریاضی مدل دو-جرمه را با صرف‌نظر کردن از میرایی متقابل بین توربین و ژنراتور را نشان می‌دهد [54]:

$$T_T - T_{sh} - D_T \omega_T = J_T \frac{d\omega_T}{dt} \quad (۵-۳)$$

$$T_{sh} - T_G - D_G \omega_G = J_G \frac{d\omega_G}{dt} \quad (۶-۳)$$

$$T_{sh} = K_{sh}(\theta_T - \theta_G) \quad (۷-۳)$$

پارامترهای موجود در معادلات بالا به سمت ژنراتور ارجاع داده شده‌اند. اگر a نسبت انتقال جعبه دنده باشد آنگاه روابط زیر برقرار هستند.

$$\omega_t^{(t)} = \frac{\omega_t^{(g)}}{a} \quad (۸-۳)$$

$$\theta_t^{(t)} = \frac{\theta_t^{(g)}}{a} \quad (۹-۳)$$

$$K_{sh}^{(t)} = a^2 K_{sh}^{(g)} \quad (۱۰-۳)$$

$$D_m^{(t)} = a^2 D_m^{(g)} \quad (۱۱-۳)$$

¹ Turbine self damping

² Generator self damping

³ Mutual damping

در معادلات مدل دوجرمه‌ی تشریح شده با صرف‌نظر از سختی شفت در رتور فقط یک جرم وجود خواهد داشت که مجموع اینرسی رتور ژنراتور و توربین را نشان می‌دهد و به آن مدل مرتبه یک اطلاق می‌گردد. رابطه (۱۲-۳) فرمول سرعت در مدل تک جرمه را نشان می‌دهد:

$$2(H_t + H_g) \frac{d\omega_g}{dt} = T_t - T_g \quad (12-3)$$

در این مدل ساده‌شده فرض شده است که سرعت رتور ژنراتور و توربین برابر هستند، به این معنی که از نوسانات چرخشی^۱ شفت صرف‌نظر شده است. تفاوت‌هایی که بر نتایج شبیه‌سازی در ساده‌سازی از مدل دو-جرمه به مدل تک-جرمه ظاهر می‌شود در فصل بعد نشان داده شده است.

۳-۴ - مدل‌سازی ژنراتور القایی

به طور کل روابط مربوط به ژنراتور القایی را می‌توان با استفاده از تبدیل پارک در دستگاه دو محوری (q و d) با در نظر گرفتن مدل تک-جرمه، به صورت مدل مرتبه ۵ نوشت، که در آن دو متغیر حالت مربوط به شار پیوندی استاتور، دو متغیر حالت مربوط به شار پیوندی رتور و یک متغیر حالت، در صورتی که مدل تک-جرمه در نظر گرفته شود، مربوط سرعت رتور است. روابط (۱۳-۳) تا (۱۶-۳) مدل کاملی از یک ژنراتور القایی تک جرمه را نشان می‌دهد.

$$v_{ds} = R_s i_{ds} + \psi_{qs} + \frac{1}{\omega_s} \frac{d\psi_{ds}}{dt} \quad (13-3)$$

$$v_{qs} = R_s i_{qs} - \psi_{ds} + \frac{1}{\omega_s} \frac{d\psi_{qs}}{dt} \quad (14-3)$$

$$v_{dr} = R_r i_{dr} - s \psi_{qr} + \frac{1}{\omega_s} \frac{d\psi_{dr}}{dt} \quad (15-3)$$

¹ Torsional oscillation

$$v_{qr} = R_r i_{qr} + s \psi_{dr} + \frac{1}{\omega_s} \frac{d\psi_{qr}}{dt} \quad (16-3)$$

رابطه سرعت در مدل تک جرمه همان رابطه (3-12) است. شارهای پیوندی به کار رفته در روابط بالا از طریق روابط زیر به دست می‌آیند:

$$\begin{cases} \psi_{qs} = X_s i_{qs} + X_m i_{qr} \\ \psi_{ds} = X_s i_{ds} + X_m i_{dr} \end{cases} \quad (17-3)$$

$$\begin{cases} \psi_{qr} = X_m i_{qs} + X_r i_{qr} \\ \psi_{dr} = X_m i_{ds} + X_r i_{dr} \end{cases} \quad (18-3)$$

گشتاور الکترومغناطیسی نیز از رابطه‌ی (3-19) به دست می‌آید.

$$T_e = \psi_{ds} i_{qs} - \psi_{qs} i_{ds} \quad (19-3)$$

معادلات فوق معادلات پایه برای یک ماشین القایی‌اند که به طرق مختلف می‌توان آن را مدل کرد. برای مدل‌سازی روابط فوق روش‌های مختلفی پیشنهاد شده است. یک روش استفاده از معادله حالت برای شبیه‌سازی است که در سال 2008 در مرجع [57] مطرح شده است. رابطه فضای حالت برابر است با:

$$\dot{X} = AX + BU \quad (20-3)$$

رابطه ولتاژ را بر حسب جریان به صورت ماتریس زیر می‌توان نوشت:

$$\begin{bmatrix} v_{qs} \\ v_{ds} \\ v_{os} \\ v_{qr} \\ v_{dr} \\ v_{or} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_s + \frac{p}{\omega_b} X_s & \frac{\omega}{\omega_b} X_s & 0 & \frac{p}{\omega_b} X_m & \frac{\omega}{\omega_b} X_m & 0 \\ -\frac{\omega}{\omega_b} X_s & R_s + \frac{p}{\omega_b} X_s & 0 & -\frac{\omega}{\omega_b} X_m & \frac{p}{\omega_b} X_m & 0 \\ 0 & 0 & R_s + \frac{p}{\omega_b} X_{ls} & 0 & 0 & 0 \\ \frac{p}{\omega_b} X_m & \frac{\omega - \omega_r}{\omega_b} X_m & 0 & R_r + \frac{p}{\omega_b} X_r & \frac{\omega - \omega_r}{\omega_b} X_r & 0 \\ -\frac{\omega - \omega_r}{\omega_b} X_m & \frac{p}{\omega_b} X_m & 0 & -\frac{\omega - \omega_r}{\omega_b} X_r & R_r + \frac{p}{\omega_b} X_r & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & R_r + \frac{p}{\omega_b} X_{lr} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{qs} \\ i_{ds} \\ i_{os} \\ i_{qr} \\ i_{dr} \\ i_{or} \end{bmatrix} \quad (21-3)$$

رابطه بالا با فرض‌هایی که در رابطه (۳-۲۲) نشان داده شده به رابطه (۳-۲۰) تبدیل شده و به راحتی می‌توان به شکل فضای حالت آن را شبیه سازی کرد [57].

$$A_{6 \times 6} = -B_{6 \times 6} \begin{bmatrix} R_s & \frac{\omega}{\omega_b} X_s & 0 & 0 & \frac{\omega}{\omega_b} X_m & 0 \\ -\frac{\omega}{\omega_b} X_s & R_s & 0 & -\frac{\omega}{\omega_b} X_m & 0 & 0 \\ 0 & 0 & R_s & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \frac{\omega - \omega_r}{\omega_b} X_m & 0 & R_r & \frac{\omega - \omega_r}{\omega_b} X_r & 0 \\ -\frac{\omega - \omega_r}{\omega_b} X_m & 0 & 0 & -\frac{\omega - \omega_r}{\omega_b} X_r & R_r & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & R_r \end{bmatrix} \quad X = i_{6 \times 1} = \begin{bmatrix} i_{qs} \\ i_{ds} \\ i_{os} \\ i_{qr} \\ i_{dr} \\ i_{or} \end{bmatrix} \quad (22-3)$$

$$B_{6 \times 6} = \begin{bmatrix} X_s & 0 & 0 & X_m & 0 & 0 \\ 0 & X_s & 0 & 0 & X_m & 0 \\ 0 & 0 & X_{ls} & 0 & 0 & 0 \\ X_m & 0 & 0 & X_r & 0 & 0 \\ 0 & X_m & 0 & 0 & X_r & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & X_{lr} \end{bmatrix}^{-1} \quad U = v_{6 \times 1} = \begin{bmatrix} v_{qs} \\ v_{ds} \\ v_{os} \\ v_{qr} \\ v_{dr} \\ v_{or} \end{bmatrix}$$

با حل معادله حالت، جریان‌های ماشین بدست می‌آیند که با استفاده از این جریان‌ها و روابط زیر گشتاور الکتریکی ماشین نیز قابل محاسبه است.

$$T_e = \lambda_{qm} i_{dr} - \lambda_{dm} i_{qr} \quad (23-3)$$

$$\lambda_{qm} = L_m (i_{qs} + i_{qr}) \quad (24-3)$$

$$\lambda_{dm} = L_m (i_{ds} + i_{dr}) \quad (25-3)$$

بعد از محاسبه گشتاور و با استفاده از رابطه (۳-۲۶) سرعت رتور قابل محاسبه است.

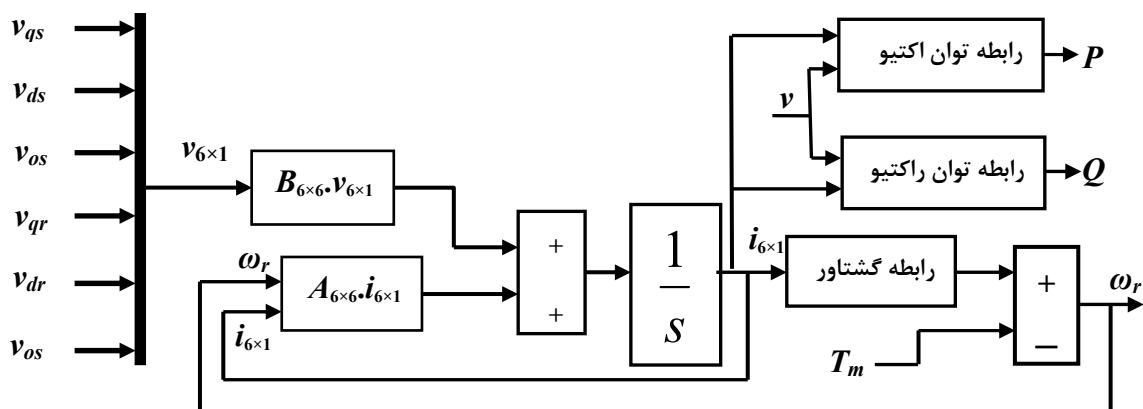
$$T_e = 2H \dot{\omega}_r + T_m \quad (26-3)$$

با فیدبک گرفتن از سرعت و جریان رتور می‌توان چرخه متغیرهای لازم برای شبیه‌سازی را تکمیل کرد. توان‌های اکتیو و راکتیو نیز از روابط زیر بدست می‌آیند.

$$P = P_s + P_r = v_{ds} i_{ds} + v_{qs} i_{qs} + v_{dr} i_{qr} + v_{qr} i_{dr} \quad (27-3)$$

$$Q = v_{ds} i_{qs} + v_{qs} i_{ds} \quad (28-3)$$

با استفاده از روابط بیان شده در این قسمت، ژنراتور القایی را می‌توان به صورت بلوک نشان داده شده در شکل ۳-۳ شبیه‌سازی کرد.



شکل ۳-۳: بلوک شبیه‌سازی ژنراتور به روش فضای حالت.

روش شبیه‌سازی فوق بسیار ساده است ولی برای بررسی اثر پارامترها مناسب نیست و همچنین به زمان شبیه‌سازی بیشتری، نسبت به مدلی که در ادامه معرفی می‌شود، نیاز دارد. روش دیگری که در تحلیل‌های شبیه‌سازی انجام شده در این پایان نامه بکار رفته، استفاده از روابط ولتاژ است. در این روش با تبدیل روابط ولتاژ به روابط زیر شارهای محورهای d و q ماشین محاسبه شده است. در این روش روابط بر حسب پریونیتی نوشته شده‌اند [۵۸].

$$\psi_{ds} = \omega_s \int (v_{ds} - R_s i_{ds} - \psi_{qs}) dt \quad (۲۹-۳)$$

$$\psi_{qs} = \omega_s \int (v_{qs} - R_s i_{qs} + \psi_{ds}) dt \quad (۳۰-۳)$$

$$\psi_{dr} = \omega_s \int (v_{dr} - R_r i_{dr} + s \psi_{qr}) dt \quad (۳۱-۳)$$

$$\psi_{qr} = \omega_s \int (v_{qr} - R_r i_{qr} - s \psi_{dr}) dt \quad (۳۲-۳)$$

با استفاده از روابط شار بدست آمده و با توجه به روابط (۱۷-۳) و (۱۸-۳) جریان ماشین نیز بدست می‌آید و بنابراین با استفاده از رابطه (۱۲-۳) و (۲۳-۳) گشتاور الکتریکی و سرعت رتور را محاسبه شده و چرخه شبیه‌سازی کامل می‌شود.

۳-۵- بررسی مرتبه های مختلف یک مدل ژنراتور القایی

در این قسمت اثر مرتبه مدل بر رفتار ژنراتور القایی تغذیه دوگانه به اختصار بررسی می‌شود. مدل دوجرمه بر بیشینه جریان خطا اثری ندارد ولی نوسانات فرکانس پایینی در حدود یک هرتز را ایجاد می‌کند. ثابت زمانی خاصیت آیرودینامیکی پره‌ها زیاد است ولی با این حال چنانچه دوره خطا طولانی شود این خاصیت می‌تواند سبب پایدار ماندن ژنراتور بعد از رفع خطا شود. در مدل‌سازی ژنراتور نیز در مقالاتی ساده‌سازی‌هایی صورت گرفته است که با بررسی انجام شده دیده شد، مرتبه مدل ژنراتور تأثیر زیادی بر نتایج دوره خطا دارد و ساده‌سازی از این نظر می‌تواند تحلیل‌های غلطی را در پی داشته باشد. در مدل مرتبه ۵ نوسانات فرکانس بالا دیده می‌شود که ناشی از حالت گذرای شار استاتور است و این نوسانات با صرف‌نظر از حالت گذرای شار استاتور در مدل مرتبه ۳ ظاهر نمی‌شود. در مدل‌های مرتبه ۵ و ۳ نوساناتی با فرکانسی در حدود ۴-۵ هرتز دیده می‌شود که این نوسانات در مدل مرتبه یک دیده نمی‌شود. در هر سه مرتبه مدل، هم‌گشتاور الکترومغناطیسی و هم‌جریان استاتور با میرایی مشابه مدل مرتبه ۱ که ناشی از حالت گذرای سرعت رتور است میرا می‌شوند.

مدل‌های معرفی شده مدل مرتبه کامل یعنی مدل مرتبه پنجم یک ماشین القایی است. در مواردی برای مقاصدی چون کاهش پیچیدگی محاسبات، تقابل آسان مدل ژنراتور با مدل شبکه و افزایش گام‌های انتگرال‌گیری، مدل‌هایی با مراتب کاهش یافته برای این نوع ژنراتورها مطرح شده‌اند. از رایج‌ترین مدل‌های کاهش یافته می‌توان به مدل مرتبه ۱ و ۳ اشاره کرد. البته در مواردی نیز مدل مرتبه ۳ با روش‌های کاهش مرتبه غیرخطی به مدل مرتبه ۲ نیز تبدیل شده است. مدل مرتبه ۳ با صرف‌نظر کردن از حالت گذرای شار استاتور بدست می‌آید. یعنی فرض می‌شود که شار استاتور می‌تواند تغییرات آنی داشته باشد و مدل مرتبه ۱ با صرف‌نظر کردن از حالت گذرای شار استاتور و حالت گذرای شار رتور بدست می‌آید. در این مورد فرض شده که شار استاتور می‌تواند تغییرات آنی داشته باشد و همچنین مدار کنترلی رتور خیلی سریع عمل کرده و شار مدار رتور نیز می‌تواند تغییرات آنی داشته باشد، در این حالت فقط مدل مرتبه یک و متغیر مربوط به سرعت رتور را خواهیم داشت. جدول ۳-۱ مطالب ارائه شده در این پاراگراف را به صورت خلاصه نشان می‌دهد [58، 59 و 60].

جدول ۳-۱: مدل ژنراتورهای القایی با مراتب مختلف.

مرتبۀ پنجم	مرتبۀ سوم	مرتبۀ اوّل
$d\psi_{sq(d)}/dt \neq 0$	$d\psi_{sq(d)}/dt = 0$	$d\psi_{sq(d)}/dt = 0$
$d\psi_{rq(d)}/dt \neq 0$	$d\psi_{rq(d)}/dt \neq 0$	$d\psi_{rq(d)}/dt = 0$
$d\omega_m/dt \neq 0$	$d\omega_m/dt \neq 0$	$d\omega_m/dt \neq 0$

۳-۶- مدل سازی مبدل فرکانسی

همان طور که در بخش ۲-۵-۱-۳- اشاره شد ماشین القایی تغذیه دوگانه می تواند هم به عنوان یک ژنراتور و هم به عنوان یک موتور در سرعت های زیرسنکرون و فوق سنکرون عمل کند. در صورت استفاده از ژنراتورهای القایی با توان بادی، ماشین القایی تنها در حالتی تولیدی در سرعت های زیرسنکرون و فوق-سنکرون جایی که محدوده سرعت به وسیله حداکثر ولتاژ مبدل فرکانسی سمت رتور محدود شده است، کار می کند. ماشین DFIG از طریق رتور به وسیله یک مبدل فرکانسی متشکل از پل های مبدلی پشت به پشت با یک اتصال داخلی dc تغذیه می شود.

مبدل سمت شبکه در فرکانس شبکه عمل می کند و سطح ولتاژ بر روی مدار اتصال dc کنترل می کند. همچنین می تواند توان راکتیو را برای تأمین سیستم در صورت نیاز انتقال دهد. مبدل فرکانسی سمت رتور در فرکانس های مختلف کار می کند که وابسته به سرعت رتور است و شار DFIG و در نتیجه توان اکتیو و راکتیو را کنترل می کند. مبدل های فرکانسی که قابلیت در مدار ماندن را دارند معمولاً دارای یک محافظ جریان اضافی^۱، به نام کروبار، که از مبدل سمت رتور و همچنین مدار رتور DFIG در برابر جریان های هجومی در هنگام اغتشاشات شبکه حفاظت می کند، می باشد.

^۱ Over-Current

مبدل فرکانسی سمت شبکه معمولاً با یک مدل ساده شده بیان می‌شود. این مدل که به نام طرح کنترلی کلی^۱ خوانده می‌شود بر اساس یک مجموعه از کنترلرهای PI استفاده شده برای بدست آوردن مقادیر دو محور ولتاژ که خود وابسته به مقادیر توان‌های اکتیو و راکتیو مورد نیاز شبکه است عمل می‌کند. این مدل‌ها از دینامیک‌های کلیدزنی مبدل چشم‌پوشی می‌کنند و یک کنترل ایده‌آل فرض می‌شوند؛ بدین معنا که مبدل قادر است مقدار تقاضا شده را در هر زمانی تعقیب کند.

۳-۷- مدل مدار کنترل رتور

با توجه به شکل ۲-۹ ژنراتور القایی تغذیه دوگانه از سمت رتور به یک مبدل الکترونیک قدرت پشت به پشتی متصل است. مبدل قدرت شامل مبدل سمت شبکه (GSC)^۲، مبدل سمت رتور (RSC)^۳ و لینک dc میانی است.

با اعمال کنترل مناسب مبدل ژنراتورهای القایی تغذیه دوگانه در شرایط نرمال شبکه می‌توانند در رنجی از میلی ثانیه مبادله توان اکتیو و راکتیو داشته باشند. این مبدل‌ها به منظور عملکرد در سرعت‌های زیر سنکرون و فوق سنکرون باید چهار جهته باشند.

هدف مبدل سمت شبکه ثابت نگه داشتن ولتاژ لینک dc میانی است و این بدان معناست که مبدل سمت شبکه توان مورد نیاز مبدل سمت رتور در حالت زیر سنکرون را تغذیه می‌کند و توان ارسالی از مبدل سمت رتور در حالت فوق سنکرون را نیز به شبکه انتقال می‌دهد.

مبدل سمت رتور می‌تواند طوری کنترل شود تا کنترل مستقل توان اکتیو و راکتیو حاصل شود برای رسیدن به این هدف روش‌های کنترل مستقیم گشتاور و کنترل برداری را می‌توان بکار رود. در این پایان-نامه از کنترل برداری معمول استفاده شده است. کنترل برداری در جهت شار استاتور اعمال شده است بنابراین در معادلات ماشین رابطه (۳-۳۳) برقرار است.

¹ Generic Control Scheme

² Grid Side Converter

³ Rotor Side Converter

$$\begin{cases} \psi_{qs} = 0 \\ \psi_{ds} = \psi_s \end{cases} \quad (33-3)$$

با توجه به رابطه فوق و روابط ولتاژ و با صرف نظر از مقاومت استاتور رابطه (۳۴-۳) بدست می آید:

$$\begin{cases} v_{ds} = 0 \\ v_{qs} = -\psi_{ds} \end{cases} \quad (34-3)$$

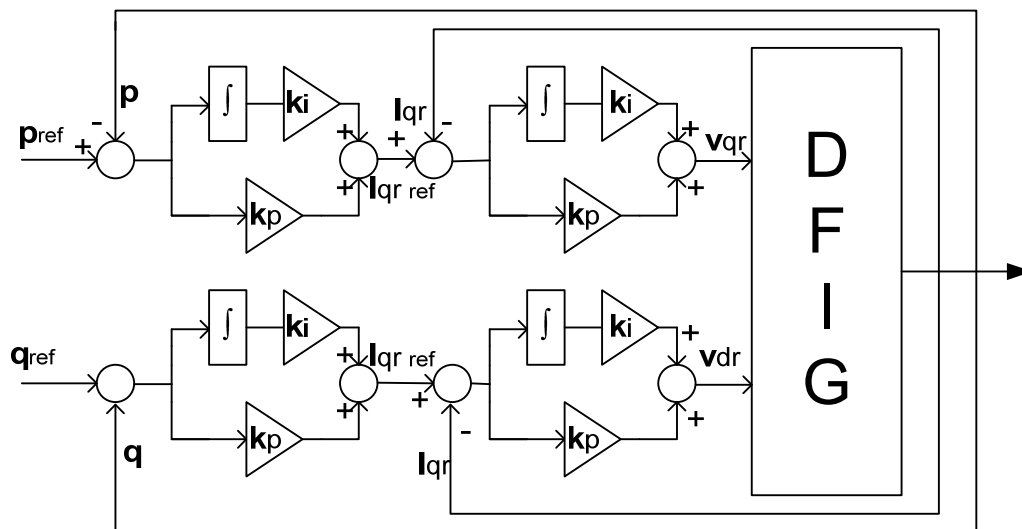
با اعمال دو رابطه فوق در روابط ولتاژ و شار، روابط توان اکتیو و راکتیو به صورت زیر بدست می آیند:

$$P_s = v_{ds} i_{ds} + v_{qs} i_{qs} \Rightarrow P_s = -\psi_{ds} i_{qs} = \psi_{ds} \frac{L_m}{L_s} i_{qr} \quad (35-3)$$

$$Q_s = v_{ds} i_{qs} - v_{qs} i_{ds} \Rightarrow Q_s = \psi_{ds} i_{ds} = \psi_{ds} \left(\frac{\psi_{ds} - L_m i_{dr}}{L_s} \right) \quad (36-3)$$

با توجه به روابط بدست آمده توان اکتیو فقط به مؤلفه جریان i_{qr} و توان راکتیو به i_{dr} وابسته اند؛

بنابراین می توان مدار کنترلی را به صورت شکل ۳-۵ پیاده سازی کرد.



شکل ۳-۵: کنترل اعمال شده در سمت رتور ژنراتور.

البته می‌توان برای عملکرد بهتر مدار مستقل کننده^۱ نیز در شبیه‌سازی قرار داد تا مؤلفه‌های وابسته محور دیگر را از مؤلفه ولتاژ محور مربوطه حذف کند.

در اغلب موارد به منظور ردیابی توان ماکزیمم از باد (MPPT^۲)، توان اکتیو مرجع را با توجه به سرعت باد و رابطه آن با توان و یا جدول داده‌ها تعیین کرد [57 و 58]. همچنین در شبکه‌هایی که به مشارکت ژنراتورهای القایی تغذیه دوگانه در کنترل ولتاژ ژنراتور نیاز باشد، توان راکتیو مرجع را می‌توان از کنترلی که ولتاژ مرجع را با ولتاژ شبکه مقایسه می‌کند تعیین کرد. البته به دلیل محدود بودن توان نامی ژنراتورها در مواقعی که هم توان راکتیو درخواستی و هم توان تولیدی زیاد باشد ارجحیت تعیین شده توسط کاربر در کنترلر تعیین کننده است [۶۱].

^۱ Decoupling

^۲ Maximum Power Tracking

فصل چهارم

**بررسی و شبیه‌سازی کنترل ژنراتور
القایی تغذیه دوگانه با استفاده از
روش جریان پیشگویانه**

۴-۱- مقدمه

در اواسط سال ۱۹۵۰، روش نوینی برای کنترل موتورهای القایی تغذیه شده با اینورترهای منبع ولتاژی با کلیدزنی به روش مدولاسیون پهنای پالس ارائه گردید که به نام کنترل مستقیم شار و گشتاور شناخته شد. در این فصل ابتدا معادله ای برای گشتاور ماشین القایی بدست می‌آوریم. سپس به تشریح روش DTC می‌پردازیم. در ادامه روش کنترلی دیگری که از پرکاربردترین روش‌ها در کنترل ماشین‌های القایی (مبتنی بر جهت یابی شار میدان FOC^۱) تشریح می‌گردد. در انتها با استفاده از روش کنترلی جریان پیشگویانه اثر خطای اتصال کوتاه سه فاز متقارن را جهت تحقیق قابلیت در مدار باقی ماندن مزرعه بادی در شبکه مورد بررسی قرار می‌دهیم.

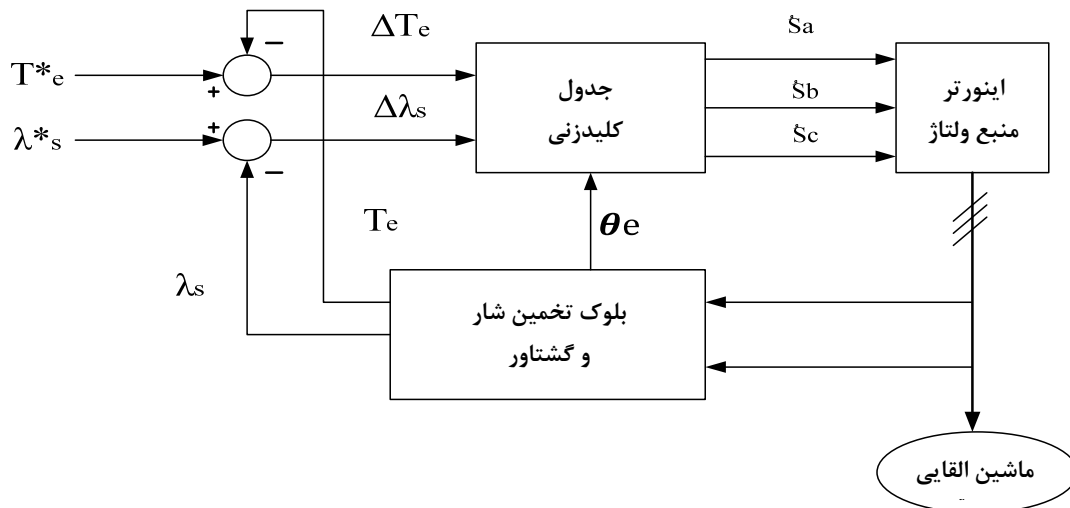
۴-۲- روش کنترل مستقیم گشتاور DTC

در این بخش، ابتدا اصول روش DTC به اختصار بیان می‌شود. سپس معادلات حاکم بر کنترل مستقیم گشتاور DTC تحقیق می‌گردد و در انتها نحوه بدست آوردن شار و گشتاور مورد بررسی قرار می‌گیرد.

۴-۲-۱- اصول روش DTC

بلوک دیاگرام روش DTC در شکل (۲-۳) آورده شده است.

^۱ Field Oriented Control



شکل ۱-۴: شمای کلی کنترل ماشین القایی به روش DTC

همانطور که در شکل می‌توان دید، مبنای این روش مقایسه مقادیر تخمینی شار و گشتاور ماشین با مقادیر مرجع می‌باشد. مقادیر شار و گشتاور موتور بر اساس جریان‌ها و ولتاژهای ترمینال ماشین تعیین می‌گردند. مقادیر بدست آمده با مقادیر مرجع مقایسه می‌گردند. وضعیت مبدل منبع ولتاژ بر اساس سیگنال‌های خطای بدست آمده طوری تعیین می‌گردد که این خطا به صفر برسد.

۴-۲-۲ - معادله گشتاور بر مبنای شار استاتور و رتور

معادله گشتاور موتور القایی را می‌توان به شکل زیر ارائه نمود:

$$T_{em} = \frac{3}{2} \left(\frac{p}{2} \right) \lambda_s \times I \quad (1-4)$$

در فرم مختلط ψ_s و ψ_r را می‌توان به عنوان تابعی از جریان بیان نمود:

$$\lambda_s = L_s I_s + L_m I_r \quad (2-4)$$

$$\lambda_r = L_r I_r + L_m I_s \quad (3-4)$$

با بدست آوردن I_r از رابطه (۲-۴) و جایگذاری آن در رابطه (۳-۴) خواهیم داشت:

$$\lambda_s = \frac{L_m}{L_r} \lambda_r + L'_s I_s \quad (4-4)$$

که $L'_s = \frac{L_s L_r - L_m^2}{L_r}$. از رابطه بالا، I_s را می‌توان به شکل زیر بیان نمود:

$$I_s = \frac{1}{L'_s} \lambda_s - \frac{L_m}{L_r L'_s} \lambda_r \quad (5-4)$$

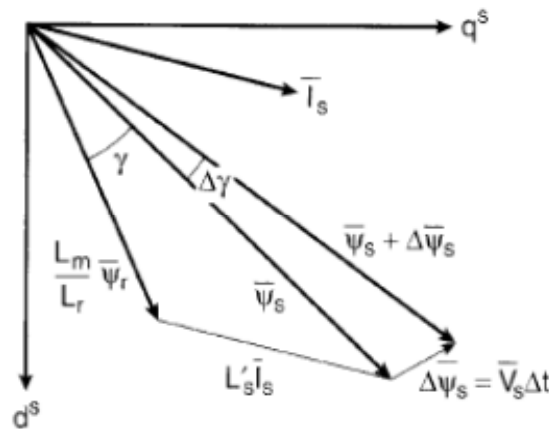
با جایگذاری این رابطه در رابطه (۱-۴) خواهیم داشت:

$$T_{em} = \frac{3}{2} \left(\frac{P}{2} \right) \frac{L_m}{L_r L'_s} \lambda_r \times \lambda_s \quad (6-4)$$

که مقدار دامنه گشتاور برابر با رابطه زیر خواهد بود:

$$T_{em} = \frac{3}{2} \left(\frac{P}{2} \right) \frac{L_m}{L_r L'_s} |\lambda_r| |\lambda_s| \sin \gamma \quad (7-4)$$

که γ زاویه بین دو بردار شار می‌باشد. دیاگرام فازوری معادله (۶-۴) در شکل ۲-۴ نشان داده شده است.



شکل ۲-۴: نمایش بردارهای شار استاتور و رتور و جریان های استاتور (با صرف نظر از مقاومت استاتور).

از طرف دیگر، بردار ولتاژ استاتور به شکل زیر می‌باشد:

$$v_s = R_s i_s + \frac{d}{dt} \lambda_s \quad (8-4)$$

که R_s مقاومت استاتور می‌باشد. اگر از افت ولتاژ اهمی استاتور صرف نظر کنیم خواهیم داشت:

$$\frac{d}{dt} \lambda_s = v_s \quad (9-4)$$

که بیانگر آن است که ولتاژ استاتور مستقیماً تعیین کننده شار استاتور می‌باشد و از این رو، شار مورد نیاز استاتور با انتخاب مناسب بردار ولتاژ اینورتر بدست می‌آید. با توجه به اینکه تغییرات بردار شار رتور کند است، اعمال یک بردار ولتاژ به استاتور موجب تغییر سریع بردار شار استاتور می‌گردد، و این امر منجر

به افزایش گشتاور الکترومغناطیسی می‌گردد. این مسئله ناشی از افزایش γ می‌باشد. به عبارت دیگر، اگر شار استاتور با تغییر ولتاژ استاتور تغییر کند، γ به اندازه γ تغییر می‌کند و داریم:

$$\Delta T_e = \frac{3}{2} \left(\frac{P}{2} \right) \frac{L_m}{L_r L'_s} |\lambda_r| |\lambda_s + \Delta \lambda_s| \sin \Delta \gamma \quad (10-4)$$

۴-۲-۳- نحوه محاسبه شار و گشتاور

به طور کلی برای کنترل ماشین القایی به روش DTC به سه پارامتر در هر لحظه احتیاج داریم: ۱- اندازه شار ۲- موقعیت شار و ۳- گشتاور الکتریکی. پارامترهای قابل اندازه‌گیری ماشین، جریان و ولتاژ های سه فاز استاتور هستند. چون در این روش فقط اندازه شار و موقعیت فضایی آن نسبت به یک مرجع ساکن که می‌تواند فاز a استاتور باشد مهم است، برای سهولت در انجام محاسبات، از تبدیل در مرجع ساکن استفاده می‌کنیم.

$$i_\alpha = 2/3(i_a - 0.5i_b - 0.5i_c) \quad (11-4)$$

$$i_\beta = 1/\sqrt{3}(i_b - i_c) \quad (12-4)$$

$$v_\alpha = 2/3(v_a - 0.5v_b - 0.5v_c) \quad (13-4)$$

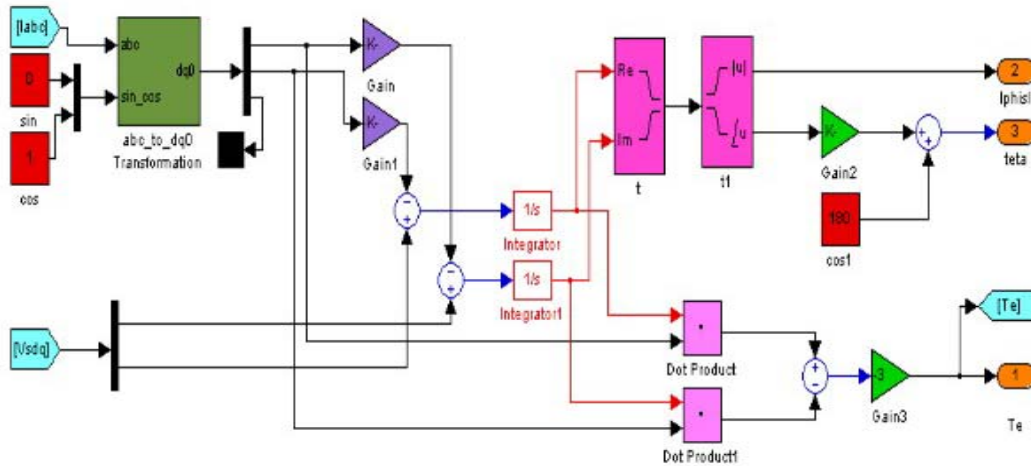
$$v_\beta = 1/\sqrt{3}(v_b - v_c) \quad (14-4)$$

$$\psi_s = \int (v_s - R_s i_s) dt \Rightarrow \psi_\alpha = \int (v_\alpha - R_s i_\alpha) dt, \psi_\beta = \int (v_\beta - R_s i_\beta) dt \quad (15-4)$$

$$\psi_s = \psi_\alpha + j\psi_\beta \quad (16-4)$$

$$T_e = 3/2 p / 2 (\psi_s \times i_s) = 1.5 p (\psi_\alpha i_\beta - \psi_\beta i_\alpha) \quad (17-4)$$

که R_s مقاومت اهمی سیم پیچ یک فاز استاتور، p تعداد جفت قطب‌های موتور و علامت \times به معنای ضرب خارجی دو بردار است. شمای این بلوک در شکل ۳-۴ نشان داده شده است.

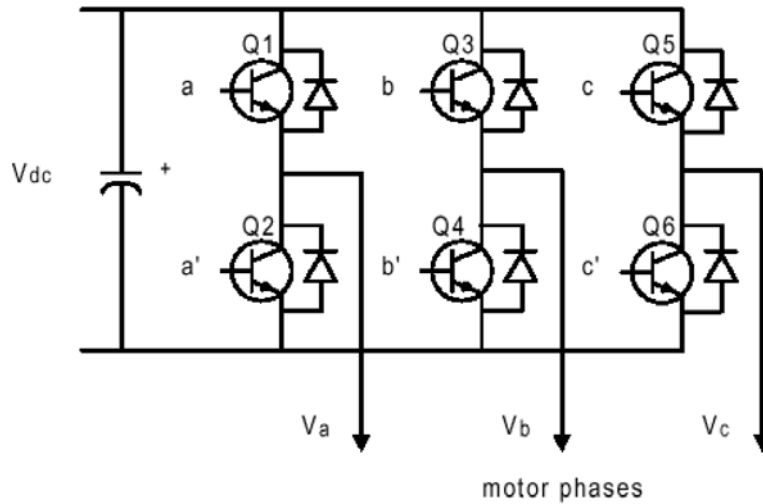


شکل ۴-۳: بلوک دیاگرام تخمین گر شار و گشتاور (Flux and torque estimator).

فرمان افزایش و یا کاهش گشتاور و شار توسط بلوک هیستریزیس به بلوک تصمیم گیر داده می‌شود. ورودی این بلوک، تفاضل پارامتر مرجع و پارامتر محاسبه شده توسط تخمین گر است. هر بلوک هیستریزیس یک باند کاری دارد ($\pm e$). اگر این تفاضل بیشتر از $+e$ باشد فرمان ۱ و اگر کمتر از $-e$ باشد فرمان -1 و اگر تفاضل در محدوده $(-e + e)$ باشد فرمانی داده نمی‌شود و خروجی این بلوک صفر خواهد بود. فرمان ۱ بدین معنی است که پارامتر مرجع از پارامتر محاسبه شده بیشتر است و بلوک تصمیم گیر باید بردار ولتاژی را انتخاب کند که این پارامتر را افزایش داده و به مقدار مرجع آن نزدیک کند. بالعکس فرمان -1 بدین معنی است که پارامتر اندازه گیری شده از پارامتر مرجع بیشتر شده و بلوک تصمیم گیر باید بردار ولتاژی را انتخاب کند که این پارامتر را کاهش داده و به مقدار مرجع نزدیک کند. در روش DTC دو بلوک هیستریزیس وجود دارد که فرمان‌های مربوط به گشتاور و شار را به بلوک تصمیم گیر صادر می‌کنند.

۴-۲-۴ پیاده سازی روش DTC با استفاده از اینورتر منبع ولتاژ سه فاز

بلوک دیاگرام یک اینورتر منبع ولتاژ سه فاز در شکل ۴-۴ نشان داده شده است.



شکل ۴-۴: بلوک دیاگرام یک اینورتر منبع ولتاژ سه فاز.

همان طور که می دانیم، تعداد بردارهای قابل تولید توسط اینورتر منبع ولتاژ سه فاز همانند یک مبدل دو سطحی ۸ بردار می باشد. از این هشت بردار، دو بردار (۰ ۰ ۰) و (۱ ۱ ۱) بردارهای صفر هستند. این بردارها عبارتند از:

$$V_0 = (0 \ 0 \ 0) \quad V_4 = (0 \ 1 \ 1)$$

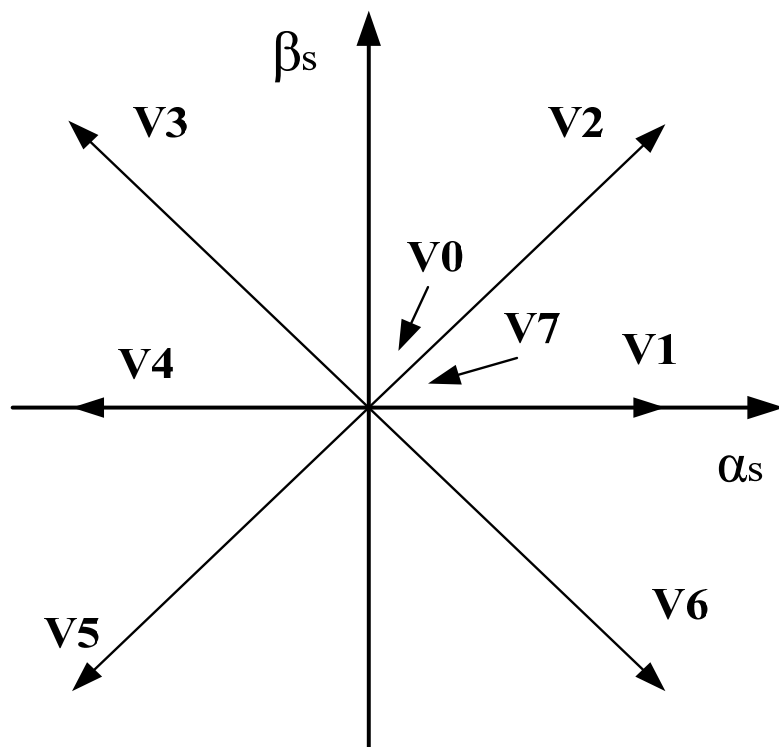
$$V_1 = (1 \ 0 \ 0) \quad V_5 = (0 \ 0 \ 1)$$

(۱۸-۴)

$$V_2 = (1 \ 1 \ 0) \quad V_6 = (1 \ 0 \ 1)$$

$$V_3 = (0 \ 1 \ 0) \quad V_7 = (1 \ 1 \ 1)$$

بردارهای قابل تولید مبدل دو سطحی در شکل ۴-۵ به نمایش در آمده است.



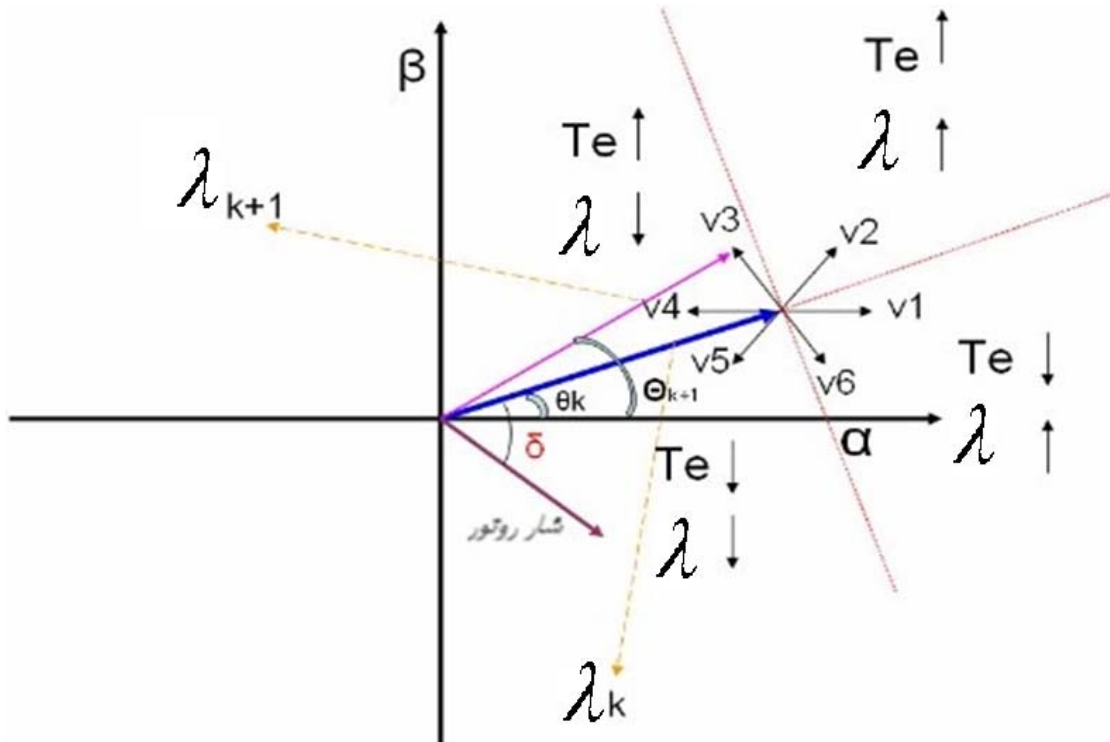
شکل ۴-۵: نمایش بردارهای مبدل دو سطحی.

۴-۲-۵ - منطق انتخاب بردارهای کلیدزنی

با توجه به شکل ۴-۶ و رابطه گشتاور با زاویه بین شار استاتور و رتور ($\sin \delta$) و با توجه به اینکه بردار برآیند شار رتور در موتور همواره از شار استاتور عقب است، هر گاه بتوانیم این زاویه را به ۹۰ درجه نزدیک کنیم گشتاور افزایش می‌یابد و هرگاه این زاویه کمتر شود گشتاور کاهش می‌یابد. بردار جدید شار حاصل جمع بردار شار موجود در استاتور و بردار ولتاژ انتخاب شده توسط بلوک تصمیم‌گیر است. یعنی هر گاه دامنه آن افزایش یابد، شار افزایش و هرگاه دامنه آن کاهش یابد شار هم کاهش می‌یابد.

در شکل ۴-۶ جهت چرخش شار پاد ساعت گرد است. در هر یک از موقعیت‌های نشان داده شده، هر یک از شش بردار ولتاژ قابل تولید توسط اینورتر، روی گشتاور و شار استاتور موتور تأثیر خاص خود را دارد. چون فقط شش بردار غیر صفر موجود است، باید فضای کاری موتور در یک سیکل ۳۶۰ درجه را به شش قسمت مساوی ۶۰ درجه تقسیم کنیم. هر یک از بردارهای ولتاژ که در شکل ۴-۵ نشان داده شده

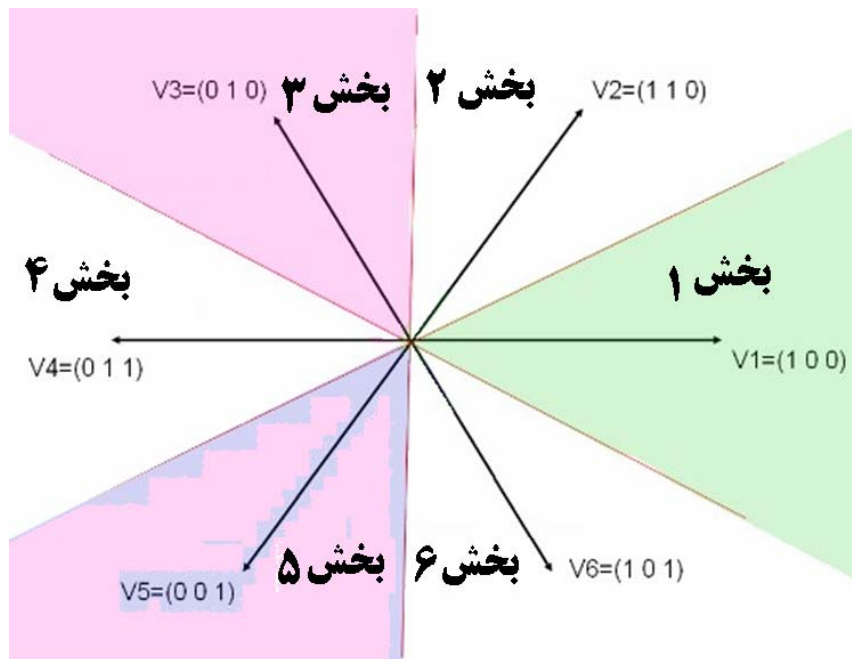
نیمساز نواحی شش‌گانه را تشکیل می‌دهد. نقطه مرجع ($\theta=0$) را محور سیم پیچ فاز a در نظر می‌گیریم (شکل ۷-۴). طبق آنچه پیش‌تر گفته شد، ورودی بلوک تصمیم‌گیر شامل ۱- فرمان کاهش یا افزایش گشتاور ۲- فرمان کاهش یا افزایش شار و ۳- موقعیت شار برآیند استاتور نسبت به یک مرجع ساکن که در اینجا محور سیم پیچی فاز a در نظر گرفته شده است.



شکل ۶-۴: تأثیر بردارهای شش‌گانه روی شار استاتور و گشتاور موتور.

$$\underline{\lambda}_{k+1} = \underline{\lambda}_k + \underline{v}_3 \quad ***$$

بلوک تصمیم‌گیر، یک زیر برنامه در یک function block است که به زبان MATLAB نوشته شده و خروجی آن سه پالس مطلوبی است که به سه IGBT بالایی در اینورتر داده می‌شود تا بردار ولتاژ مطلوب را تولید کند. نحوه انتخاب بردار مطلوب در جدول ۴-۱ آورده شده است. این جدول، که برنامه نوشته شده در MATLAB را تشکیل می‌دهد، از شکل ۷-۴ بدست آمده است.



شکل ۴-۷: تقسیم بندی فضای کار موتور در یک سیکل.

جدول ۴-۱: چگونگی انتخاب بردارهای ولتاژ مناسب.

	افزایش گشتاور			کاهش گشتاور			گشتاور ثابت
	افزایش شار	کاهش شار	شار ثابت	افزایش شار	کاهش شار	شار ثابت	×
Sector1	۱۱۰	۰۱۰	۱۱۰	۱۰۱	۰۰۱	۱۰۱	...
Sector2	۰۱۰	۰۱۱	۰۱۰	۱۰۰	۱۰۱	۱۰۰	...
Sector3	۰۱۱	۰۰۱	۰۱۱	۱۱۰	۱۰۰	۱۱۰	...
Sector4	۰۰۱	۱۰۱	۰۰۱	۰۱۰	۱۱۰	۰۱۰	...
Sector5	۱۰۱	۱۰۰	۱۰۱	۰۱۱	۰۱۰	۰۱۱	...
Sector6	۱۰۰	۱۱۰	۱۰۰	۰۰۱	۰۱۱	۰۰۱	...

۴-۳- روش جهت یابی شار FOC

مدل ارائه شده موتور القایی توسط مراجع معتبر که در فصل اول مورد بررسی قرار گرفته است اغلب در الگوریتم‌های کنترل جهت یابی میدان یا کنترل برداری استفاده می‌گردد. برای دستیابی به این نوع کنترل، چهارچوب مرجع باید با بردار فضایی شار پیوندی رتور، بردار فضایی شار پیوندی استاتور و یا بردار فضایی مغناطیس‌کنندگی در یک راستا قرار گیرد. اغلب چهارچوب مرجع عمومی چهارچوب مرجعی است که وابسته به شار پیوندی رتور می‌باشد. این کار می‌تواند با انتخاب سرعت لحظه‌ای رتور برابر با ω_e و قفل شدن فاز سیستم مرجع با شار رتوری که کاملاً بر محور d قرار دارد، انجام شود. نتیجه اینکه:

$$\lambda_{qr} = 0 \quad (19-4)$$

این معادله خلاصه جهت یابی میدان در مختصات $d-q$ را بیان می‌کند. با فرض اینکه ماشین از یک منبع جریان تنظیم شونده تغذیه می‌شود، طوری که معادله استاتور می‌تواند حذف شود، معادلات $d-q$ در چهارچوب جهت‌یابی شار رتور به صورت زیر تعریف می‌گردد:

$$0 = R_r i_{dr} + \rho \lambda_{dr} \quad (20-4)$$

$$0 = R_r i_{qr} - (\omega_e - \omega_r) \lambda_{dr} \quad (21-4)$$

$$\lambda_{qr} = L_r i_{qr} + L_m i_{qs} = 0 \quad (22-4)$$

$$T_e = \frac{3}{2} P \frac{L_m}{L_r} \lambda_{dr} i_{qs} \quad (23-4)$$

رابطه (۲۳-۴) خواص گشتاور مطلوب را در جملات مؤلفه‌های جریان استاتور و شار رتور نشان می‌دهد. اگر بتوان شار رتور را ثابت نگه داشت درست همان طور که در ماشین DC است، آن‌گاه می‌توان کنترل گشتاور لحظه‌ای را با کنترل مؤلفه جریان استاتور انجام داد. از این معادلات، می‌توان روابط زیر را به دست آورد:

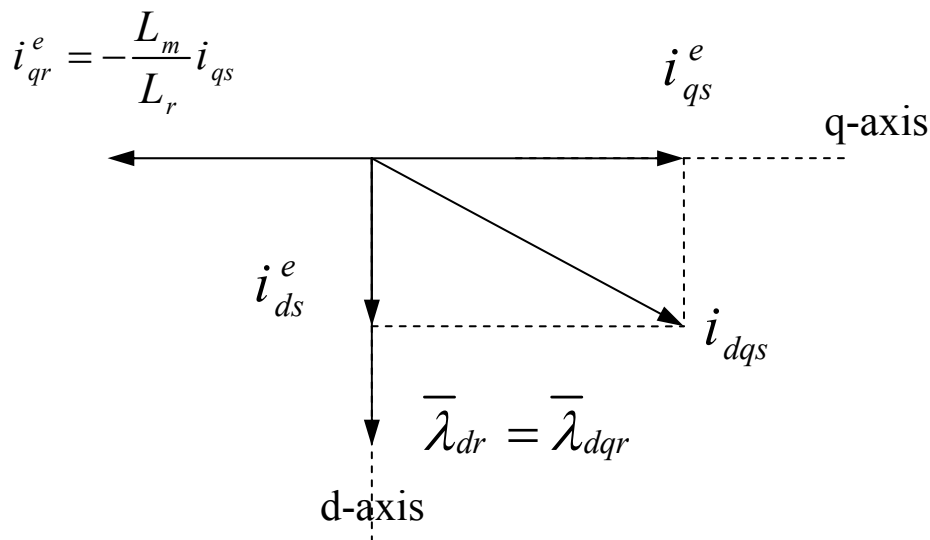
$$i_{qr} = -\frac{L_m}{L_r} i_{qs} \quad (24-4)$$

$$\lambda_{dr} = \frac{L_m}{1+T_r\rho} i_{ds} \quad (25-4)$$

$$\omega_{sl} = \frac{L_m}{T_r \lambda_{dr}} i_{qs} \quad (26-4)$$

که سرعت لغزش با معادله $\omega_{sl} = \omega_e - \omega_r$ و ثابت زمانی رتور با $T_r = \frac{L_r}{R_r}$ مشخص می‌شود. در

حالت پایدار $i_{dr} = 0$ و $\lambda_{dr} = L_m i_{ds}$. دیاگرام فازوری جهت یابی میدان ماشین القایی در شکل ۸-۴ نشان داده شده است.



شکل ۸-۴: دیاگرام فازوری جهت یابی میدان ماشین القایی.

رابطه (۲۵-۴) نشان می‌دهد که شار ماشین می‌تواند با کنترل مؤلفه جریان i_{ds} ثابت به دست آید. به عنوان یک نتیجه، کنترل گشتاور به راحتی می‌تواند توسط کنترل i_{ds} همان‌طور که در رابطه (۲۳-۴) دیده می‌شود بدست آید. رابطه (۲۶-۴) مهم‌ترین بیان برای اجرای عملی کنترل مستقیم میدان در ماشین القایی است که بعداً مورد بحث قرار خواهد گرفت.

۴-۳-۱ - طرح اساسی کنترل جهت یابی میدان

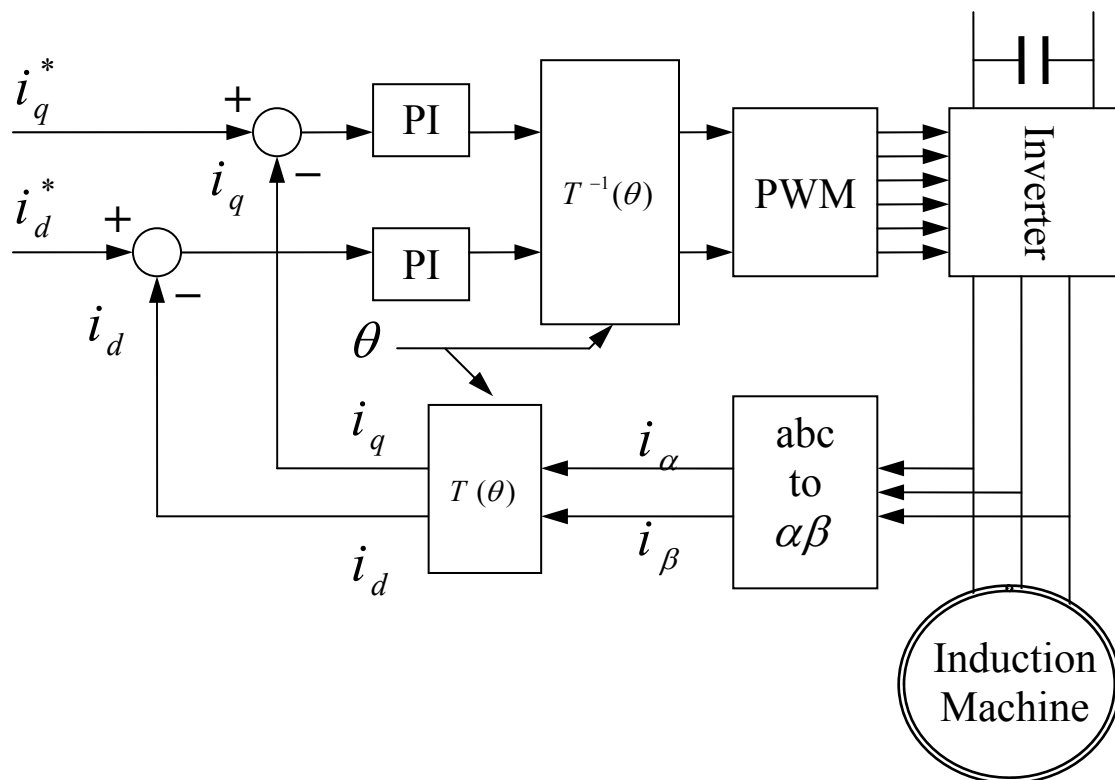
کنترل جهت یابی میدان ماشین‌ها به دو ثابت به عنوان ورودی‌های مرجع نیاز دارد: مؤلفه گشتاور هم راستا با محور q و مؤلفه شار هم راستا با محور d . چون کنترل جهت یابی واقعاً به طرح‌هایی بستگی دارد که ساختمان کنترلی آن می‌تواند کمیت‌های الکتریکی لحظه‌ای را دست‌کاری کند، این موضوع کنترل دقیقی را در خیلی از کارهای عملی مطرح می‌کند. بنابراین کنترل جهت‌یابی میدان برتری‌هایی در روش‌های زیر دارد:

الف - دسترسی آسان به مرجع ثابت (مؤلفه گشتاور و مؤلفه شار جریان استاتور)

ب - کاربرد آسان کنترل مستقیم گشتاور، زیرا در چهارچوب مرجع $d-q$ که گشتاور بیان می‌شود داریم: $T \approx \lambda \cdot i$ با ثابت نگه داشتن دامنه شار رتور یک ارتباط خطی بین گشتاور و مؤلفه گشتاور بردار جریان استاتور خواهیم داشت. آن‌گاه می‌توانیم گشتاور را توسط کنترل این مؤلفه کنترل کنیم. بلوک دیاگرام عمومی سیستم کنترل جهت‌یابی میدان برای یک ماشین القایی در شکل ۴-۹ نشان داده شده است. تغییرات زیادی در کنترل جهت‌یابی میدان ماشین القایی وجود دارد. بسته به چهارچوب مرجع تبدیل به کار رفته، دو نوع کنترل جهت یابی میدان بیشتر به کار می‌رود؛ جهت یابی شار رتور (RFO)^۱ و جهت یابی شار استاتور (SFO)^۲. در کنترل برداری جهت‌یابی شار رتور، چهارچوب مرجع به طور سنکرون با شار رتور می‌چرخد، در حالی که در جهت‌یابی شار استاتور چهارچوب مرجع با شار استاتور می‌چرخد. در هر دوی این چهارچوب‌های مرجع، دینامیک یک ماشین القایی شبیه یک ماشین DC ظاهر می‌شود که اجازه می‌دهد همانند یک ماشین DC کنترل شود. هم‌چنین کنترل جهت‌یابی میدان رتور را می‌توان به صورت کنترل جهت‌یابی مستقیم و یا غیر مستقیم میدان طبقه بندی کرد که بسته به چگونگی فوران مورد نیاز برای اجرای انتقال چهارچوب مرجع فراهم می‌شود.

^۱ Rotor Flux Oriented

^۲ Stator Flux Oriented



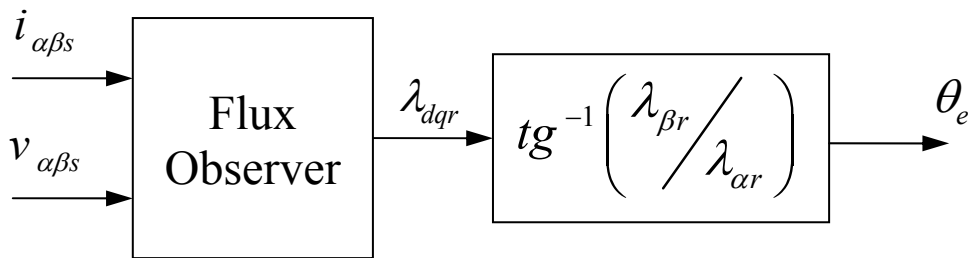
شکل ۴-۹: بلوک دیاگرام عمومی برای سیستم کنترل جهت یابی میدان.

با توجه به این بلوک دیاگرام ابتدا جریان‌های سه‌فازه به مرجع ساکن استاتور انتقال داده شده، سپس به کمک بردارهای یکه به مرجع مختصات گردان منتقل می‌شوند. بعد از این، این جریان‌ها با مقایسه مقادیر جریان‌های مرجع و عبور از کنترل کننده‌های PI، ولتاژهای مرجع اعمالی به اینورتر را تولید می‌کنند. اینورتر نیز با دریافت این ولتاژهای مرجع می‌تواند ولتاژهای مورد نیاز برای تغذیه ماشین را فراهم نماید.

۴-۳-۲ - کنترل مستقیم جهت یابی میدان

آگاهی از موقعیت لحظه به لحظه بردار شار، هم راستا با چهارچوب مرجع گردان برای جهت‌یابی صحیح میدان از شرایط ضروری است. معمولاً شناسایی موقعیت شار بر اساس اندازه‌گیری مستقیم و یا تخمین از روی سایر کمیت‌های قابل اندازه‌گیری می‌تواند باشد. چنین دیدگاهی، جهت‌یابی مستقیم میدان نامیده می‌شود. تنها شار فاصله هوایی می‌تواند مستقیماً اندازه‌گیری شود. یک طرح ساده برای تخمین بردار شار رتور مبتنی بر اندازه‌گیری شار فاصله هوایی و جریان استاتور است. عیب روش اندازه-

گیری مستقیم این است که حسگر شار، گران قیمت بوده و احتیاج به محل نصب و نگهداری ویژه دارد. بنابراین موجب کاهش قابلیت اعتماد در موتور القایی است در عمل شار رتور از جریان و ولتاژ استاتور محاسبه می‌شود. این تکنیک نیازمند آگاهی از مقاومت استاتور همراه با اندوکتانس نشتی و مغناطیس‌کنندگی می‌باشد. به طور معمول برای انجام این کار از رؤیتگر مدل ولتاژ استفاده می‌گردد. طرح جهت یابی مستقیم میدان در شکل ۴-۱۰ نشان داده شده است.



شکل ۴-۱۰: طرح جهت یابی مستقیم میدان.

شار استاتور در راستای محورهای α و β در چهارچوب مرجع ساکن می‌تواند از معادلات زیر تخمین زده شود:

$$P \hat{\lambda}_{\alpha s} = v_{\alpha s} - R_s i_{\alpha s} \quad (۲۷-۴)$$

$$P \hat{\lambda}_{\beta s} = v_{\beta s} - R_s i_{\beta s} \quad (۲۸-۴)$$

شار رتور را نیز می‌توان با معادلات زیر تخمین زد:

$$\hat{\lambda}_{\alpha r} = \frac{L_r}{L_m} (\hat{\lambda}_{\alpha s} - L_\sigma i_{\alpha s}) \quad (۲۹-۴)$$

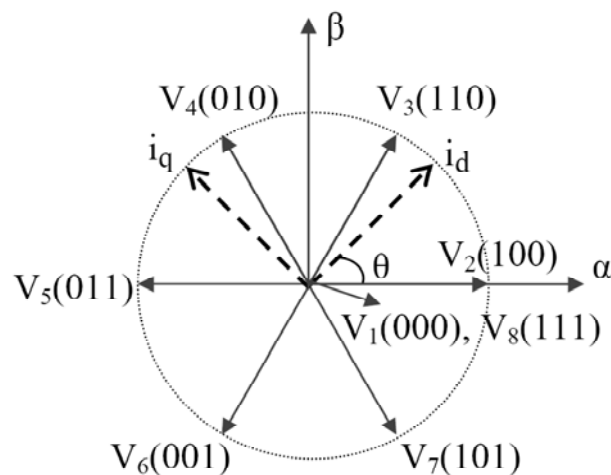
$$\hat{\lambda}_{\beta r} = \frac{L_r}{L_m} (\hat{\lambda}_{\beta s} - L_\sigma i_{\beta s}) \quad (۳۰-۴)$$

که $L_\sigma = L_s - \frac{L_m^2}{L_r}$ اندوکتانس نشتی است. این روش به پارامترهایی همچون مقاومت استاتور و اندوکتانس نشتی بستگی دارد. مطالعه حساسیت پارامترها نشان می‌دهد که اندوکتانس نشتی می‌تواند اثرات مهمی روی عملکرد سیستم همچون پایداری، پاسخ دینامیکی و بهره برداری از ماشین و اینورتر

داشته باشد. در این مورد مشکل اساسی نیاز به پارامترهای موتور سه فاز است. مقاومت استاتور یک مسئله مهم است، چرا که به درجه حرارت بستگی دارد. دو پارامتر القایی یعنی اندوکتانس مغناطیس‌کنندگی و اندوکتانس معادل رتور به طور معمول تحت تأثیر اشباع قرار می‌گیرند. همچنین انتگرال‌گیری از سیگنال‌ها، در فرکانس پایین و قابل ملاحظه شدن افت ولتاژ اهمی رتور در سرعت کم مشکلاتی را ایجاد می‌کند. این محدودیت‌ها مانع استفاده از این طرح در سرعت کم می‌شود. به هر حال، این یک کار عملی است که در بالاتر از یک رنج سرعت قابل قبول و در بسیاری از کاربردها به کار رفته می‌شود.

۴-۳-۳- مدولاسیون بردار فضایی سنتی (SVM)^۱

مدولاسیون بردار فضایی در اینورترهای منبع ولتاژ سه فاز بر مبنای تبدیل کمیت‌های سه فاز به بردارهایی در دو بعد α, β معرفی می‌گردد. ولتاژهای مرجع به صورت بردارهای ولتاژ فضایی به نمایش درآمده و خروجی‌های ولتاژ اینورتر به عنوان بردارهای فضایی بررسی می‌گردند. هشت بردار ولتاژ خروجی امکان پذیر است، شش بردار غیر صفر ($V_2 - V_7$) و دو بردار صفر (V_1, V_8). تصویر بردارها در شکل ۴-۱۱ مشاهده می‌شود.



شکل ۴-۱۱: ولتاژ خروجی تولیدی توسط بردارهای فضایی.

^۱ Space Vector Modulation

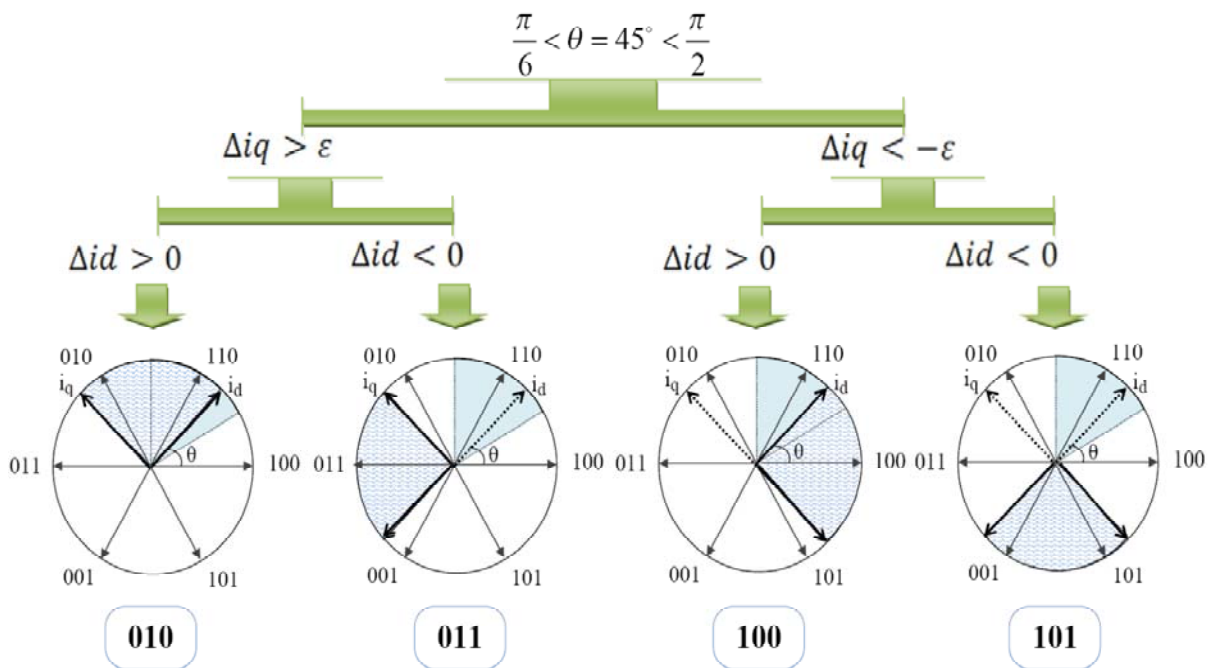
بردارهای ولتاژ مرجع با کلید زنی‌های متوالی از بردارهای صفر و غیر صفر بدست می‌آید. مطابق روش SVM، اینورتر با توجه به زاویه ولتاژ مطلوب بین بردارهای سوئیچ زنی ($V_1 - V_8$) کلید زده می‌شود. یکی از معایب روش SVM فرکانس کلید زنی متغیر اینورتر است که در این پایان نامه به طور ثابت مورد استفاده قرار خواهد گرفت.

خطای جریان محور $d-q$ بین مقدار مرجع و مقدار بدست آمده را به صورت زیر معرفی می‌کنیم:

$$\begin{cases} \Delta i_d = i_d^* - i_d \\ \Delta i_q = i_q^* - i_q \end{cases} \quad (31-4)$$

با بدست آوردن مقادیر فوق می‌توانیم تکنیک SVM را در روش کنترل میدان جهت داده شده پیش‌گویانه بنا نهیم. مطابق شکل ۴-۵ با در دست داشتن زاویه رتور (θ) و Δi_d و Δi_q وضعیت کلید زنی مطلوب (متقابلاً بردار ولتاژ مناسب) انتخاب می‌گردد.

مقادیر منفی Δi_d و Δi_q بیانگر این مطلبند که بردار مناسب باید مقادیر i_d و i_q را در نمونه بعدی افزایش دهد. همچنین مقادیر مثبت Δi_d و Δi_q به این موضوع اشاره می‌کنند که بردار مناسب باید مقادیر منفی i_d و i_q را در نمونه بعدی کاهش دهد. به عنوان مثال در $\theta = 45^\circ$ الگوی کلیدزنی در شکل ۴-۱۲ نشان داده شده است. همان‌گونه که در شکل ۴-۱۲ می‌بینیم، انتخاب‌های ممکن با توجه به مقادیر محتمل Δi_d و Δi_q آنالیز شده‌اند. در مثال داده شده چهار بردار کلیدزنی ممکن وجود دارد: (110 ، 011 ، 100 ، 101). در این شرایط، بردار مطلوب در شرایطی که بیشترین افزایش یا بیشترین کاهش در i_q بدست آید انتخاب می‌شود. وقتی $\Delta i_q > \varepsilon$ و $\Delta i_d > 0$ بردار کلید زنی 010 منجر به افزایش i_q شده و وقتی $\Delta i_q < -\varepsilon$ و $\Delta i_d < 0$ بردار کلید زنی 101 منجر به افزایش i_q می‌شود. به روشی مشابه، الگوی کلیدزنی در شرایطی که $0 < \theta < 2\pi$ است، در جدول ۴-۲ نشان داده شده است.



شکل ۴-۱۲: الگوی کلیدزنی در وضعیتی از مقادیر احتمالی Δi_d و Δi_q زاویه رتور.

جدول ۴-۲: الگوی انتخاب بردار ولتاژ مناسب.

$\Delta i_q < -\epsilon$		$-\epsilon < \Delta i_q < \epsilon$		$\Delta i_q > \epsilon$		بردارهای ولتاژ
$\Delta i_d < 0$	$\Delta i_d > 0$	$\Delta i_d < 0$	$\Delta i_d > 0$	$\Delta i_d < 0$	$\Delta i_d > 0$	
001	101	000	111	010	110	$-\pi/6 < \theta < \pi/6$
101	100	000	111	011	010	$\pi/6 < \theta < \pi/2$
100	110	000	111	001	011	$\pi/2 < \theta < 5\pi/6$
110	010	000	111	101	001	$5\pi/6 < \theta < 7\pi/6$
010	011	000	111	100	101	$7\pi/2 < \theta < 3\pi/2$
011	001	000	111	110	100	$3\pi/2 < \theta < 11\pi/6$

باید به این موضوع اشاره شود که بردارهای کلیدزنی بدست آمده در طول زمان نمونه برداری T اعمال

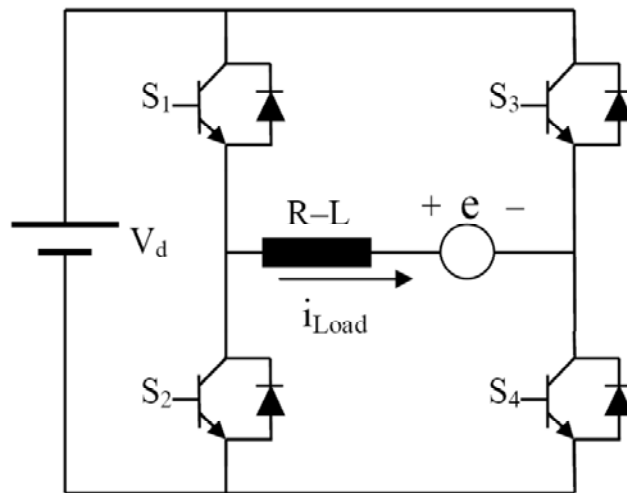
می‌گردد. به همین علت فرکانس کلید زنی ثابت و برابر $\frac{1}{T}$ خواهد بود.

۴-۴ - کنترل جریان پیش‌گویانه

در این بخش به صورت مختصر نحوه عملکرد کنترل جریان پیش‌گویانه به کار رفته در این پایان نامه در اینورتر سه فاز را شرح خواهیم داد. قبل از آن به صورت مروری کنترل جریان را در اینورتر دو فاز بررسی خواهیم کرد.

۴-۴-۱ - کنترل جریان پیش‌گویانه در اینورتر تک‌فاز

شکل ۴-۱۳ توپولوژی اینورتر پل تک‌فاز، در شرایط بار سلفی-مقاومتی همراه با بخشی از رفتار غیرخطی بار که به صورت پتانسیل e مدل شده است را نشان می‌دهد. مطابق شکل ۴-۱۳، جهت جریان بار به صورت قراردادی در یک جهت انتخاب می‌گردد.



شکل ۴-۱۳: اینورتر پل تک‌فاز با بار غیر خطی.

اگر کلیدزنی اینورتر به صورت کنترل دو قطبی لحاظ گردد، آنگاه دو حالت کلیدزنی به صورت زیر در اختیار خواهد بود:

State 1 → $S_1, S_4: on$ $S_2, S_3: off$
 State 2 → $S_2, S_3: on$ $S_1, S_4: off$

بر این اساس می‌توان پارامتر D را به عنوان سیکل کاری زوج کلیدهای S1-S4 تعریف نمود. در مدت زمانی که کلیدهای S4-S1 روشن باشند، مقدار ولتاژی که دو سر بار قرار می‌گیرد برابر است با DV_d ، که:

$$D = \frac{T_{on_{1,4}}}{T} \quad (32-4)$$

زمان T_{on} ، مدت زمان روشن بودن زوج کلید $S_1 - S_4$ در یک پریود T می‌باشد. بنابراین، روابط سیستم به صورت زیر قابل ارائه می‌باشند:

$$D V_d = Ri + L \frac{di}{dt} + e \quad (33-4)$$

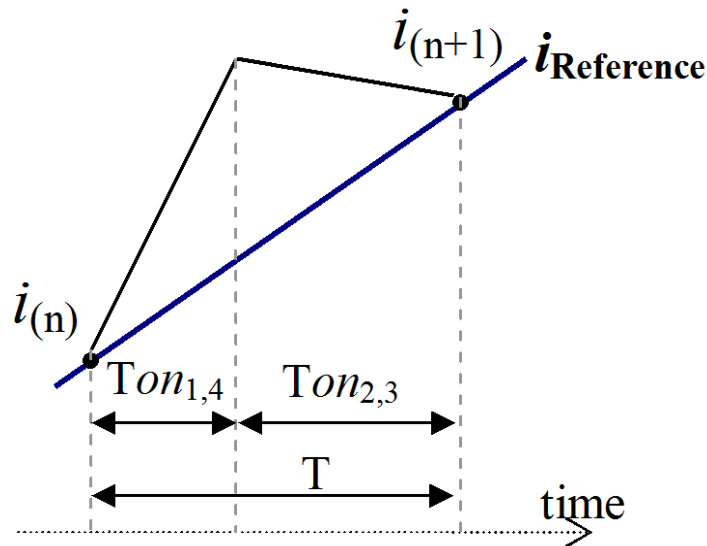
زمانی که زوج کلید $S_2 - S_3$ روشن باشند، با تعریف:

$$D' = \frac{T_{on_{2,3}}}{T} \quad (34-4)$$

که ارتباط بین D و D' بر اساس کلید زنی دو قطبی اینورتر تک‌فاز به صورت زیر می‌باشد:

$$D = 1 - D' \quad (35-4)$$

شکل ۱۴-۴ مفاهیم و روابط فوق را در قالب ردیابی جریان مرجع در یک پریود زمانی T نشان داده است.



شکل ۴-۱۴: نحوه ردیابی جریان مرجع در یک پریود T.

بنابراین:

$$D' V_d = -Ri - L \frac{di}{dt} - e \quad (۳۶-۴)$$

با بیان روابط فوق در تحلیل زمان گسسته، با در اختیار داشتن پارامترهای مرحله n ام و n+1 ام

سیستم وجود دارد:

$$D_{(n)} V_d = Ri_{(n)} + L \frac{(i_{(n+1)} - i_{(n)})}{T} + e_{(n)} \quad (۳۷-۴)$$

که $i_{(n)}$ و $i_{(n+1)}$ جریان‌های حالت جاری و حالت بعدی است. $e_{(n)}$ پتانسیل بخش غیرخطی بار در حالت

جاری و $D_{(n)}$ سیکل کاری زوج کلید $S_1 - S_4$ در حالت جاری می‌باشد.

مطابق شکل ۴-۱۴، با جریان مرجع $i_{Reference}$ و با این فرض که محاسبات در حالت n ام باشد، روشن

بودن زوج کلید $S_1 - S_4$ موجب افزایش و خاموش بودن آن موجب کاهش جریان بار می‌گردد. در نهایت،

مقدار افزایش-کاهش جریان بار، با تعیین مقدار مناسب D ، موجب ردیابی جریان مرجع توسط اینورتر

خواهد شد؛ بنابراین می‌توان بیان نمود که سیکل کاری $D_{(n)}$ در حالت جاری (مدت زمان حالت کلیدزنی

State 1 در یک پریود T)، موجب تغییر جریان از $i_{(n)}$ به $i_{(n+1)}$ می‌شود.

مطابق تئوری کنترل جریان پیش‌گویانه، سیکل کاری کلیدها به نحوی تعیین می‌گردد که جریان از

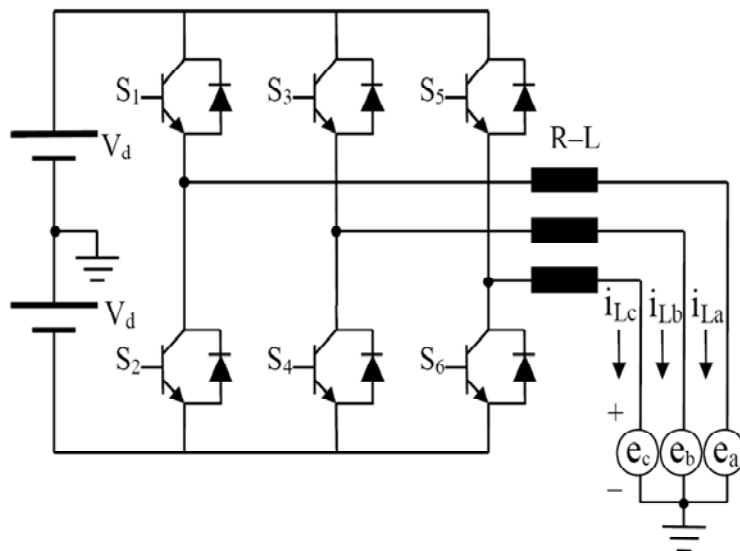
$i_{(n)}$ به $i_{(n+1)}$ برسد. در این شرایط می‌توان $i_{(n+1)}$ را به عنوان جریان مرجع معرفی نموده و مدت زمان

روشن یا خاموش بودن کلیدها را برای رسیدن جریان حالت فعلی به این جریان را به نحوی مطلوب محاسبه نمود.

۴-۴-۲ - کنترل جریان پیش‌گویانه اینورتر سه فاز

طرح مداری یک اینورتر سه فاز به عنوان فیلتر اکتیو یک بار غیر خطی در ۴-۱۵ نشان داده شده است که مقادیر سلف و مقاومت فیلتر به صورت R-L مدل شده‌اند.

همانند مدل تک فاز، در این حالت نیز می‌توان با در نظر گرفتن وضعیت کلیدها به صورت زیر، روابط سیستم اینورتر - بار را مدل نمود:



۴-۱۵: طرح مداری فیلتر اکتیو موازی.

$leg - A$	$State\ a-1 \rightarrow$	$S_1: on$	$S_2: off$
	$State\ a-2 \rightarrow$	$S_1: off$	$S_2: on$
$leg - B$	$State\ b-1 \rightarrow$	$S_3: on$	$S_4: off$
	$State\ b-2 \rightarrow$	$S_3: off$	$S_4: on$
$leg - C$	$State\ c-1 \rightarrow$	$S_5: on$	$S_6: off$
	$State\ c-2 \rightarrow$	$S_5: off$	$S_6: on$

هر یک از پایه‌های اینورتر سه فاز فوق، به صورت مجزا کلیدزنی می‌شوند. بدین منظور با در نظر گرفتن روابطی همانند اینورتر تک فاز و با این فرض که بار، جریان $i_{a,b,c}$ را دریافت می‌کند، معادلات زیر را ارائه می‌شوند:

$$\begin{aligned} D_a V_d &= R i_a + L \frac{d i_a}{dt} + e_a \\ D_b V_d &= R i_b + L \frac{d i_b}{dt} + e_b \\ D_c V_d &= R i_c + L \frac{d i_c}{dt} + e_c \end{aligned} \quad (38-4)$$

که D_a ، D_b و D_c سیکل کاری هر یک از کلیدهای S_1 و S_3 و S_5 در طول پریود T می‌باشد. روابط فوق در شرایط گسسته نیز قابل بیان می‌باشند:

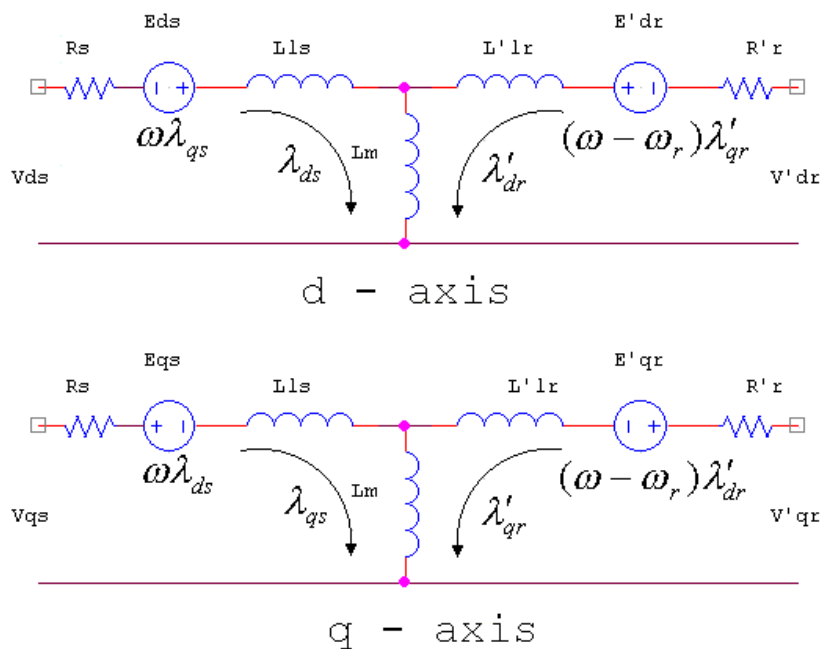
$$\begin{aligned} D_{a(n)} V_d &= R i_{a(n)} + L \frac{(i_{a(n+1)} - i_{a(n)})}{T} + e_{a(n)} \\ D_{b(n)} V_d &= R i_{b(n)} + L \frac{(i_{b(n+1)} - i_{b(n)})}{T} + e_{b(n)} \\ D_{c(n)} V_d &= R i_{c(n)} + L \frac{(i_{c(n+1)} - i_{c(n)})}{T} + e_{c(n)} \end{aligned} \quad (39-4)$$

این مقادیر، مدت زمان روشن یا خاموش بودن هر یک از کلیدها را به منظور رسیدن جریان $i_{(n)}$ به حالت $i_{(n+1)}$ نشان می‌دهد؛ لذا با تعریف سیگنال مرجع i^* به عنوان سیگنال جریان حالت بعدی $i_{(n+1)}$ می‌توان مدت زمان لازم کلیدزنی هر یک از پایه‌ها را برای ردیابی جریان بار مطابق جریان مرجع بدست آورد.

۴-۵ - معادلات حاکم بر کنترل جریان پیشگویانه

در فصل گذشته با اجزای مختلف یک DFIG آشنا شدیم و دیدیم که ژنراتور القایی تغذیه دوگانه از سمت رتور به یک مبدل الکترونیک قدرت پشت به پشت متصل است. در شرایط نرمال شبکه با اعمال کنترل مناسب مبدل ژنراتورهای القایی تغذیه دوگانه می‌توان توان اکتیو و راکتیو را در رنج خاصی کنترل کرد. همین‌طور می‌توان کنترل را به گونه‌ای اعمال کرد که جریان هجومی ناشی از خطای شبکه را تحت کنترل درآورد.

برای پیاده سازی روش کنترلی به کار رفته در این پایان نامه، در این فصل به بیان روش کنترل برداری از طریق SVM می‌پردازیم.



شکل ۴-۱۶: مدار ماشین القایی در مرجع dq

$$v_{qs} = R_s i_{qs} + \frac{d\psi_{qs}}{dt} + \omega \psi_{ds} \quad (۴۰-۴)$$

$$v_{ds} = R_s i_{ds} + \frac{d\psi_{ds}}{dt} - \omega \psi_{qs} \quad (۴۱-۴)$$

$$v_{qr} = R_r i_{qr} + \frac{d\psi_{qr}}{dt} + (\omega - \omega_r) \psi_{dr} \quad (۴۲-۴)$$

$$v_{dr} = R_r i_{dr} + \frac{d\psi_{dr}}{dt} + (\omega - \omega_r) \psi_{qr} \quad (۴۳-۴)$$

$$T_e = \frac{3}{2} \frac{p}{2} (\psi_{ds} i_{qs} - \psi_{qs} i_{ds}) \quad (۴۴-۴)$$

که در آن:

$$\psi_{qs} = L_s i_{qs} + L_m i_{qr} \quad (۴۵-۴)$$

$$\psi_{ds} = L_s i_{ds} + L_m i_{dr} \quad (46-4)$$

$$\psi_{qr} = L_r i_{qr} + L_m i_{qs} \quad (47-4)$$

$$\psi_{qr} = L_r i_{dr} + L_m i_{ds} \quad (48-4)$$

$$L_s = L_{ls} + L_m \quad (49-4)$$

$$L_r = L_{lr} + L_m \quad (50-4)$$

می‌توان تغییرات شار دور را به صورت زیر نوشت:

$$\Delta \psi_{qs} = \psi_{qs}^* - \psi_{qs} \quad (51-4)$$

$$\Delta \psi_{ds} = \psi_{ds}^* - \psi_{ds} \quad (52-4)$$

$$\Delta \psi_{qr} = \psi_{qr}^* - \psi_{qr} \quad (53-4)$$

$$\Delta \psi_{dr} = \psi_{dr}^* - \psi_{dr} \quad (54-4)$$

که در آن تغییرات شار دور هر محور مرجع به عنوان تفاضلی از شار دور فعلی ($\psi_{q(d)s(r)}$) از شار دور مرجع

بدست آمده است. می‌توان این تغییرات را در زمان بدست آورد. با تقسیم طرفین معادلات

(51-4) الی (54-4) بر واحد زمان داریم:

$$\frac{d\psi_{qs}}{dt} = \frac{\psi_{qs}^* - \psi_{qs}}{T} \quad (55-4)$$

$$\frac{d\psi_{ds}}{dt} = \frac{\psi_{ds}^* - \psi_{ds}}{T} \quad (56-4)$$

$$\frac{d\psi_{qr}}{dt} = \frac{\psi_{qr}^* - \psi_{qr}}{T} \quad (57-4)$$

$$\frac{d\psi_{dr}}{dt} = \frac{\psi_{dr}^* - \psi_{dr}}{T} \quad (58-4)$$

حال با جایگزینی معادلات (57-4) و (58-4) در معادلات (42-4) و (43-4) می‌توان شار دور مرجع

محور $d-q$ رتور را بدست آورد:

$$\psi_{qr}^* = (v_{qr} - R_r i_{qr} - (\omega - \omega_r) \psi_{dr}) T + \psi_{qr} \quad (59-4)$$

$$\psi_{dr}^* = (v_{qr} - R_r i_{dr} - (\omega - \omega_r) \psi_{qr}) T + \psi_{dr} \quad (60-4)$$

برای بدست آوردن جریان‌های محور مرجع $d-q$ رتور، ψ_{dr}^* و ψ_{qr}^* را به صورت زیر از معادلات (۴۷-۴) و (۴۸-۴) نیز می‌توان نوشت:

$$\psi_{qr}^* = L_r i_{qr}^* + L_m i_{qs}^* \quad (61-4)$$

$$\psi_{dr}^* = L_r i_{dr}^* + L_m i_{ds}^* \quad (62-4)$$

و در نتیجه داریم:

$$i_{qr}^* = (\psi_{qr}^* - L_m i_{qs}^*) / L_r \quad (63-4)$$

$$i_{dr}^* = (\psi_{dr}^* - L_m i_{ds}^*) / L_r \quad (64-4)$$

با فرض (۳-۳۳) و اینکه در دستگاه مرجع انتخاب شده که محور d آن در راستای میدان استاتور و محور q آن عمود بر میدان است داریم:

$$\psi_{qs} = \frac{d\psi_{qs}}{dt} = 0 \quad (65-4)$$

در نتیجه:

$$\psi_{qs} = L_s i_{qs} + L_m i_{qr} = 0 \Rightarrow i_{qs} = -\frac{L_m}{L_s} i_{qr} \quad (66-4)$$

رابطه (۴-۴۴) را برای گشتاور القایی مرجع و با کمک معادلات (۴-۶۵) و (۴-۶۶) می‌توان به صورت زیر بازنویسی کرد:

$$T_e^* = -\frac{3}{2} \frac{P}{2} \frac{L_m}{L_s} \psi_{ds}^* i_{qr}^* \quad (67-4)$$

با توجه به این رابطه می‌توان فهمید که اگر ψ_{ds}^* مقدار ثابتی داشته باشد با کنترل i_{qr}^* می‌توان گشتاور الکترومغناطیسی را کنترل کرد.

همچنین می‌توان i_{qs}^* را بر حسب گشتاور مرجع (T_e^*) بدست آورد:

$$i_{qs}^* = \frac{V_{qs}^* - \omega \psi_{ds}^*}{R_s} \quad (68-4)$$

$$i_{qs}^* = \frac{V_{ds}^*}{R_s} \quad (69-4)$$

رابطه (68-4) را می‌توان به صورت زیر نیز نوشت:

$$\psi_{ds}^* = \frac{v_{qs}^* - R_s i_{qs}^*}{\omega} \quad (70-4)$$

رابطه (44-4) را برای گشتاور القایی مرجع می‌توان به صورت زیر بازنویسی کرد:

$$T_e^* = 1.5 \frac{L_m}{L_s} p \psi_{ds}^* i_{qs}^* \quad (71-4)$$

با جایگذاری رابطه (70-4) در (71-4) معادله گشتاور القایی مرجع (T_e^*) بر حسب جریان مرجع (i_{qs}^*) به صورت یک جمله درجه دو بدست می‌آید که با حل آن i_{qs}^* بدست خواهد آمد.

اما توان راکتیو استاتور نیز قبلاً به صورت رابطه زیر بدست آمد:

$$Q_s = \frac{3}{2} (v_{qs}^* i_{ds}^* - v_{ds}^* i_{qs}^*) \quad (72-4)$$

و روابط ولتاژ استاتور با در نظر گرفتن رابطه (65-4) و رابطه $\frac{d\psi_{ds}^*}{dt} = 0$ به صورت زیر در خواهد آمد:

$$\left\{ \begin{array}{l} v_{ds}^* = r_s i_{ds}^* \\ v_{qs}^* = r_s i_{qs}^* + \omega \psi_{ds}^* \end{array} \right\} \Rightarrow Q_s = \frac{3}{2} (r_s i_{ds}^* i_{qs}^* + \omega \psi_{ds}^* i_{ds}^* - r_s i_{ds}^* i_{qs}^*) \quad (73-4)$$

$$\Rightarrow Q_s = \frac{3}{2} \omega \psi_{ds}^* i_{ds}^*$$

رابطه‌ای که بین i_{dr}^* و i_{ds}^* وجود دارد به صورت زیر است:

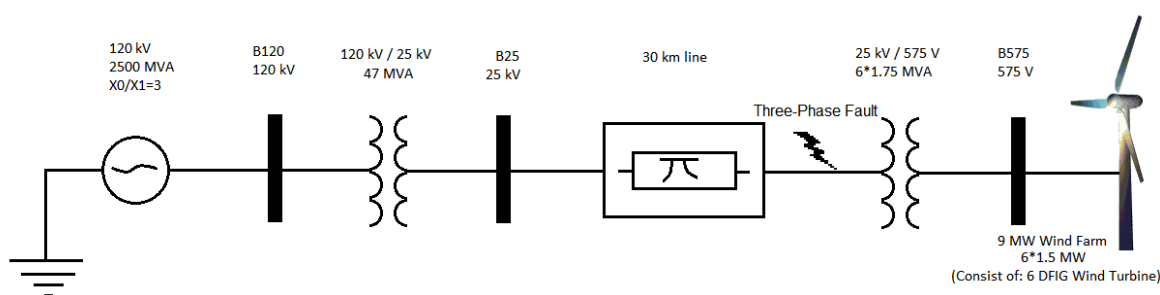
$$\psi_{ds}^* = L_s i_{ds}^* + L_m i_{dr}^* \Rightarrow i_{ds}^* = \frac{\psi_{ds}^* - L_m i_{dr}^*}{L_s} \quad (74-4)$$

که اگر ψ_{ds}^* مقدار تقریباً ثابتی باشد رابطه بین i_{dr}^* و i_{ds}^* رابطه مستقیمی است، بنابراین با کنترل i_{dr}^* می‌توان i_{ds}^* و در نتیجه Q_s را کنترل کرد.

نتیجه کلی که حاصل می‌شود این است که اگر ψ_{ds}^* مقدار ثابتی داشته باشد (در کنترل برداری این امر محقق است). به صورت مستقل از یکدیگر می‌توان توان راکتیو استاتور و گشتاور الکترومغناطیسی را به وسیله تنظیم مؤلفه های مولد آنها از جریان رتور (i_{qr}^* مؤلفه مولد گشتاور الکترومغناطیسی و i_{dr}^* مؤلفه مولد توان راکتیو)، کنترل کرد.

۴-۶- ارزیابی روش کنترلی پیشنهادی با استفاده از شبیه سازی

در این بخش به بیان نتایج شبیه سازی می‌پردازیم. در این شبیه سازی یک مزرعه بادی ۹ MW متشکل از ۶ ژنراتور القایی ۱.۵MW را با روشی که در بخش‌های پیش در این فصل بدان اشاره شد، کنترل کرده‌ایم. چگونگی اتصال این مزرعه بادی به شبکه در شکل ۴-۱۷ نشان داده شده است. این مزرعه بادی از طریق یک خط به طول ۳۰km و سطح ولتاژ ۲۵kV به یک شبکه ۱۲۰ کیلو ولتی متصل است.

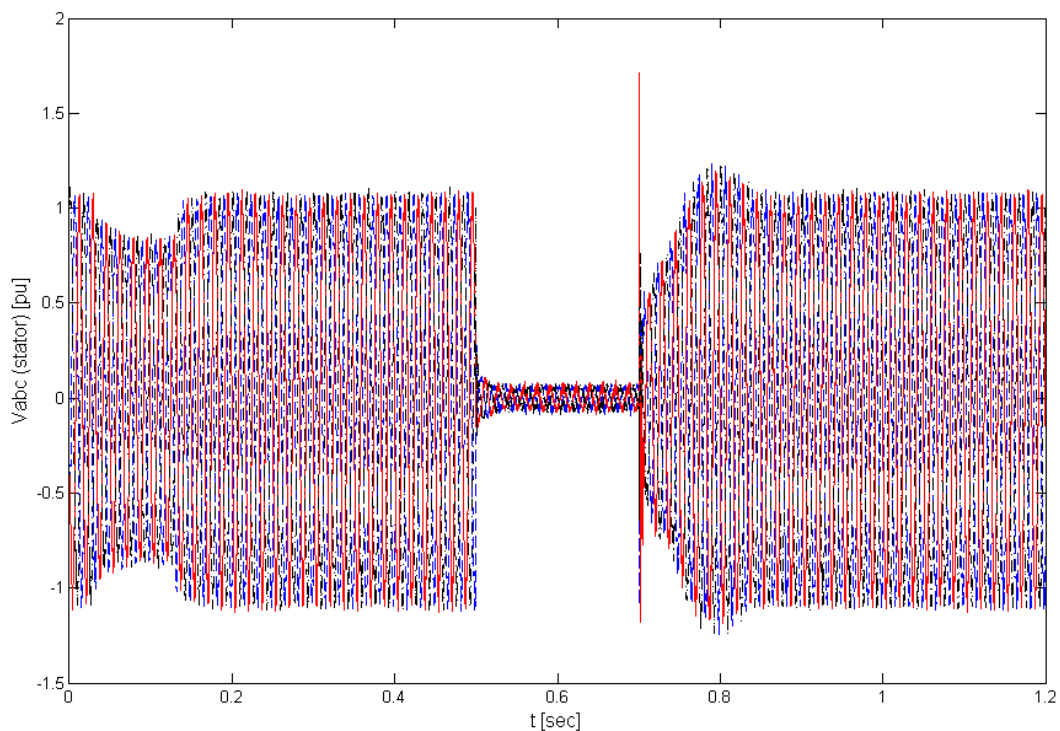


شکل ۴-۱۷: شماتیک مدل شبیه سازی شده مزرعه بادی در شبکه قدرت و محل وقوع خطا.

توربین‌های بادی از یک ژنراتور القایی تغذیه دوگانه متشکل از ژنراتور القایی رتور سیم‌پیچی شده و یک مبدل PWM بر اساس IGBT AC/DC/AC مورد استفاده قرار گرفتند. فرکانس کلیدزنی ۱۶۲۰Hz است. سیم‌پیچی استاتور مستقیماً به شبکه ۶۰Hz متصل است در حالی که رتور از طریق یک مبدل AC/DC/AC در فرکانس متغیر قرار دارد. تکنولوژی DFIG این اجازه را می‌دهد که حداکثر انرژی استحصال شده از باد برای سرعت‌های کم باد به وسیله بهینه سازی سرعت توربین و هنگامی که کمترین تنش مکانیکی بر روی توربین در حین تندبادها وجود دارد، حاصل شود. سرعت بهینه توربین باعث به وجود آمدن بیشترین انرژی مکانیکی برای سرعت باد داده شده متناسب با سرعت باد است. در این شبیه‌سازی سرعت باد در ۱۰s/m ثابت در نظر گرفته شده است. سرعت کنترل، از یک کنترلر گشتاور جهت ننگ داشتن سرعت در ۱.۰۹pu استفاده می‌کند.

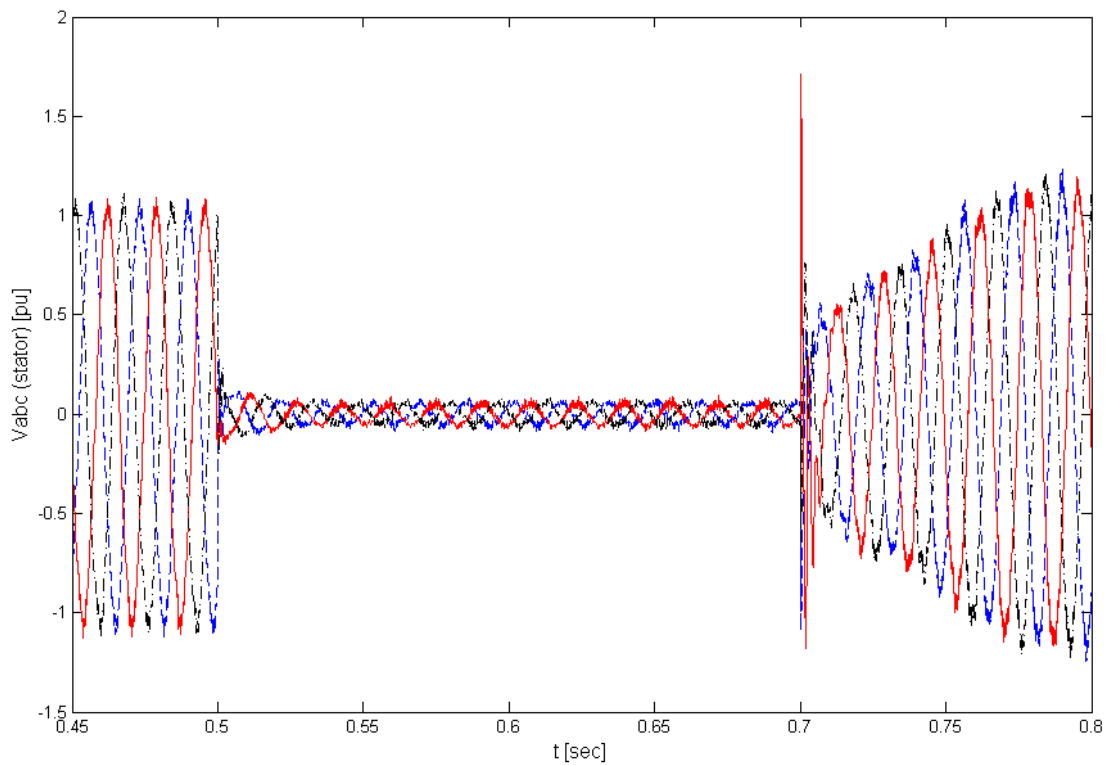
خطای شبیه‌سازی شده به مدت ۰.۲ ثانیه و از ثانیه ۰.۵ تا ۰.۷ به صورت سه فاز در پایانه ۲۵kV سمت ترانسفورماتور ۲۵ kV/۵۷۵۷، ۱.۷۵MVA*۶ مطابق شکل ۴-۱۷ انجام و نتایج آن مورد بررسی قرار گرفته شده است.

شکل ۴-۱۸، شکل موج ولتاژ را در باس خروجی از پایانه استاتور مزرعه بادی متشکل از ۶ ژنراتور ۱.۵ مگاواتی را در حین خطا و پس از آن نشان می‌دهد.



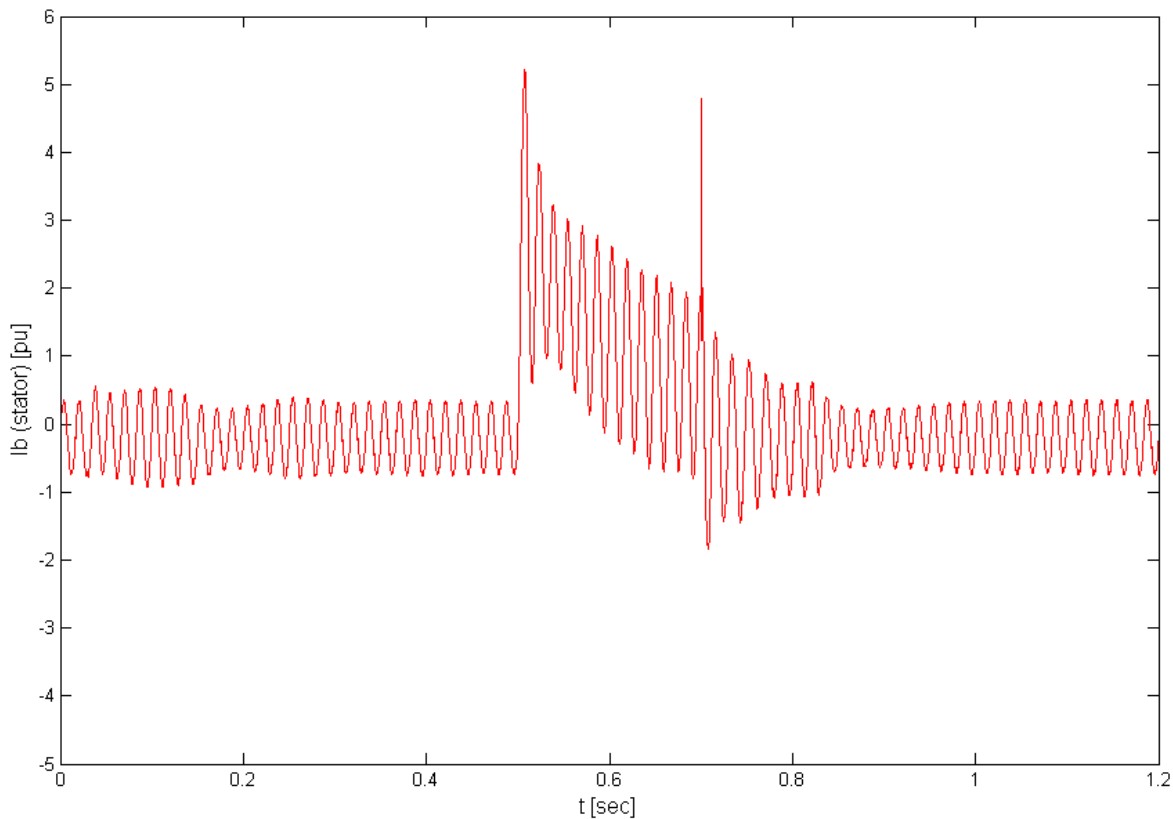
شکل ۴-۱۸: شکل موج سه فاز در پایانه خروجی ژنراتورهای القایی تغذیه دوگانه در حین خطا و پس از آن.

در شکل ۴-۱۹ می‌توان واضح‌تر تغییرات شکل موج ولتاژ پایانه این مزرعه بادی را مشاهده کرد. میزان اندازه ولتاژ، از مقدار تقریبی یک پریونیت به ۱۰ درصد مقدار نامی آن تقلیل یافته است.



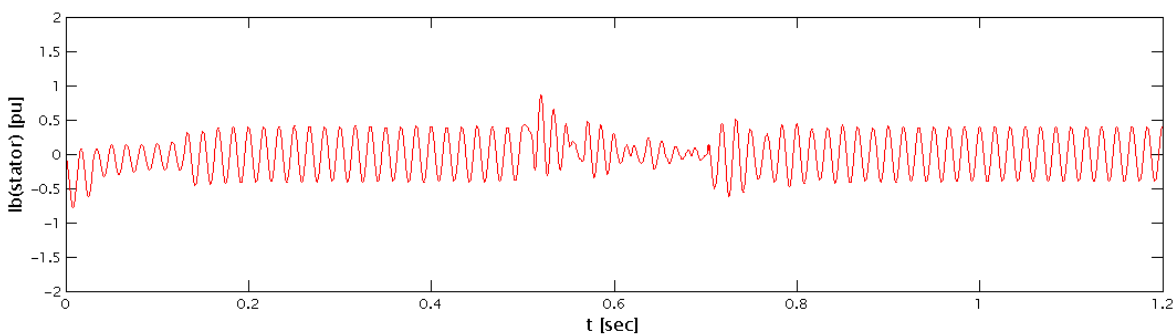
شکل ۴-۱۹: کاهش اندازه ولتاژ به ۱۰ درصد مقدار نامی آن و تغییرات شکل موج ولتاژ استاتور در حین خطا.

شکل ۴-۲۰: شکل موج جریان فاز b استاتور را در حین و پس از خطا نشان می‌دهد. همان‌طور که دیده می‌شود نیاز به ایزوله کردن مدار مزرعه بادی از شبکه به دلیل مسایل حفاظتی امری غیر قابل اجتناب است. دیده می‌شود بدون مسایل کنترلی طرف رتور جریان در استاتور تا مرز ۵ برابر جریان نامی می‌رسد. این باعث می‌شود تا اگر در مدار ماندن در اولویت قرار گیرد از مقاومتی به نام کربار در طرف رتور جهت کاهش این جریان استفاده شود.

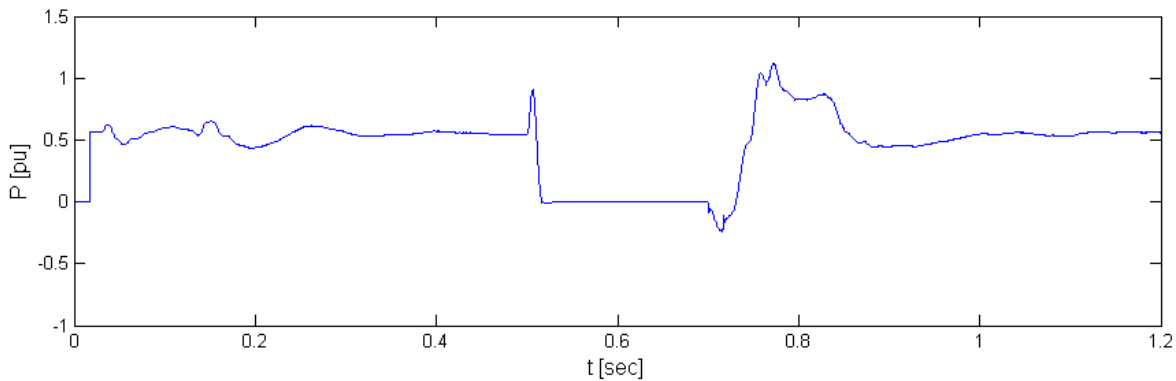


شکل ۴-۲۰: شکل موج جریان استاتور فاز b بدون استفاده از روش کنترلی جریان پیشگویانه.

با این حال مطابق آنچه که در شکل ۴-۲۱ دیده می‌شود جریان رتور به طور کنترل شده‌ای در محدوده نامی خود شروع به نوسان کرده و پس از رفع حالت خطا به مقدار نامی خود باز می‌گردد. همان‌طور که دیده می‌شود از پدیده جریان هجومی به علت خطای متقارن اتصال کوتاه در طرف جریان استاتور و بالطبع رتور جلوگیری شده است. در نتیجه ابزار حفاظتی مدار توربین بادی را از شبکه قطع نمی‌کند و مزرعه بادی در شبکه باقی خواهد ماند و مطابق شکل ۴-۲۲ پس از برطرف شدن عامل خطا این ژنراتور شروع به توان دهی مجدد به شبکه می‌کند و در حالت پایدار خود در مدار باقی می‌ماند.

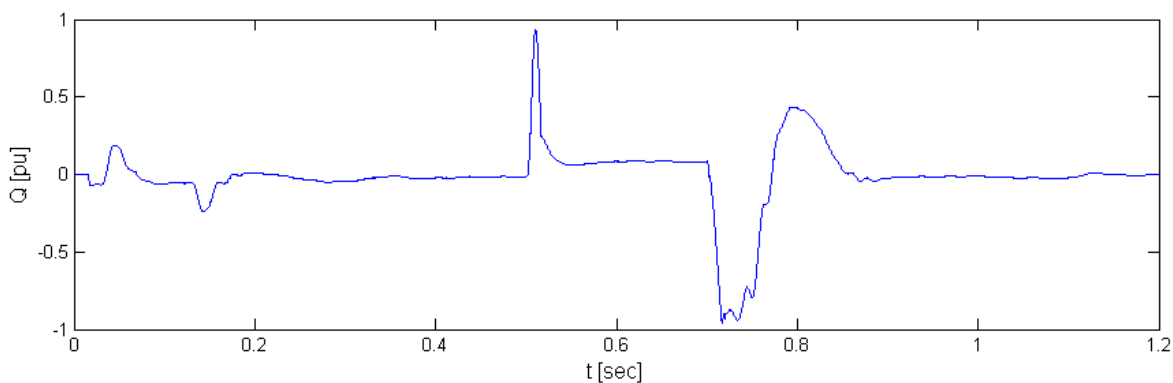


شکل ۴-۲۱: شکل موج جریان استاتور فاز b با استفاده از روش کنترلی جریان پیشگویانه.



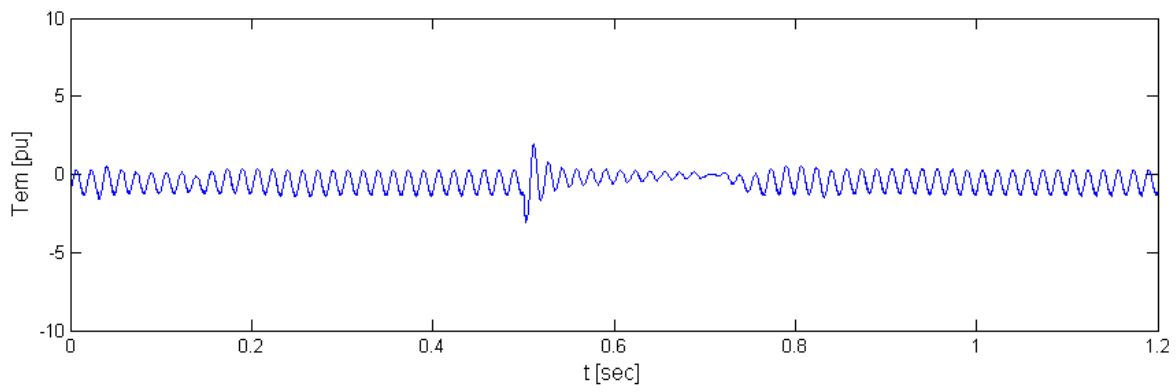
شکل ۲۲-۴: شکل موج توان اکتیو خروجی از ژنراتورهای القایی تغذیه دوگانه در حین و پس از خطا.

شکل ۲۳-۴ نحوه تغییرات توان راکتیو خروجی از مزرعه بادی را نشان می‌دهد. توان راکتیو خروجی قبل و بعد از خطا مطابق شکل در صفر نگاه داشته شده است. در لحظه وقوع خطا و پس از رفع آن به دلیل تغییرات مقاومت القایی مدار شاهد پیک در ابتدا و انتها هستیم که با گذشت زمان و تغییرات جریان این مقدار در حین خطا دوباره به صفر می‌رسد.



شکل ۲۳-۴: شکل موج توان راکتیو خروجی از ژنراتورهای القایی تغذیه دوگانه در حین و پس از خطا.

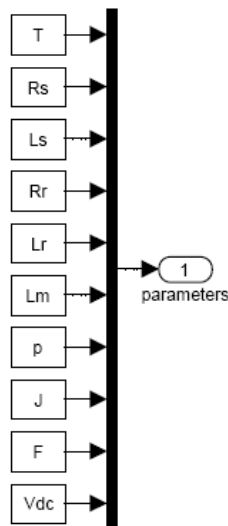
شکل ۲۴-۴ نشان‌دهنده تغییرات گشتاور الکترومغناطیسی توربین‌های بادی مجهز به DFIG است. در حین خطا مقدار متوسط گشتاور الکترومغناطیسی در مقداری متفاوت و کمی بیشتر به دلیل تغییران جریان رتور و استاتور ثابت خواهد شد و پس از رفع خطا به حالت اولیه خود باز می‌گردد.



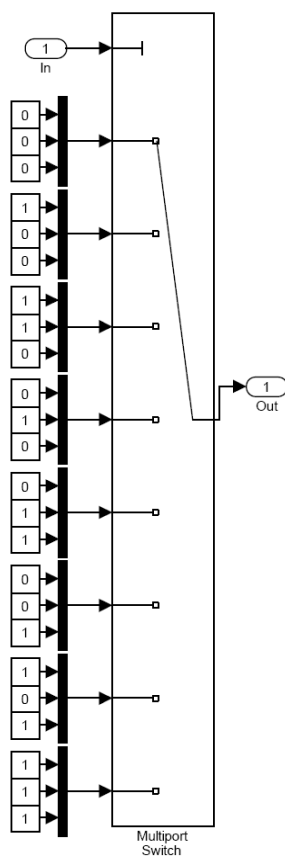
شکل ۴-۲۴: شکل موج گشتاور الکترومغناطیسی زنراتورهای القایی تغذیه دوگانه در حین و پس از خطا.

۴-۷- شرح عملکرد چند بلوک به کار رفته در شبیه سازی

به منظور سهولت در امر پیاده سازی، مقادیر پارامترهای ماشین از جمله شکل ۴-۲۵ و دیگر مقادیر محاسبه شده از مرحله قبلی و اندازه‌گیری‌های حالت فعلی ماشین توسط یک بلوک mux به صورت یک سیگنال مالتی‌پلکس شده و به کنترل اصلی که شامل یک بلوک Matlab function اعمال می‌گردند، که این بلوک روابط (۴-۴۰) تا (۴-۷۴) و همچنین جدول ۴-۲ را به صورت M-File در داخل خود داشته و با محیط شبیه سازی لینک می‌گردد. برنامه نوشته شده به صورت M-File درآورده شده است. در هر لحظه و نمونه، این بلوک با مقادیر داده شده به عنوان ورودی عددی بین ۱ تا ۸ را به عنوان کد یکی از بردارهای مناسب انتخاب شده محاسبه و در خروجی تولید می‌نماید. این کد مربوطه توسط بلوک دیاگرام شکل ۴-۲۶ تبدیل به سیگنال‌های آتش مناسب برای اینورتر منبع ولتاژ سه فاز با کلیدهای IGBT ارسال می‌گردند. لازم به ذکر است که سیگنال آتش تعیین شده به مدت زمانی برابر با پریود کلیدزنی (با توجه به فرکانس کلیدزنی ثابت) بدون تغییر در یک حافظه موقت ذخیره و طی این پریود زمانی که برابر T می‌باشد برای هر یک از پایه‌های a,b,c اینورتر ارسال می‌گردند و سپس در آنجا به هر یکی از کلیدهای پایه‌ها سیگنال مربوطه ارسال می‌گردد.

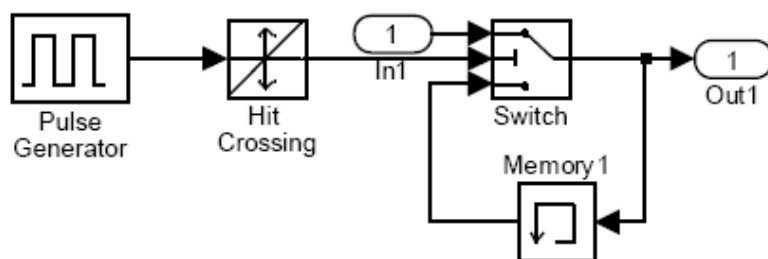


شکل ۴-۲۵: پارامترهای ماشین اعمالی به کنترل اصلی.



شکل ۴-۲۶: تبدیل کد بردار به سیگنال‌های آتش مناسب برای اینورتر.

شکل ۴-۲۷: دیاگرام شبیه سازی شده حافظه موقت را نشان می‌دهد. نحوه کارکرد این زیر سیستم به این صورت است که در ابتدای هر نمونه پالس ژنراتور و بلوک Hit crossing مقدار سیگنال را در حافظه موقت Memory ذخیره و تا آخر پریود بدون تغییر در آن حفظ نموده و به خروجی اعمال می‌نماید. لازم به ذکر می‌باشد که به دلیل اعمال سیگنال‌های آتش در مدت زمان‌ها و بازه زمانی‌های ثابت T ، فرکانس کلیدزنی اینورتر نیز که از مهم‌ترین اهداف این پایان نامه تعریف شده است ثابت می‌گردد.



شکل ۴-۲۷: دیاگرام شبیه سازی شده حافظه موقت برای تثبیت فرکانس کلیدزنی.

فصل پنجم

نتیجه‌گیری و پیشنهادها

۵-۱- نتیجه‌گیری

انرژی باد در دهه‌های گذشته خود را به عنوان یکی از انرژی‌های پاک رو به رشد معرفی کرد. با نفوذ هر چه بیشتر نیروگاه‌های بادی این نگرانی به وجود آمد که دیگر نمی‌توان مانند گذشته اثر قطع نیروگاه-های بادی را در حین خطا نادیده گرفت. بر این اساس استانداردها و دستورالعمل‌هایی به وجود آمد که یکی از این شاخصه‌ها قابلیت در مدار باقی ماندن در حین خطا است.

با بررسی‌های صورت گرفته در انواع ژنراتورهای بکار رفته در توربین‌های بادی، ژنراتورهای القایی تغذیه دوگانه به عنوان ژنراتور غالب و برتر در نیروگاه‌های بادی تعیین شد. با توجه به نفوذ قابل توجه این ژنراتورها در سیستم قدرت، بررسی عملکرد این ژنراتورها در طول خطا اهمیت یافته است.

با توجه به نحوه کاربرد ژنراتورهای القایی تغذیه دوگانه در نیروگاه‌های بادی و اتصال مستقیم سیم-پیچی استاتور آن‌ها به سیستم قدرت، این ژنراتورها به اغتشاشات شبکه حساسند. اغتشاش شبکه را می‌توان با دو عامل تغییرات فرکانسی و افت ولتاژ در نظر گرفت.

تغییرات فرکانس در نتیجه‌ی عدم تعادل بین تولید و مصرف و یا ورود و خروج یک بار بزرگ از سیستم قدرت به وجود می‌آید و بر عملکرد واحدهای متصل شده به سیستم قدرت اثر می‌گذارد. تحلیل این موضوع در مورد نیروگاه‌های بادی مختلف، متفاوت است. با بررسی‌های صورت گرفته در مورد ژنراتورهای القایی تغذیه دوگانه بررسی شد در صورتی که کنترل اضافی لحاظ نشود، با تغییر فرکانس شبکه، به دلیل قرار داشتن مبدل فرکانسی در سمت رتور، سرعت رتور تغییر محسوسی نخواهد داشت و این بدان معناست که این ژنراتور در حالت عملکرد عادی از خود پاسخ اینرسی نشان نمی‌دهند.

عامل دیگری که برای ژنراتور به عنوان اغتشاش در نظر گرفته می‌شود افت ولتاژ است. شدت افت ولتاژ بر عملکرد ژنراتور القایی تغذیه دوگانه اثرگذار است و در صورتی که افت ولتاژ به اندازه‌ای باشد که سبب آسیب رساندن به مبدل الکترونیک قدرت قرار گرفته در سمت رتور و یا خازن میانی آن شود سیستم تغییر حالت می‌دهد. همان‌طور که دیدیم معمول‌ترین روش در این حالت اتصال مقاومت کربوبار به سیم‌پیچی رتور است.

عملکرد در طول اغتشاش ولتاژ در این پایان‌نامه به صورت افت ولتاژ و اتصال کوتاه متقارن در نظر گرفته شده است.

قبل از بررسی عملکرد ژنراتورها داشتن مدل مناسب از سیستم مورد مطالعه ضروری است. در این پایان‌نامه در تحلیل عملکرد ژنراتورهای القایی تغذیه دوگانه در طول خطا، مدل کاملی از یک واحد نیروگاه بادی شامل خاصیت آیرودینامیکی پره و مدل جعبه دنده به عنوان بخش مکانیکی و ژنراتور و سیستم کنترلی به عنوان بخش الکتریکی مدل‌سازی شده است.

سپس در فصلی جداگانه به معرفی کنترل مستقیم گشتاور و جهت یابی شار میدان جهت استفاده از آن‌ها برای کنترل ماشین القایی و استفاده از یک روش کنترلی برای مدار مبدل سمت رتور به نام روش کنترل جریان پیشگویانه پرداختیم و عملکرد این روش را در شبیه‌سازی مورد سنجش و ارزیابی قرار دادیم. دیده شد جریان هجومی ناشی از خطای اتصال کوتاه سه فاز متقارن با استفاده از این روش به صورت پیشگویانه عمل کرده و تحت کنترل در محدوده نامی نگاه داشته شده است. این به نوبه خود باعث در مدار باقی ماندن ژنراتور القایی تغذیه دوگانه در شبکه تا به هنگام رفع خطا و پس از آن می‌شود.

۵-۲- پیشنهادها

در مورد زمینه‌های مختلفی که در این پایان‌نامه مورد بررسی قرار گرفته می‌توان پیشنهاداتی جهت تحقیق ارائه داد. برخی از پیشنهادان در این بخش بیان شده است.

- در این پایان‌نامه شبیه‌سازی‌های انجام شده بر اساس ایده‌آل فرض کردن هسته‌های ماشین ($\mu = \infty$) می‌باشند، جهت بررسی دقیق‌تر می‌توان تأثیر منحنی اشباع را نیز در کنترل پیشگویانه جریان و رفتارهای گذرا تحقیق کرد.
- در روش‌های کنترل برداری یک روش مناسب برای حذف حساسیت به پارامترهای ماشین، مانند: مقاومت و ثابت زمان‌های رتور و استاتور، تخمین این پارامترهای به صورت on-line

می‌باشد. این روش کنترل قابلیت اطمینان و خطای حالت ماندگار بسیار کوچک‌تری خواهد داشت.

- ما در این پایان‌نامه بررسی رفتار ژنراتورهای القایی رتور سیم‌پیچی شده متصل به شبکه را مورد بررسی قرار دادیم. می‌توان از انواع دیگر ژنراتورهای القایی از جمله ژنراتور قفس سنجابی برای تحقیق در مورد چگونگی در مدار ماندن نیروگاه‌های بادی استفاده کرد.
- اثر ژنراتورهای القایی تغذیه دوگانه بر پایداری شبکه و نقش سیستم‌های کنترلی آن نیز می‌تواند مورد بررسی و تحقیق قرار بگیرد.
- استفاده از فیلترها برای بهبود شکل موج جریان و ولتاژ خروجی رتور در حین خطا و پس از رفع خطا.
- بررسی و بهبود پاسخ اینرسی ژنراتورهای القایی تغذیه دوگانه در حین خطا با تغییر سیستم کنترلی اعمالی به سمت رتور.

- [1] Miao, Zh., and Fan, L., The art of modeling and simulation of induction generator in wind generation applications using high-order model, *Simulation Modelling Practice and Theory*, pp. 1239–1253 (2008).
- [2] Ko, H., Yoonb, G., Kyung, N., and Hong, W., Modeling and control of DFIG-based variable-speed wind-turbine, *Electric Power Systems Research*, pp. 1841–1849 (2008).
- [3] Luna, A., Lima, F.K.A, Santos, D., Rodriguez, P., Watanabe, E.H., and Arnaltes, S., Simplified Modeling of a DFIG for Transient Studies in Wind Power Applications, *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 58, no. 1, pp. 9–20, (2011).
- [4] Nunes, M.V.A., Lopes, J.A.P., Zurn, H.H., Bezerra, U.H., and Almeida, R.G., Influence of the Variable-Speed Wind Generators in Transient Stability Margin of the Conventional Generators Integrated in Electrical Grids, *IEEE Transactions on Energy Conversion*, Vol. 19, Issue 4, pp. 692–701 (2004).
- [5] Xu, L., and Wang, Y., Dynamic Modeling and Control of DFIG-Based wind Turbines Under unbalance Network Conditions, *IEEE Transactions on Power Systems*, Vol. 22, Issue 1, pp. 314–323, (2007).
- [6] Pena, R., Clare, J.C., and Asher, G.M., Doubly fed induction generator using back-to-back PWM converters and its application to variable-speed wind-energy generation, *Inst. Electr. Eng. Proc. Electr. Power Appl.*, vol. 143, no. 3, pp. 231–241 (1996).
- [7] Petersson, A., Harnefors, L., and Thiringer, T., Evaluation of current control methods for wind turbines using doubly-fed induction machines, *IEEE Transactions Power Electronics*, vol. 20, no. 1, pp. 227–235, (2005).
- [8] Akagi, H., and Sato, H., Control and performance of a doubly-fed induction machine intended for a flywheel energy storage system, *IEEE Transactions Power Electronics*, vol. 17, no. 1, pp. 109–116, (2002).
- [9] De Doncker, R.W., Muller, S., and Deicke, M., Doubly fed induction generator systems for wind turbines, *IEEE Industrial Appl. Magazine*, vol. 8, no. 3, pp. 26–33 (2002).
- [10] Chen, H., Tiño, P., and Yao, X., Probabilistic Classification Vector Machines, *IEEE TRANSACTIONS ON NEURAL NETWORKS*, Vol. 20, NO. 6, pp. 901-914 (2009).
- [11] Gokhale, K.P., Karraker, D.W., and Heikkila, S.J., *Controller for a wound rotor slip ring induction machine*, U.S. Patent 6 448 735 B1, (2002).
- [12] Zhi, D., and Xu, L., Direct Power Control of DFIG With Constant Switching Frequency and Improved Transient Performance, *IEEE TRANSACTIONS ON ENERGY CONVERSION*, vol. 22, no. 1, pp. 110-118 (2008).
- [13] Datta, R., and Ranganathan, V.T., Direct power control of grid-connected wound rotor induction machine without rotor position sensors, *IEEE Transactions Power Electronics*, vol. 16, no. 3, pp. 390–399 (2001).
- [14] Xu, L. and Cartwright, P., Direct active and reactive power control of DFIG for wind energy generation, *IEEE Transactions Energy Conversion.*, vol. 21, no. 3, pp. 750–758 (2006).
- [15] Takahashi, I., and Noguchi, T., A new quick-response and high-efficiency control strategy of an induction motor, *IEEE Transactions Industrial Appl.*, vol. IA-22, no. 5, pp. 820–827 (1986).
- [16] Depenbrock, M. “Direct self-control (DSC) of inverter-fed induction machine, *IEEE Transactions Power Electronics*, vol. PE-3, no. 4, pp. 420–429 (1988).
- [17] Habetler, T.G., Profumo, F., Pastorelli, M., and Tolbert, L.M., Direct torque control of induction machines using space vector modulation, *IEEE Transactions Industrial Appl.*, vol. 28, no. 5, pp. 1045–53 (1992).
- [18] Lai, Y.S., and Chen, J.H., A new approach to direct torque control of induction motor drives for constant inverter switching frequency and torque ripple reduction, *IEEE Transactions Energy Conversion*, vol. 16, no. 3, pp. 220–227 (2001).

- [19] Idris, N.R.N., and Yatim, A.H.M., Direct torque control of induction machines with constant switching frequency and reduced torque ripple, *IEEE Transactions Industrial Electronics*, vol. 51, no. 4, pp. 758–767 (2004).
- [20] Kang, J., and Sul, S., New direct torque control of induction motor for minimum torque ripple and constant switching frequency, *IEEE Transactions Industrial Appl.*, vol. 35, no. 5, pp. 1076–1082 (1999).
- [21] Aurtenechea, S., Rodr'iguez, M.A., Oyarbide, E., and Torrealday, J.R., Predictive control strategy for DC/AC converters based on direct power control, *IEEE Transactions Industrial Electronics*, vol. 54, no. 3, pp. 1261–1271 (2007).
- [22] Vazquez, S., Sanchez, J.A., Carrasco, J.M., Leon, J.I., and Galvan, E., A model-based direct power control for three-phase power converters, *IEEE Transactions Industrial Electronics*, vol. 55, no. 4, pp. 1647–1657, (2008).
- [23] Malinowski, M., Jasinski, M., and Kazmierkowski, M.P., Simple direct power control of three-phase PWM rectifier using space-vector modulation (DPC-SVM), *IEEE Transactions Industrial Electronics*, vol. 51, no. 4, pp. 447–454 (2004).
- [24] Abad, G., Rodr'iguez, M.A., and Poza, J., Two-level VSC-based predictive direct power control of the doubly fed induction machine with reduced power ripple at low constant switching frequency, *IEEE Transactions Energy Conversion*, vol. 23, no. 2, pp. 570–580, (2008).
- [25] Abad, G., Rodr'iguez, M.A., and Poza, J., Two-Level VSC Based Predictive Direct Torque Control of the Doubly Fed Induction Machine With Reduced Torque and Flux Ripples at Low Constant Switching Frequency, *IEEE Transactions Power Electronics*, vol. 23, no. 3, pp. 1050–1061, (2008).
- [26] Zhi, D., Xu, L., and Williams, B.W., Improved direct power control of grid-connected DC/AC converters, *IEEE Transactions Power Electronics*, vol. 24, no. 5, pp. 1280–1292, (2009).
- [27] Zhi, D., Xu, L., Direct power control of DFIG with constant switching frequency and improved transient performance, *IEEE Transactions Energy Conversion*, vol. 22, no. 1, pp. 110–118, (2007).
- [28] Zhi, D., Xu, L., and Morrow, J., Improved direct power control of doubly fed induction generator based wind energy system, in *Proc. IEMDC*, pp. 1–6 (2007).
- [29] Zeng, Q., and Chang, L., An advanced SVPWM-based predictive current controller for three-phase inverters in distributed generation systems, *IEEE Transactions Industrial Electronics*, vol. 53, no. 3, pp. 1235–1246 (2008).
- [30] Mohamed, Y.A.-R.I., and El-Saadany, E.F., Robust high bandwidth discrete-time predictive current control with predictive internal model— A unified approach for voltage-source PWM converters, *IEEE Transactions Power Electronics*, vol. 23, no. 1, pp. 126–136, (2008).
- [31] Jeong, S.G., and Woo, M.H. DSP-based active power filter with predictive current control, *IEEE Transactions Industrial Electronics*, vol. 44, no. 3, pp. 329–336, (1997).
- [32] Jeong, S.J., and Song, S.H., Improvement of predictive current control performance using online parameter estimation in phase controlled rectifier, *IEEE Transactions Power Electronics*, vol. 22, no. 5, pp. 1820–1825 (2007).
- [33] Zhi, D., Xu, L., and Williams, B.W., Model-Based Predictive Direct Power Control of Doubly Fed Induction Generators, *IEEE Transactions Power Electronics*, vol. 25, no. 2, pp. 341–351, (2010).
- [34] Moon, H.T., Kim, H.S., and Youn, M.J., A discrete-time predictive current control for PMSM, *IEEE Transactions Power Electronics*, vol. 18, no. 1, pp. 464–472, (2003).
- [35] Wipasuramont, P., Zhu, Z.Q., and Howe, D., Predictive current control with current-error correction for PM brushless AC drives, *IEEE Transactions Industrial Appl.*, vol. 42, no. 4, pp. 1071–1079 (2006).
- [36] Naouar, M.W., Naassani, A.A., Monmasson, E., and Belkhdja, T.S., FPGA-based predictive current controller for synchronous machine speed drive, *IEEE Transactions Power Electronics*, vol. 23, no. 4, pp. 2115–2126, (2008).
- [37] Hansen, A.D., and Michalke, G., Voltage grid support of DFIG wind turbines during grid faults, in *Proc. European Wind Energy Conference and Exhibition*, (2007).
- [38] Hansen, A.D., and Michalke, G., Fault ride-through capability of DFIG wind turbines, *Renewable Energy* 32, pp. 1594–1610 (2007).

- [39] Ekanayake J., and Jenkins N., Comparison of The Response of Doubly Fed And Fixed-Speed Induction Generator Wind Turbines To Changes In Network Frequency, *IEEE Transactions on Energy Conversion*, Vol. 19, No. 4, 2004
- [40] Mullane, A., and Malley, M., The Inertial Response of Induction-Machine-Based Wind Turbines, *IEEE Transactions on Power Systems*, Vol. 20, No. 3, pp. 1496-1503 (2005).
- [41] Muyeen, S.M., Tamura, J., and Murata, T., *Stability Augmentation of A Grid Connected Wind Farm*, Green Energy And Technology Book, 2009 Springer
- [42] El-Sattar, A.A., Saad, N.H., Shams El-Dein, M.Z., Dynamic Response of Doubly Fed Induction Generator Variable Speed Wind Turbine under Fault, *Electric Power System Research* 78, pp. 1240-1246 (2008).
- [43] Martin, D., Arnaltes, S., and Amenedo, J. Reactive Power Capability of Doubly Fed Asynchronous Generators, *Electric Power Systems Research* 78, pp. 1837–1840 (2008).
- [44] <http://www.knowclub.net/paper/?p=215>
- [45] Crs Report For Congress, "Wind Power In The United States: Technology, Economic, And Policy Issues", June 20, 2008
- [46] <http://www.sunair.ir/>
- [47] R. Melicio, V. Mendes, "Doubly Fed Induction Generator Systems For Variable Speed Wind Turbine", 9CHLIE-paper
- [48] M. Patel, *Wind And Solar Power Systems*, U.S. Marchant Marine Academy Kings Point, New York, 1999.
- [49] H. Polinder "Basic Operation Principles And Electrical Conversion Systems Of Wind Turbines", 2005
- [50] D. Ban "Generator Technology For Wind Turbines, Trends In Application And Production In Croatia", 2007
- [51] L. H. Hansen, L. Helle, F. Blaabjerg, E. Ritchie, S. Munk-Nielsen, H. Bindner, P. Sorensen And B. Bak-Jensen., "Conceptual Survey Of Generators And power Electronics For Wind Turbines" , Riso National Laboratory, Roskilde, Denmark ,December 2001
- [52] L. Boddea, "The Electric Generators Handbook, Variable Speed Generators", Polytechnical Institute Timisoara, Romania 2006
- [53] A. D. Hansen, L. H. Hansen, "Market penetration of wind turbine concepts over the years", Report of Riso National Laboratory, Wind Energy Department, DK-4000 Roskilde, Denmark
- [54] M. Garcia, M. P. Conech, J. Sallan, And A. Llombart, "Modeling Wind Farms for Grids Disturbance Studies", *Renewable Energy* 33(2008), pp.2109-2121.
- [55] S. Heier, "Grid Integration of Wind Energy Conversion Systems", Kassel University, Germany, 1998.
- [56] M. Kayikci, J. V. Milanovic, "Assessing Transient Response of DFIG–Based Wind Plants- The Influence of Model Simplifications and Parameters" *IEEE Transactions On Power System*, Vol. 23, No. 2, May 2008.
- [57] Z. Miao, L. Fan, "The Art Of Modeling And Simulation Of Induction Generator In Wind Generation Applications Using High Order Model", *Simulation Modeling Practice And Theory*, 2008.
- [58] J.B.Ekanayake, L.Holdsworth, N.Jenkins, Comparison of 5th order and 3rd order machine models for doubly fed induction generator (DFIG) wind turbines, *Electric Power Systems Research* 67, pp. 207-215 (2003).
- [59] A. Feijoo, J. Cidras, C. Carrillo, "A Third Order Model For The Doubly-Fed Induction Machine", *Electric Power Systems Research* 56 (2000), pp.121-127.
- [60] L. Qihui, Y. Fang, Z. Jianhua, "Novel Modeling And Control Of Doubly-Fed Variable-Speed Constant-Frequency Wind Power Generator", *IEEE Industrial Electronics Society (IECON)* Nov. 5-8, 2007, Taipei, Taiwan
- [61] M. Kayıkcı, V. Milanovic, "Reactive Power Control Strategies For DFIG-Based Plants" *IEEE Transactions on Energy Conversion*, Vol. 22, No. 2, June 2007 389

واژه نامه‌ی فارسی به انگلیسی

Global Wind Energy Council	انجمن انرژی باد جهان
Online	برخط
Hub	تویی
Look-Up Table	جدول مراجعه‌ای
Over-Current	جریان اضافی
Upstream	جریان بالا
Downstream	جریان پایین
Stator Flux Oriented (SFO)	جهت یابی شار استاتور
Rotor Flux Oriented (RFO)	جهت یابی شار رتور
Field Oriented Control (FOC)	جهت یابی شار رتور میدان
Rotor Efficiency	راندمان رتور
Soft starter	راه انداز نرم
Maximum Power Tracking	ردیابی توان ماکزیمم [باد]
Active stall control method	روش کنترلی استال فعال
Blade angle	زاویه‌ی پره
Double Output Induction Generator (DOIG)	ژنراتور القایی با دو خروجی
Doubly-Fed Induction Generator (DFIG)	ژنراتور القایی تغذیه دوگانه
Opti-Slip Induction Generator (OSIG)	ژنراتور القایی رتور سیم پیچی شده با مقاومت متغیر در رتور

Squirrel Cage Induction Generator (SCIG)	ژنراتور القایی قفس سنجابی
Permanent Magnet Synchronous Generator (PMSG)	ژنراتور سنکرون با آهنربای دائم
Wound Rotor Synchronous Generator (WRSG)	ژنراتور سنکرون با رتور سیم پیچی شده
Switch Reluctance Generator (SRG)	ژنراتورهای سوئیچ رلوکتانس
Transverse Flux Generator (TFG)	ژنراتورهای شار معکوس
High-Voltage Generator (HVG)	ژنراتورهای ولتاژ بالا
Power Coefficient (C_p) of the rotor	ضریب توان رتور
Generic Control Scheme	طرح کنترلی کلی
Nacelle frame	قاب ناسل
Fault Ride-Through (FRT) Capability	قابلیت کارکرد در شرایط غیرعادی یا خطا
Vector Control (VC)	کنترل برداری
Direct Power Control (DPC)	کنترل توان مستقیم
Predictive Current Control (PCC)	کنترل جریان پیش گوینه
Direct Torque Control (DTC)	کنترل گشتاور مستقیم
Yaw control	کنترل انحرافی
Stall control	کنترل به روش استال
Pitch power control	کنترل توان با تغییر زاویه [پره]
Optimum Slip (OptiSlip)	لغزش بهینه
Rotor Side Converter (RSC)	مبدل سمت رتور
Grid Side Converter (GSC)	مبدل سمت شبکه
Voltage Source Converters (VSC)	مبدل‌های منبع ولتاژ
Decoupling	مدار مستقل کننده

Adaptive Internal Model	مدل داخلی افقی
Space Vector Modulation	مدولاسیون فضای برداری
Turbine self damping	میرایی خودی توربین
Generator self damping	میرایی خودی ژنراتور
Mutual damping	میرایی متقابل
Tip Speed Ratio (TSR)	نسبت سرعت نوک [پره‌ها]
Torsional oscillation	نوسانات چرخشی

واژه نامه‌ی انگلیسی به فارسی

Active stall control method	روش کنترلی استال فعال
Adaptive Internal Model	مدل داخلی وفقی
Blade angle	زاویه‌ی پره
Decoupling	مدار مستقل کننده
Direct Power Control (DPC)	کنترل توان مستقیم
Direct Torque Control (DTC)	کنترل گشتاور مستقیم
Double Output Induction Generator (DOIG)	ژنراتور القایی با دو خروجی
Doubly-Fed Induction Generator (DFIG)	ژنراتور القایی تغذیه دوگانه
Downstream	جریان پایین
Fault Ride-Through (FRT) Capability	قابلیت کارکرد در شرایط غیرعادی یا خطا
Field Oriented Control (FOC)	جهت یابی شار رتور میدان
Generator self damping	میرایی خودی ژنراتور
Generic Control Scheme	طرح کنترلی کلی
Global Wind Energy Council	انجمن انرژی باد جهان
Grid Side Converter (GSC)	مبدل سمت شبکه
High-Voltage Generator (HVG)	ژنراتورهای ولتاژ بالا
Hub	تویی
Look-Up Table	جدول مراجعه‌ای
Maximum Power Tracking	ردیابی توان ماکزیمم [باد]

Mutual damping	میرایی متقابل
Nacelle frame	قاب ناسل
Online	برخط
Optimum Slip (OptiSlip)	لغزش بهینه
Opti-Slip Induction Generator (OSIG)	ژنراتور القایی رتور سیم پیچی شده با مقاومت متغیر در رتور
Over-Current	جریان اضافی
Permanent Magnet Synchronous Generator (PMSG)	ژنراتور سنکرون با آهنربای دائم
Pitch power control	کنترل توان با تغییر زاویه [پره]
Power Coefficient (C_p) of the rotor	ضریب توان رتور
Predictive Current Control (PCC)	کنترل جریان پیش گوینه
Rotor Efficiency	راندمان رتور
Rotor Flux Oriented (RFO)	جهت یابی شار رتور
Rotor Side Converter (RSC)	مبدل سمت رتور
Soft starter	راه انداز نرم
Space Vector Modulation	مدولاسیون فضای برداری
Squirrel Cage Induction Generator (SCIG)	ژنراتور القایی قفس سنجابی
Stall control	کنترل به روش استال
Stator Flux Oriented (SFO)	جهت یابی شار استاتور
Switch Reluctance Generator (SRG)	ژنراتورهای سوئیچ رلوکتانس
Tip Speed Ratio (TSR)	نسبت سرعت نوک [پره‌ها]
Torsional oscillation	نوسانات چرخشی

Transverse Flux Generator (TFG)	ژنراتورهای شار معکوس
Turbine self damping	میرایی خودی توربین
Upstream	جریان بالا
Vector Control (VC)	کنترل برداری
Voltage Source Converters (VSC)	مبدل‌های منبع ولتاژ
Wound Rotor Synchronous Generator (WRSG)	ژنراتور سنکرون با رتور سیم پیچی شده
Yaw control	کنترل انحرافی

Abstract

Many developed countries are using wind energy in faraway, deprived and operational-military regions. Also in the defense industries through this, required energy for military instruments and equipments in military support areas can be provided. At present, this feasibility in our sea areas is existed where we can build wind farms in the Caspian Sea, Persian Gulf and Oman. Also in smaller case, wind turbines can be made portable and brought to mass production. The increasing penetration of wind turbines employing DFIG, it becomes a necessity to investigate their behavior during transient disturbances and support them with the fault ride through capabilities. This capability means that all generation plants, including wind generation, should have the ability to remain connected during faults and voltage dip conditions within certain limits. Among the types of generators used in wind turbines, double-fed induction generator capabilities are very interesting. The stator of these generators is connected directly to network and their rotor is also connected through a converter to network. Even if the rotor speed is changed, the generators are capable of produce a constant frequency in the voltage of the stator. Using vector control that is one of a very good and quick control method in the induction machine, independent control of active and reactive powers or electromagnetic torque and stator reactive power is possible. In this thesis, firstly using formulas and relationships of field-oriented control, reference fluxes and currents is calculated. Then using direct torque control, predictive currents are presented. Unlike existing methods, which usually use crowbar for remaining wind turbine in the network, in the proposed method does not require any additional equipment and rotor currents during the fault will be regulated. Evaluation of this case has been investigated by the simulation results. At last the transient behavior of the machines is simulated during and after network faults in terminal voltage. The results indicate that the proposed method compared with conventional methods has improved the performance criteria.

Keywords: Fault Ride-Through, Doubly-Fed Induction Generator (DFIG), Simulation, Wind Turbine Control.



Shahrood University of Technology

Department of Electrical Engineering and Robotics

Modeling and Control of Wind-Turbine Used DFIG under Network Fault Conditions

Saber Naghdi Ganji

Supervisor:

Dr. Ahmad Darabi

Advisor:

Dr. Mohsen Asili

Sep 2011