

دانشگاه تبریز

دانشکده برق و رباتیک

نوسانات توان و ولتاژ در نیروگاه های موجی

دکتر احمد دارابی

استاد راهنما

پیام پوریای ولی

دانشجو

اسفند ۸۵



تقدیم به پدر و مادر عزیزم

تقدیر و تشکر

از زحمات استاد گرانقدر آقای دکتر دارابی که با راهنمایی ها و کمک های بی دریغشان اینجانب را در انجام تحقیقات این رساله راهنمایی نمودند کمال تشکر و قدردانی رادارم.

با تشکر

از آقایان دکتر علومى، یونسیان و سایر اعضاى گروه برق و همچنین دانشجویان محترم آقایان جاوید خراسانى، مهدى جعفرى، اسماعیل بنى سعید، احسان ریحانى و سایر عزیزانى که در اصلاح و تکمیل این تحقیق مرا یارى نموده اند.

فصل اول:

انواع نیروگاه های موجی

۴

مقدمه

۵

۱-۱ برداشت انرژی موج

۷

۲-۱ انواع نیروگاه های موجی

۱۰

۱-۲-۱ نیروگاه های ساحلی

۱۱

۱-۱-۲-۱ نیروگاه کانال مخروطی (tapchan)

۱۱

۲-۱-۲-۱ نیروگاه محفظه آب نوسانی (Oscillating Water Column)

۱۲

۲-۲-۱ نیروگاه های نزدیک ساحلی (Near shore)

۱۳

۱-۲-۲-۱ نیروگاه موجی آب نوسانی توسعه یافته (Ospery)

۱۳

۲-۲-۲-۱ نیروگاه موجی پمپ خانه (house pump)

۱۴

۳-۲-۱ نیروگاه های دور از ساحل (Off shore)

۱۵

۱-۳-۲-۱ نیروگاه توان اقیانوسی (Ocean Power Delivery)

۱۵

۲-۳-۲-۱ نیروگاه درایو مستقیم (Direct Drive Device)

۱۶

۱-۲-۳-۲-۱ نیروگاه شناور نوسانی (Heaving Buoy)

۱۷

۱-۱-۲-۳-۲-۱ نیروگاه ارشمیدسی (Archimedes Wave Swing)

۱۸

۲-۲-۳-۲-۱ ساختار الکتریکی نیروگاه درایو مستقیم

۱۹

فصل دوم:

مدلسازی ماشین القایی

۲۳

مقدمه

۲۴

۱-۲ مدل ماشین القایی

۲۵

۱-۱-۲ معادلات ولتاژ و گشتاور در دستگاه dqo

۲۹

۲-۲ شبیه سازی ژنراتور القایی

۳۳

۱-۲-۲ نمونه نتایج شبیه سازی ژنراتور القایی

۳۳

۲-۲-۲ اثر افزایش یک مقاومت خارجی در مدار روتور روی عملکرد ژنراتور القایی

۳۸

فصل سوم: معرفی و مدلسازی مخزن نیروگاه محفظه آب نوسانی (OWC) و توربین

۴۱

مقدمه

۴۲

۱-۳ توربین های بکاررفته در نیروگاه محفظه آب نوسانی (OWC)

۴۴

۱-۱-۳ توربین ولز (Wells Turbine)

۴۴

۲-۱-۳ توربین ضربه ای (Impulse turbine)

۴۶

۲-۳ تیغه های راهنما (Guide Vanes)

۴۷

۳-۳ منحنی مشخصه های توربین ولز و ضربه ای

۵۰

| | | |
|----|-------|--|
| ۵۰ | ۱-۳-۳ | منحنی های ضریب گشتاور بر حسب ضریب جریان |
| ۵۰ | ۲-۳-۳ | منحنی های ضریب توان بر حسب ضریب جریان |
| ۵۱ | ۳-۳-۳ | منحنی های راندمان |
| ۵۲ | ۴-۳ | پارامترهای واقعی و مشخصات نمونه ای از توربین های ولز و ضربه ای |
| ۵۵ | ۵-۳ | مدلسازی مخزن نیروگاه محفظه آب نوسانی (OWC) |

۵۶ فصل چهارم: شبیه سازی یک نیروگاه موجی با توربین ولز و توربین ضربه ای

| | | |
|----|-----------|---|
| ۵۷ | | مقدمه |
| ۵۸ | ۱-۴ | نیروگاه موجی با توربین های ولز و ضربه ای در حین راه اندازی |
| ۵۹ | ۲-۴ | نیروگاه موجی با توربین های ولز و ضربه ای در حالت ماندگار |
| ۵۹ | ۱-۲-۴ | نیروگاه موجی در رژیم عملکرد با ضریب شار کوچکتر از ۰/۴ |
| ۵۹ | ۱-۱-۲-۴ | نیروگاه موجی با توربین ضربه ای در رژیم عملکرد با ضریب شار کوچکتر از ۰/۴ |
| ۶۳ | ۲-۱-۲-۴ | نیروگاه موجی با توربین ولز در رژیم عملکرد با ضریب شار کوچکتر از ۰/۴ |
| ۶۷ | ۲-۲-۴ | نیروگاه موجی در رژیم عملکرد با ضریب شار بزرگتر از ۰/۴ |
| ۶۷ | ۱-۲-۲-۴ | نیروگاه موجی با توربین ضربه ای در رژیم عملکرد با ضریب شار بزرگتر از ۰/۴ |
| ۷۱ | ۲-۲-۲-۴ | نیروگاه موجی با توربین ولز در رژیم عملکرد با ضریب شار بزرگتر از ۰/۴ |
| ۷۵ | ۳-۲-۲-۴ | نیروگاه موجی با توربین های ولز و ضربه ای و ژنراتور روتور سیم پیچی شده |
| ۷۵ | ۱-۳-۲-۲-۴ | نیروگاه موجی با ژنراتور روتور سیم پیچی شده و توربین ضربه ای |
| ۷۹ | ۲-۳-۲-۲-۴ | نیروگاه موجی با ژنراتور روتور سیم پیچی شده و توربین ولز |
| ۸۲ | ۳-۳-۲-۲-۴ | نیروگاه موجی با توربین ولز، ژنراتور روتور سیم پیچی شده و چرخ طیار |

چکیده

امروزه در صنعت برق و دیگر صنایع بدلیل نگرانی از نرخ کاهشی شدید منابع انرژی فسیلی و صعود قیمت آن و همچنین ایجاد الودگی های زیست محیطی، استفاده از انرژی ارزانتر با آلاینده گی کمتر اهمیت فراوانی پیدا کرده است و تولید انرژی برق با بهره برداری مستقیم از منابع انرژی تجدید پذیر نظیر باد، موج، خورشید به صورت فزاینده ای مطرح شده اند.

هدف از نگارش این رساله معرفی و شبیه سازی تجهیزات نیروگاه های موجی محفظه آب نوسانی (OWC) و بررسی اثر آن بر شبکه است. با توجه به رفتار نوسانی امواج معمولا در نیروگاه OWC از ژنراتور آسنکرون جهت تبدیل انرژی موج به انرژی الکتریکی استفاده می گردد و در صورتی که روتور با سرعتی بالاتر از سرعت سنکرون چرخش کند، ماشین در مد ژنراتوری قرار می گیرد و با اخذ توان راکتیو از شبکه، توان اکتیو به شبکه تحویل می دهد. در نیروگاه OWC توربین های مختلف با ساختارهای ویژه ای مورد استفاده قرار گرفته است ولی دو نوع مرسوم آنها توربین های ولز و ضربه ای نام دارد. در این پروژه سعی شده علاوه بر مدلسازی ژنراتور، توربین و محفظه OWC رفتار هر یک از توربین ها در محدوده کار مختلف مورد ارزیابی و مقایسه قرار گیرد و مزایا و معایب هر کدام به طور مجزا مورد مقایسه قرار گیرد. همچنین جهت بررسی اثر نوسانات توان خروجی نیروگاه بر شبکه، نیروگاه موجی به شبکه و بار محلی (KW) ۱۰۰ متصل و مطالعات حالت های پایدار و گذرا بر اساس آن ارائه گردیده است. در حالت پایدار مواردی نظیر تاثیر نیروگاه موجی در ولتاژ و توان شبکه و اثرات تغییر قدرت ورودی بر رفتار نیروگاه شبیه سازی و در حالت گذرا عملکرد راه اندازی مورد بررسی قرار گرفته است.

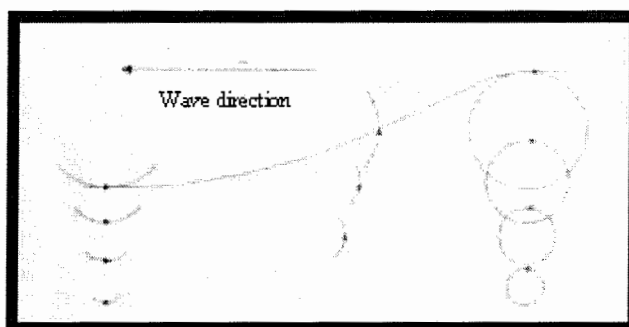
نوروز ماه مهری OWC توربینی ولز نوسانات توان دورگاز برر است انرژی موج

فصل اول

انواع نیروگاه های موجی

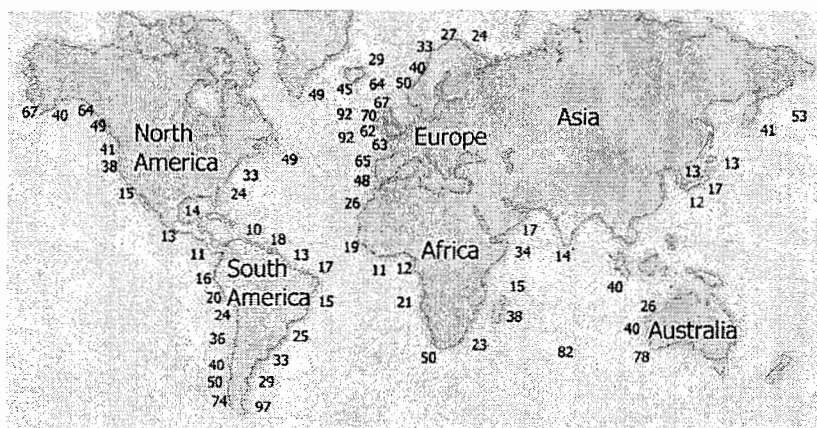
انرژی موج یکی از انواع انرژی های تجدید پذیر است که بطور غیر مستقیم انرژی خود را از طریق خورشید دریافت می کند. اولین امتیاز استخراج انرژی از موج به سال ۱۷۹۹ برمی گردد. طراحی و مهندسی مبدل های انرژی موج رسماً از سال ۱۹۷۳ (مصادف با ایجاد بحران نفت) آغاز گردید. کمبود نفت و همچنین آلودگی زیست محیطی ناشی از آن باعث تشدید سیاست صرفه جویی در مصرف انرژی و استفاده از انرژی های تجدیدپذیر گردید. در حقیقت موج انرژی خود را از طریق خورشید دریافت می کند. به این ترتیب که حرارت خورشید مناطق مختلف زمین را در دماهای گوناگون گرم می کند و این امر باعث وزش هوا از یک منطقه به منطقه دیگر می شود. (با توجه به اختلاف درجه حرارت). با وزش باد به سطح اقیانوس در آب یک حرکت چرخشی در مسیر دایره ای ایجاد شده و امواج بوجود می آیند (شکل ۱-۱). این حرکت چرخشی همراه با شیفت فاز تدریجی (حرکت تدریجی به سمت جلو) است. وقتی موج به ساحل نزدیک می شود (بر اثر کاهش عمق) موج با بستر دریا اصطکاک پیدا می کند و طول موج کاهش و ارتفاع آن افزایش پیدا می کند سرانجام شیب موج آنقدر زیاد می شود که ناپایدار می گردد و قسمت عقب موج به طرف جلو می لغزد و قله فرو می ریزد و بر اثر نیروی گرانشی زمین دوباره به عقب برمی گردد .

توان متوسط سالیانه قابل بهره برداری در امواج آب های سراسر جهان در حدود 10^{12} وات تخمین زده شده است. توان موج متناسب با پریود موج و مجذور دامنه است و بر حسب کیلو وات بر متر قله موج قابل بیان است. جهت و انرژی موج توسط انتخاب طیف موج مناسب قابل تشخیص و محاسبه است. در شکل ۱-۲ توزیع انرژی امواج در نقاط مختلف جهان ارائه شده است [۱].



شکل ۱-۱ تاثیر باد بر ذرات آب در سطح دریا

در آب های کشور ما ایران نیز متوسط انرژی سالیانه امواج حدود 3.6 KW/m قله موج می باشد [۲] که این مقدار با توجه به نمودار شکل ۱-۲، در مقایسه با متوسط انرژی در مناطق مختلف جهان کمتر می باشد ولی این مقدار نسبی کم، به عنوان یک منبع پایان ناپذیر مطرح و قابل استفاده می باشد. با توجه به اطلاعات ارائه شده در مرجع [۲]، دریای عمان دارای پتانسیل مساعدی به لحاظ انرژی موج در ایران است. در سواحل دریای عمان، چابهار مناسب ترین محل برای مطالعه انرژی امواج شناخته شده است.



شکل ۱-۲ توزیع انرژی کلی امواج آب های آزاد جهان بر حسب kw/m قله موج

۱-۱ برداشت انرژی موج

در صورتی که یک سازه در سطح آب رها گردد انرژی اولیه موجود در آن باعث تولید موج می گردد. در این صورت معادله حرکت سازه طبق رابطه (۱-۱) خواهد بود.

$$I \ddot{X} + D \dot{X} + BX = F_R \quad (1-1)$$

مطابق با رابطه مذکور سه نیرو بر سیال اثر می گذارد که عبارت اند از: کشش (D)، اینرسی (I)، خاصیت شناوری سازه (B) که حاصل آن ایجاد نیروی تشعشی (F_R) و در نهایت تولید موج است [۳]. معادله حرکت برای یک جسم که در معرض یک موج سینوسی متقارن قرار گرفته به صورت زیر است:

$$I \ddot{X} + D \dot{X} + BX = F_R + F_E \quad (2-1)$$

که در آن F_E نیروی اعمالی توسط موج بر روی جسم ساکن و ثابت اعمال می با شد. (نیروی تحریک) نیروی تشعشی را بر حسب جرم (M_a) و میرایی (c) می توان به صورت زیر بیان کرد:

$$-F_R = Ma(\omega) \ddot{X} + C(\omega) \dot{X} \quad (3-1) \quad \omega = \text{فرکانس } \left(\frac{r}{s}\right)$$

بیان فیزیکی جرم (M_a)، جرمی از آب است که بر مبدل نیرو وارد می کند و باعث ایجاد شتاب در جسم میگردد و اصطلاحاً جرم اضافه شده نامیده می شود. با جایگزاری (۳) در (۲) داریم:

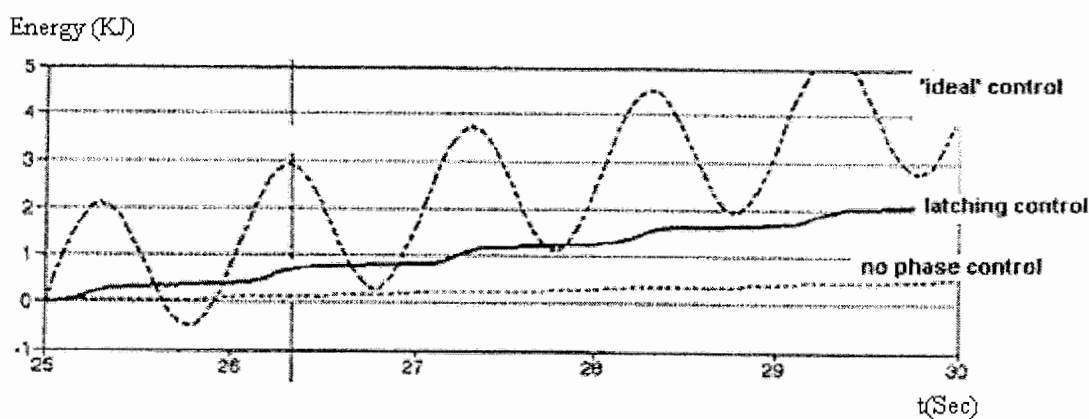
$$(I + M_a(\omega)) \ddot{X} + (D + c(\omega)) \dot{X} + BX = F_E \quad (4-1)$$

که در آن فرکانس رزونانس رابطه فوق به صورت زیر بیان می گردد:

$$f_0 = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{B}{I + M_a(\omega)}} \quad (5-1)$$

در صورتی که فرکانس موج با فرکانس طبیعی جسم برابر شود حداکثر انرژی از موج دریافت می گردد. بنابر این در هنگام بهره برداری سعی می شود که مبدل در فرکانس رزونانس عمل کند. از طرفی با توجه به اینکه امواج دارای فرکانس مختلفی هستند برای اخذ توان ماکزیمم فرکانس رزونانس سیستم باید در نقاط کار مختلف اصلاح شود. با اعمال راهکارهای خاصی می توان سازه را به طور پیوسته در حالت رزونانس قرار داد. به عنوان مثال ایجاد تغییرات مناسب در خاصیت شناوری تجهیزات (B) باعث اصلاح فرکانس رزونانس مبدل می گردد. به طور کلی روش های گوناگونی جهت کنترل مبدل موج پیشنهاد شده است.

در شکل (۴-۱) انرژی جذب شده توسط مبدل اولیه (سازه) بر حسب زمان برای سه روش کنترلی ترسیم شده است. در پایین ترین منحنی هیچ گونه کنترلی بر روی تجهیزات در نظر گرفته نشده است. منحنی میانی رفتار مبدل را با اعمال کنترل ضامن دار کردن (latching control) و منحنی بالا رفتار مبدل را هنگام پیاده سازی کنترل مزدوج مختلط (complex conjugate control) نشان می دهد. نوسان ایجاد شده در جذب توان موج در این منحنی نشان دهنده آن است که در این روش در بخشی از سیکل انرژی به دریا بازگردانده شده است. طبق محاسبات انجام گرفته (برای این نمونه) مقدار متوسط انرژی جذب شده توسط کنترل پیوسته بیشتر از ۲ برابر نوع گسسته و تقریباً ۱۰ برابر حالت بدون کنترل است [۴].



شکل ۴-۱ مقایسه انواع روش های کنترلی

۲-۱ انواع نیروگاه های موجی

نیروگاه های موجی به چند دسته مختلف طبقه بندی می شوند که در زیر به چند دسته اصلی آنها اشاره شده است:

۱) نیروگاه های ساحلی (on shore)

نیروگاه های ساحلی معمولاً در مناطق کم عمق آب تاسیس می گردند و معمولاً در کف دریاها بنا می شوند و یا دیواره آن بر سینه صخره ها نصب می گردند. مزیت اصلی این نیروگاه ها سادگی تاسیسات، هزینه تعمیر و نگهداری کم و عدم نیاز به کابل های طویل جهت اتصال به شبکه است. ولی نصب تجهیزات نیروگاه های ساحلی (on shore) نیاز به بستر مناسب در کنار ساحل خواهد داشت و ممکن است محل مناسب، کمتر در دسترس باشد.

۲) نیروگاه های نزدیک ساحل (near shore)

همان طور که گفته شد نصب تجهیزات ساحلی (On shore) نیاز به بستر مناسب خواهد داشت و این نیاز باعث ایجاد محدودیت در تاسیس نیروگاه موجی می گردد. یکی از روش های غلبه بر این محدودیت استفاده از مبدل های نزدیک ساحل (near shore) است. این نیروگاه ها چند کیلو متر دور تر از ساحل و در عمق ۲۰ تا ۵۰ متری نصب می گردد.

۳) نیروگاه های دور از ساحل (off shore)

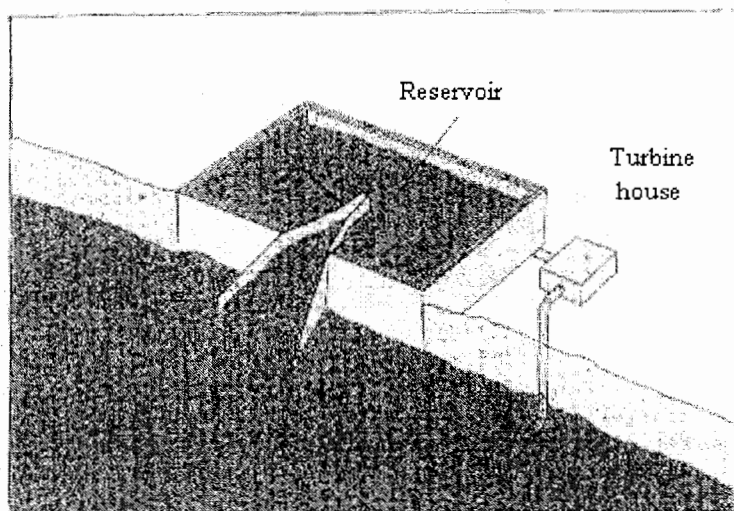
این تجهیزات در مناطق عمیق آب قرار می گیرند و در آب شناور هستند و انرژی قابل توجهی از موج دریافت می کنند. در مناطق عمیق، طوفان های ایجاد شده دارای توان بسیار زیادی هستند (به طور نمونه ۱ MW/m) و تهدید جدی برای تجهیزات دور از ساحل (off shore) محسوب می گردند بنابراین طراحی و نصب مهارکننده ها برای این تجهیزات نسبت به انواع دیگر هزینه بیشتری را طلب می کند [۵].

در سالهای اخیر نیروگاه های موجی با ساختارهای متفاوت مورد آزمایش و بهره برداری قرار گرفته است. در ادامه این فصل ساختار تعدادی از این نیروگاه ها که بیشتر مورد توجه قرار گرفته اند معرفی شده است. برای اطلاعات بیشتر و آشنایی با نیروگاه های موجی می توان به مرجع ۸ مراجعه کرد.

۱-۲-۱ نیروگاه های ساحلی

۱-۱-۲-۱ نیروگاه کانال مخروطی (tapchan)

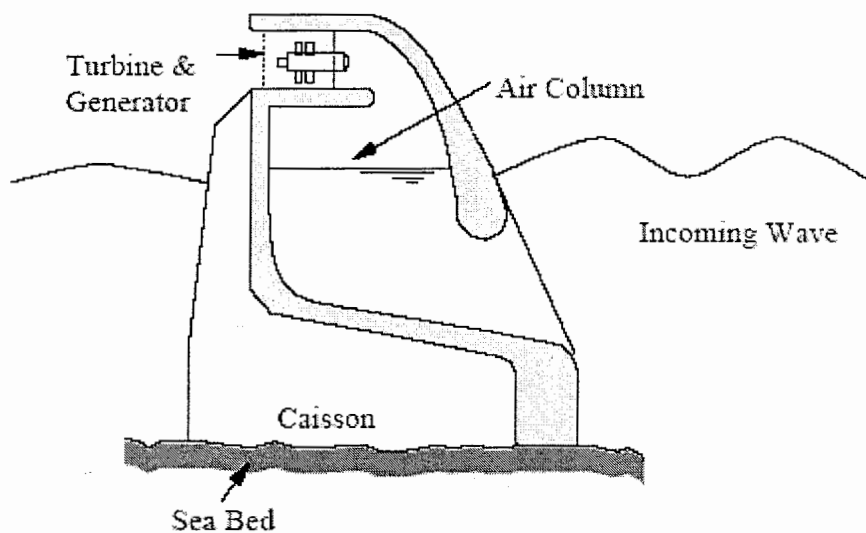
یکی از انواع نیروگاه های ساحلی مبدل کانال مخروطی (tapchan) نام دارد. ساختار کلی این مبدل در شکل (۵-۱) نشان داده شده است. این مبدل شامل یک کانال طویل با دهانه ورودی عریض و دهانه خروجی باریک می باشد. در هنگام ایجاد موج، آب وارد کانال شده و متناسب با عرض دهانه ارتفاع آب نیز افزایش پیدا می کند و در نهایت آب دریا در یک استخر که در چند متری از سطح دریا واقع شده ذخیره می گردد. در این نیروگاه، معمولا از یک توربین کاپلان استفاده می شود که در زیر استخر نصب می گردد. در هنگام باز شدن دریچه استخر آب داخل آن به سمت توربین هدایت شده و ژنراتور متصل به آن به گردش درمی آید. نمونه اولیه این نیروگاه در کشور نروژ با توان 350 kW مورد آزمایش قرار گرفته است. دهانه ورودی کانال این نیروگاه حدود 40 متر و ارتفاع دیواره آن 10 متر (7 تا 3 متر) و طول کانال 170 متر است که در سال 1985 به بهره برداری رسید. همچنین در سالهای اخیر نوع دیگری از این نیروگاه با توان $1/1\text{ MW}$ ، عرض دهانه ورودی و خروجی به ترتیب 7 متر و 25 سانتی متر، و طول کانال 60 متر با ارتفاع دیواره 7 متر در سواحل اندونزی به بهره برداری رسیده است [۵].



شکل ۵-۱ ساختار کلی نیروگاه کانال مخروطی

۲-۱-۲-۱ نیروگاه محفظه آب نوسانی (Oscillating Water column)

مبدل OWC یکی دیگر از انواع نیروگاه های ساحلی است. اساس کار این نیروگاه دریافت قدرت از انرژی موج و استفاده از آن در جهت به حرکت درآوردن توربین است. نیروگاه های موجی دارای یک مخزن آب به نام OWC هستند. زمانی که دریا موج می شود سطح آب منبع بالا می رود. با افزایش سطح آب منبع OWC هوای موجود در بالای منبع فشرده می شود و به صورت عمودی به سمت توربین هدایت می شود و توربین را به حرکت در می آورد. همان طور که از شکل ۶-۱ مشاهده می شود دهانه ورودی این نیروگاه شامل یک موج شکن است که از ورود مستقیم موج به داخل محفظه جلوگیری می کند بنابراین با ایجاد موج و برگشت آن، سطح آب در داخل محفظه به طور یکنواخت افزایش یا کاهش پیدا می کند. با تغییر سطح آب، هوا به سمت توربین هدایت شده و توربین به حرکت در می آید با چرخش توربین، ژنراتوری که به توربین متصل شده است به گردش در می آید و توان به شبکه تحویل داده می شود [۶]. اولین نمونه نیروگاه OWC در سال ۱۹۹۱ در سواحل اسکاتلند با توان (KW) ۷۵ مورد آزمایش قرار گرفت.



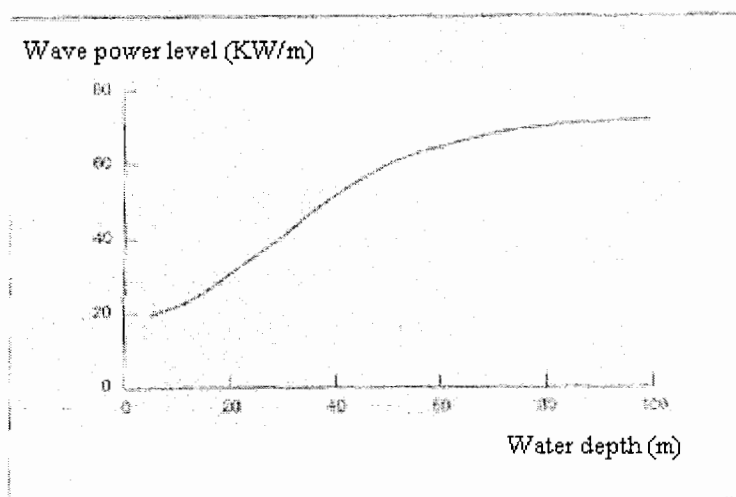
شکل ۶-۱ ساختار نیروگاه موجی OWC

۱-۲-۲-۱ نیروگاه های نزدیک ساحلی (Near shore)

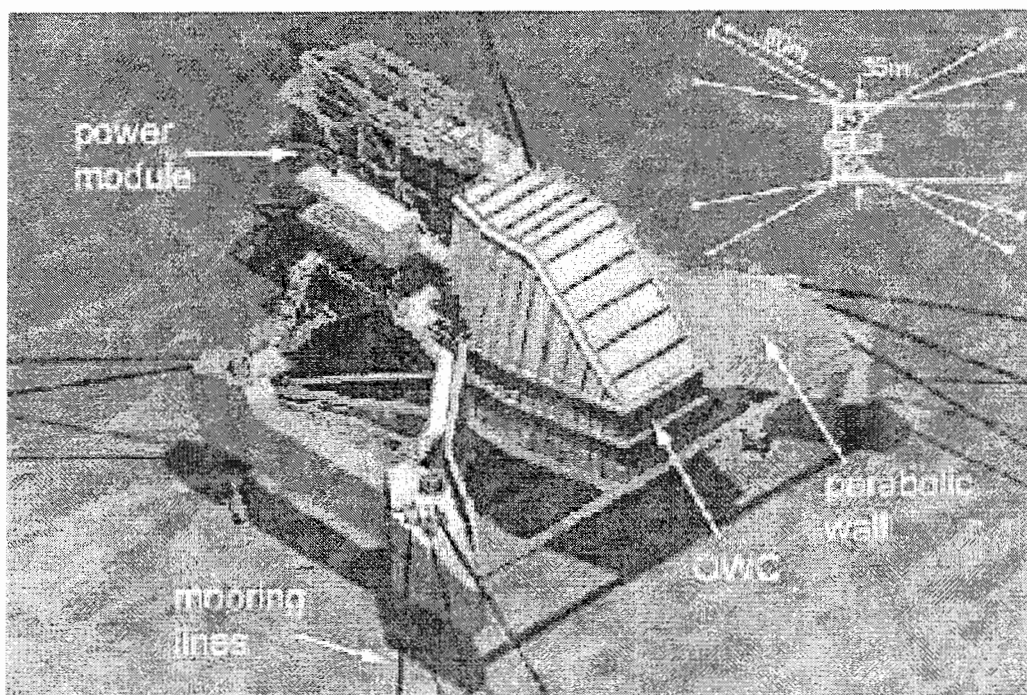
۱-۲-۲-۱-۱ نیروگاه موجی آب نوسانی توسعه یافته (Ospery)

در شکل (۷-۱) منحنی چگالی توان موج بر حسب عمق دریا مربوط به یکی از سواحل شمالی اسکاتلند نشان داده شده است. همان طور که دیده می شود توان موج (در یک محدوده مشخص) متناسب با عمق دریا افزایش پیدا می کند به همین دلیل استفاده از مبدل های نزدیک ساحلی یا دور از ساحلی باعث افزایش کارایی نیروگاه می گردد.

نیروگاه Ospery یکی از مبدل های نزدیک ساحلی است که ساختار آن در شکل (۸-۱) نشان داده شده است. عملکرد این نیروگاه مشابه نیروگاه OWC است با این تفاوت که مبدل Ospery در اعماق دریا تاسیس می گردد و تمامی تجهیزات از جمله محفظه OWC بر روی سطح آب قرار دارد و فقط توسط تعدادی میله مهارکننده به کف دریا متصل شده است. یکی از انواع نیروگاه Ospery در سال ۱۹۹۵ با توان ۲MW در عمق ۴۰ متری دریای اسکاتلند به بهره برداری رسید [۵].



شکل ۷-۱ منحنی چگالی توان موج بر حسب عمق دریا مربوط به یکی از سواحل شمالی اسکاتلند

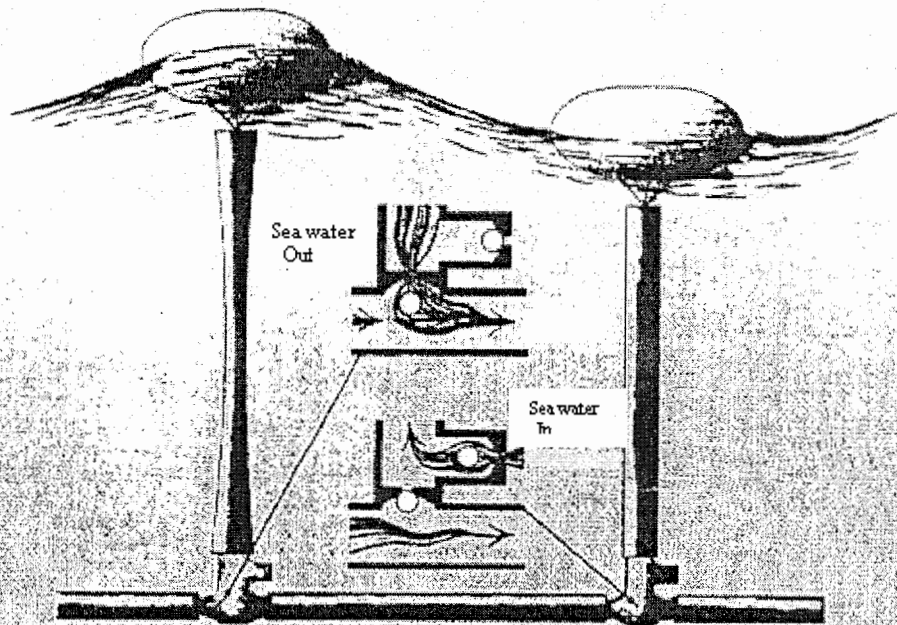
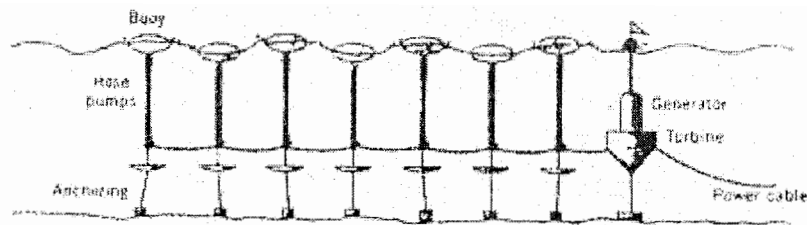


شکل ۸-۱ ساختار کلی نیروگاه Ospery

۱-۲-۲-۲ نیروگاه موجی پمپ خانه (house pump)

یکی دیگر از انواع نیروگاه های نزدیک ساحلی نیروگاه پمپ خانه (house pump) نام دارد که در شکل (۹-۱) نشان داده شده است. این نیروگاه شامل یک شناور می باشد که یک لوله لاستیکی الاستیسیته به آن متصل شده و انتهای لوله به یک شیر یک طرفه وصل است. در حالت نرمال، آب داخل مجرا ذخیره می شود و در هنگام ایجاد موج شناور به سمت بالا حرکت کرده و در نتیجه حجم لوله کاهش پیدا می کند و آب موجود در پمپ از طریق یک شیر یک طرفه و لوله رابط به سمت توربین هدایت می شود و در هنگام برگشت موج شیر یکطرفه بسته شده و دهانه دیگر شیر که وظیفه آن انتقال آب به داخل پمپ است باز می شود و آب به داخل پمپ هدایت می شود.

در عمل جهت افزایش توان و کاهش نوسانات معمولا از چند پمپ در کنار هم استفاده می شود [۷].



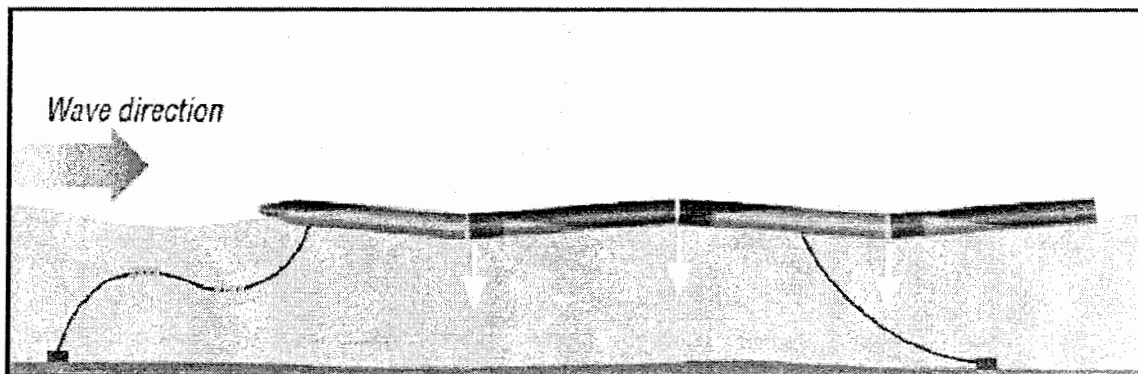
شکل ۹-۱ نمای کلی نیروگاه موجی پمپ خانه (house pump)

۱-۲-۳ نیروگاه های دور از ساحل (Off shore)

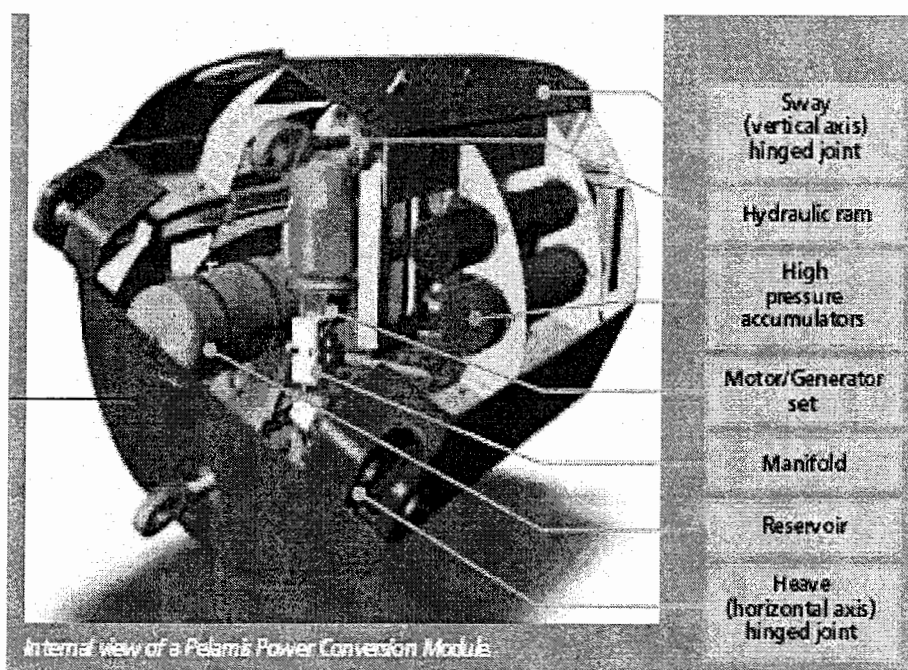
۱-۳-۲-۱ نیروگاه توان اقیانوسی (Ocean Power Delivery)

مبدل OPD نوعی مبدل مارگونه است که از طریق سیستم واسط هیدرولیکی انرژی موج را به انرژی الکتریکی تبدیل می کند این مبدل از چهار سیلندر مشابه و سه مفصل رابط تشکیل شده است. در داخل هر مفصل یک پمپ هیدرولیکی وجود دارد که ابتدا و انتهای آن به انتهای یک سیلندر و ابتدای سیلندر بعدی متصل شده است. با ایجاد موج، میان سیلندرهایی مذکور اختلاف زاویه ایجاد شده و روغن داخل پمپ با فشار بالا به سمت یک موتور هیدرولیکی هدایت می شود و چرخش موتور باعث راه اندازی ژنراتور القایی می گردد. یک نمونه از این نیروگاه به ظرفیت (kw) ۷۵۰ در جزیره اورکنی در کشور اسکاتلند بهره برداری گردید.

همان طور که گفته شد این مبدل دارای چهار سیلندر به طول (m) ۱۵۰ و سه مفصل است و هر مفصل خود شامل سه پمپ هیدرولیکی، یک موتور هیدرولیکی و دو ژنراتور (kw) ۱۲۵ است. در شکل زیر نمای کلی نیروگاه نشان داده شده است [۸].



شکل ۱-۱۰-۱ الف نمای کلی نیروگاه OPD



شکل ۱-۱۰-۱ ب نمایش تجهیزات داخلی مفصل

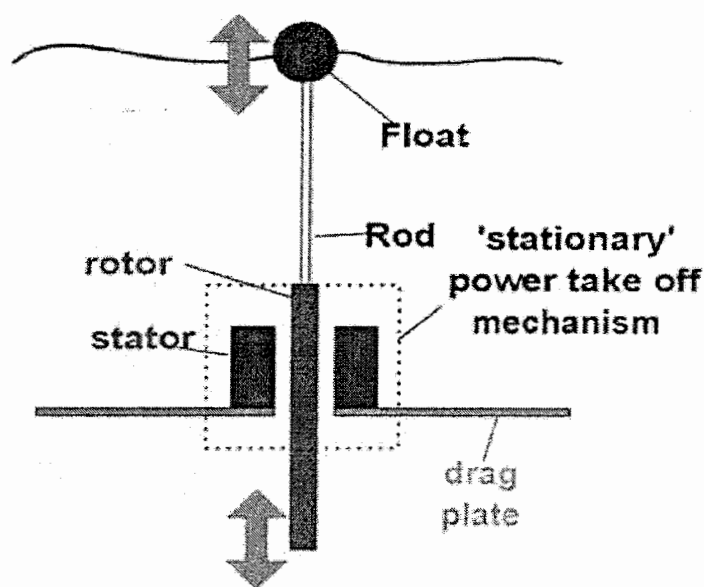
۲-۳-۲-۱ نیروگاه درایو مستقیم (Direct Drive Device)

یکی دیگر از انواع نیروگاه های موجی، نیروگاه درایو مستقیم است. نظریه درایو مستقیم اولین بار توسط باز و مارکوس در سال ۱۹۷۸ ارائه شد. در این نیروگاه ها از سیستم های واسط مکانیکی و هیدرولیکی

استفاده نمی گردد بنابراین دارای سیستم مکانیکی بسار ساده ای هستند و به صورت زیر قابل تقسیم بندی می باشند.

۱-۲-۳-۲-۱ نیروگاه شناور نوسانی (Heaving buoy)

این مبدل شامل یک جسم شناور (کروی یا استوانه ای) می باشد که رفتار آن تابع سطح آب است و در جهت عمودی نوسان می کند. این مبدل در شکل (۱-۱۱) نشان داده شده است.

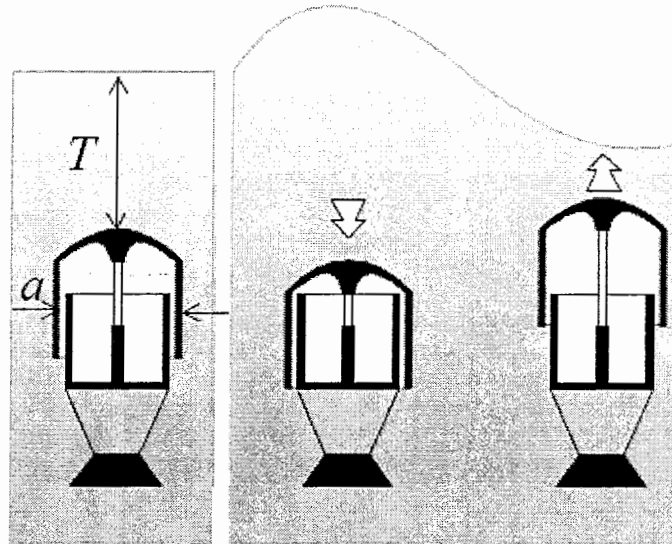


شکل ۱-۱۱ ساختار کلی مبدل Heaving buoy

ژنراتور نیروگاه های درایو مستقیم شامل یک ژنراتور خطی است و روتور آن مستقیماً به جسم شناور متصل شده است. با عبور و برگشت موج، روتور در داخل استاتور نوسان می کند و در نتیجه جریان در سیم پیچ های استاتور جاری شده و به شبکه انتقال می یابد. این ژنراتورها معمولاً در سرعت کمتر از 5 m/s عمل می کنند و معمولاً در ژنراتورهای درایو مستقیم از این ژنراتورها استفاده می شود و بنابراین از مدارات واسط مکانیکی و یا هیدرولیکی بی نیاز هستند.

۱-۱-۲-۳-۲-۱ نیروگاه ارشمیدسی (Archimedes Wave Swing)

در شکل (۱۲-۱) یک مبدل AWS نشان داده شده است. این مبدل متعلق به تجهیزات دور از ساحلی (off shore devices) بوده و در بستر دریا نصب می گردند.

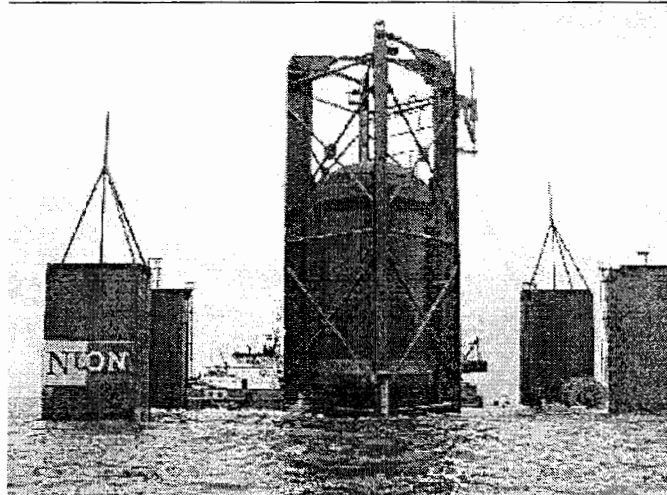


شکل ۱۲-۱ ساختار کلی مبدل AWS

این سیستم شامل یک محفظه هوایی است و می تواند به صورت افقی (متناسب با رفتار موج) نوسان کند. زمانی که در دریا موج ایجاد می گردد وزن موج، محفظه متحرک را به سمت پایین هدایت می کند و باعث متراکم شدن هوای داخل منبع می گردد. در هنگام برگشت موج توسط فشار هوا، شناور به وضعیت اولیه برمی گردد. ژنراتورهای مورد استفاده در این ساختار همانند طرح قبل ژنراتور خطی می باشد.

مشخصات اولین نیروگاه AWS که در سال ۲۰۰۳ به بهره برداری رسید به قرار زیر است [۹].

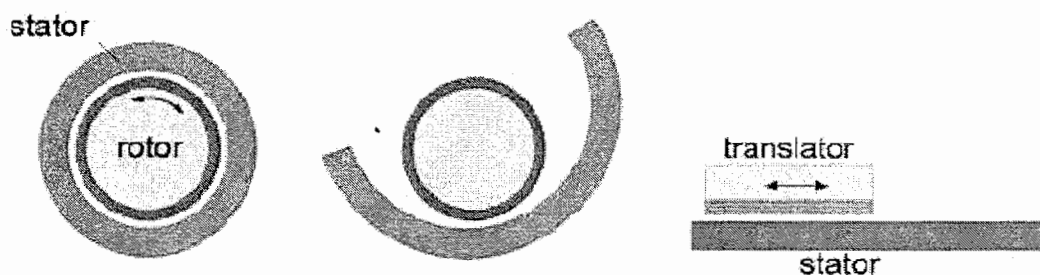
| | |
|-------------------------|------------------------------|
| توان متوسط (MW) ۱ | توان ماکزیمم تحویلی (MW) ۲ |
| ارتفاع نوسان مبدل (m) ۷ | قطر مبدل اولیه (m) ۹ |
| | سرعت خطی نامی مبدل (m/s) ۲/۲ |



شکل ۱-۱۳ نمایی از یک نیروگاه AWS نمونه

۱-۲-۳-۲-۲ ساختار الکتریکی نیروگاه درایو مستقیم

در نیروگاه های موجی معمولا از ژنراتورهای دوار القایی استفاده می شود ولی در نوع درایو مستقیم، ژنراتورهای خطی با ساختارهای ویژه بکار گرفته می شوند. ماشین های خطی دارای ساختار ساده ای هستند و در سرعت های پایین کار می کنند. تمام معادلات مربوط به ماشین های دوار در ماشین های خطی نیز صادق هستند و فقط بعضی از معادلات مانند گشتاور باید اصلاح گردد. شکل (۱-۱۴) ساختار ساده یک ماشین خطی را نشان می دهد.

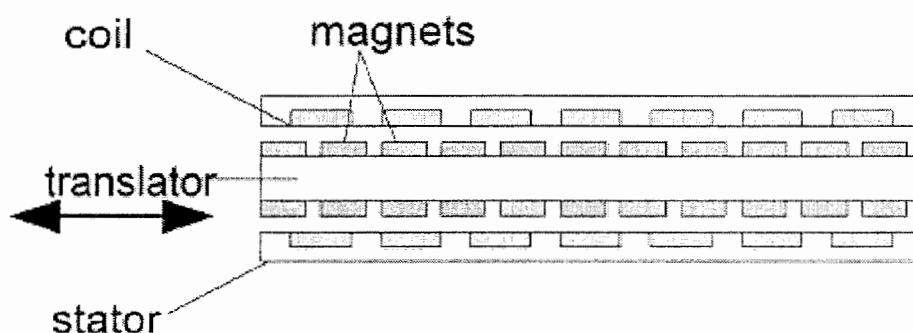


شکل ۱-۱۴ شکل نمادین ارتباط ماشین دورانی با ماشین خطی

در ماشین های خطی با اتصال جریان متناوب سه فاز به سیم پیچ استاتور، میدان مغناطیسی سنکرون در فاصله هوایی ایجاد می گردد و اگر توسط اعمال نیروی خارجی، سرعت روتور از سرعت سنکرون بیشتر گردد ماشین در مد ژنراتوری قرار خواهد گرفت. راکتانس سیم پیچ استاتور ماشین های خطی (به ویژه ماشین القایی) به علت بزرگ بودن فاصله هوایی، کوچک است و این امر راندمان کلی ماشین را کاهش می دهد. در ماشین های خطی روتور سیم پیچی شده علاوه بر تغذیه استاتور، روتور نیز به منبع

dc متصل می گردد. در این ماشین ها کنترل جریان تحریک نسبت به القایی ساده تر است و روش های کنترلی مختلفی برای آن ارائه شده است. ماشین های سنکرون خطی نسبت به نوع القایی مشابه معمولا در راندمان و ضریب قدرت بالاتر کار می کند. به طور نمونه راندمان و ضریب قدرت یک ماشین سنکرون خطی برابر ۰،۹ و ۰،۸ در صورتیکه راندمان و ضریب قدرت ماشین القایی خطی معادل، برابر ۰،۸۲ و ۰،۵۲ است.

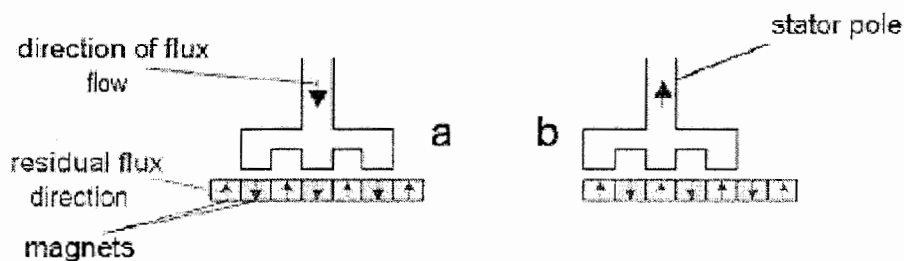
در ماشین های خطی مشابه نوع دورانی، لازم است که جریان از طریق جاروبک به روتور منتقل شود و این امر باعث افزایش هزینه تعمیر و نگهداری ماشین های سنکرون می گردد. بعلاوه حرکت دو طرفه در ماشین های خطی نیز بر فرسایش جاروبک ها می افزاید. در این نیروگاه ها معمولا از ماشین سنکرون مغناطیس دائم استفاده می شود. یک نمونه ساده ماشین سنکرون خطی مغناطیس دائم در شکل (۱-۱۵) نشان داده شده است. این ماشین شامل یک عنصر متحرک مغناطیس دائم و یک استاتور سیم پیچی شده است. با ایجاد حرکت روتور مغناطیس دائم در داخل استاتور، شار روتور توسط سیم پیچ های استاتور قطع می شود و در آن emf القاء می شود.



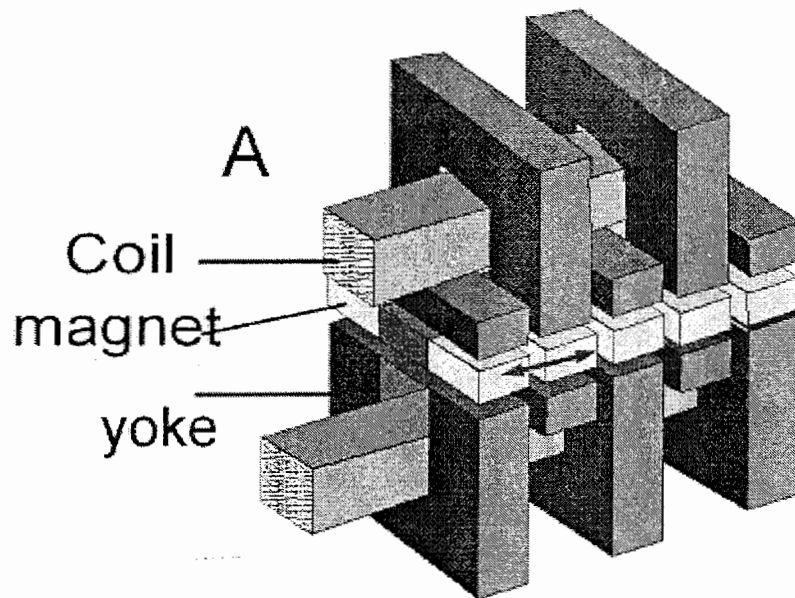
شکل ۱-۱۵ تصویر داخلی ماشین خطی مغناطیس دائم

در ماشین های خطی مرسوم حداکثر فشارتنشی قابل تحمل حدود $30-20 \frac{KN}{m^2}$ است. در صورتیکه از یک ژنراتور ۱۰۰(KW) با سرعت نامی $1 \frac{m}{Sec}$ استفاده گردد، نیرویی برابر ۱۰۰(KN) در فاصله هوایی ایجاد می گردد و در طراحی لازم است سطح فاصله هوایی $5 m^2$ در نظر گرفته شود. بنابراین در نیروگاه های موجی جهت افزایش فشار تنشی قابل تحمل و در نتیجه ایجاد امکان کاهش ابعاد فاصله هوایی، عموما تعداد قطب های ماشین را افزایش می دهند. در این صورت به آنها اصطلاحا ماشین های رلوکتانس متغیر می گویند.

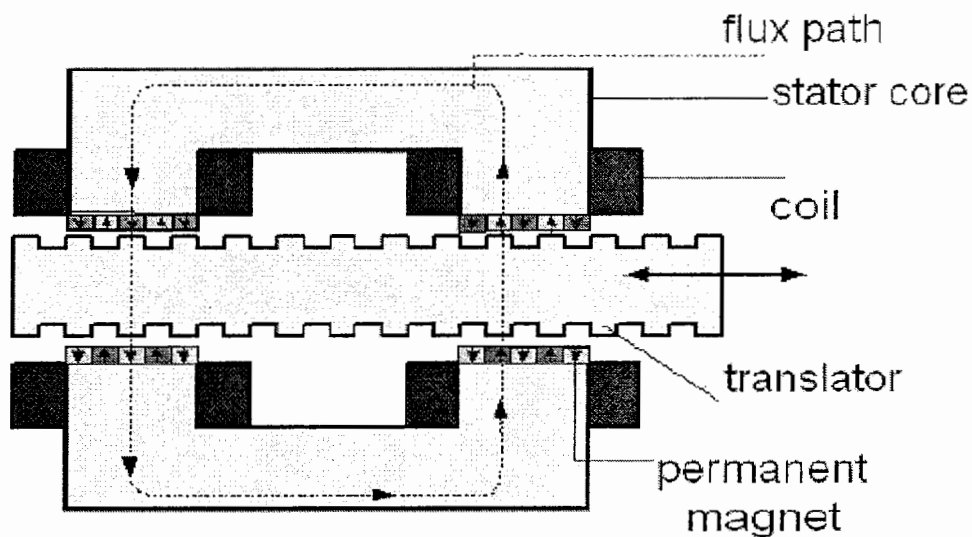
شکل (۱-۱۶) نحوه عملکرد یک ماشین رلوکتانس متغیر نمونه با استاتور سه شیاره نشان داده شده است. در طراحی این ماشین ها مقاومت مغناطیسی دندانه ها ناچیز و مقاومت مغناطیسی شیارها بی نهایت در نظر گرفته می شود بنابر این مسیر شار فقط از دندانه ها بسته می شود بنابراین با ایجاد یک حرکت ناچیز در روتور مسیر شار عوض می شود. یکی از انواع ماشین های رلوکتانس متغیر، ماشین شار عرضی (Transverse Flux Machine) است. در شکل (۱-۱۷) ساختار یک ماشین TFM نشان داده شده است. همانطور که گفته شد در این نوع ماشین ها از روتور مغناطیس دائم استفاده می شود. مسیر شار مغناطیسی تولید شده توسط روتور، از طریق هسته μ شکل بسته می شود و با حرکت روتور، در داخل سیم پیچ استاتور ولتاژ القا می گردد. در این ماشین ها معمولا جهت جلوگیری از کج شدن روتور، استاتورهای دابل نیز به کار گرفته می شود. یکی از معایب این ماشین ها آن است که عملکرد آن با لرزش همراه است و همچنین پیاده سازی و ساخت آنها ملاحظات فنی منحصر به فرد خود را می طلبد. یکی دیگر از انواع ماشین های رلوکتانس متغیر، ماشین مختلط ورنیه ای (Vernier Hybrid Machine) است. در شکل (۱-۱۸) نمای داخلی ماشین VHM نشان داده شده است.



شکل ۱-۱۶ تصویر داخلی ماشین رلوکتانس متغیر



شکل ۱۷-۱ شماتیک داخلی ماشین TFM



شکل ۱۸-۱ نمای داخلی ماشین های VHM

روتور ماشین های VHM از آهن ورقه ورقه و استاتور آن نیز از دو هسته π شکل تشکیل شده است و جهت تولید شار فاصله هوایی آهنربای مغناطیس دائم به کار برده می شود که بر روی استاتور نصب می گردد و جهت افزایش فشار تنشی می توان آهنربای یکپارچه را به چند آهنربای کوچکتر تقسیم کرد. روتور ماشین های VHM متشکل از آهن ورقه ورقه شده است و تعداد دندانه و شیار روتور متناسب با تعداد قطب های استاتور تعیین می گردد [۳].

فصل دوم

مدلسازی ماشین القایی

در نیروگاه های موجی به علت وجود نوسان در توان ورودی و نا مشخص بودن دامنه آن معمولا از ژنراتور القایی استفاده می شود. از مزایای ژنراتور القایی آن است که مستقیما به شبکه متصل می شود و وجود مبدل فرکانس ضروری نمی باشد [۱۰]. با اتصال ژنراتور القایی به شبکه و چرخش روتور با سرعتی بالا تر از سرعت سنکرون ماشین در مد ژنراتوری قرار می گیرد و با اخذ توان راکتیو از شبکه، توان اکتیو به شبکه تحویل می دهد. مزایای و معایب ژنراتور القایی نسبت به ژنراتور سنکرون عبارت اند از:

الف) مزایا:

- ۱- تعمیر و نگهداری ماشین القایی ساده است.
- ۲- هنگامی که ژنراتور القایی به شبکه وصل است ولتاژ و فرکانس آن ثابت بوده و نیازی به AVR و گاورنر نمی باشد.
- ۳- هنگامی که ژنراتور القایی به شبکه وصل است دارای حفاظت اتوماتیک می باشد، بدین ترتیب که یک اتصال کوتاه در خطوطی که ژنراتور القایی را به شبکه وصل می کند پیش بیاید تحریک خود به خود قطع شده و دیگر ماشین به صورت ژنراتوری عمل نمی کند.
- ۴- به ازای تغییرات وسیع سرعت قادر است توان مکانیکی را به الکتریکی تبدیل نماید.
- ۵- هنگام پارالل نمودن به شبکه به وسایل سنکرون کننده نیاز ندارد.

ب) معایب:

- ۱- راندمان ژنراتور القایی نسبتا کم است.
- ۲- به مقدار ۷۵-۵۰ درصد توان نامی خروجی، توان راکتیو از شبکه جذب می کند و این امر باعث کاهش ضریب قدرت شبکه می گردد.
- ۳- بدلیل نداشتن سیستم تحریک، تنظیم ولتاژ امکان پذیر نمی باشد.
- ۴- در صورتیکه ژنراتور القایی به صورت موتوری راه اندازی شود دارای جریان راه اندازی نسبتا بزرگی است [۱۱].

۱-۲ مدل ماشین القایی

می دانیم که معادلات حاکم بر ماشین القایی روابط غیر خطی متغیر با زمان است. جهت ساده سازی معادلات می توان آنها را به دستگاه های مرجع دلخواه انتقال داد. در ماشین القایی سه نوع دستگاه مرجع ساکن، روتور و سنکرون بکار گرفته می شود. با انتقال روابط به یکی از دستگاه های مرجع، معادلات غیر خطی متغیر با زمان، به روابط ساده تر تبدیل می گردد.

در روش پارک-بلوندر، برای تحلیل عملکرد ماشین اولین اقدام بعد از انتخاب دستگاه مرجع مورد نظر، انتقال روابط به محورهای dq یا دستگاه مرجع می باشد.

محورهای dq دو بردار فرضی عمود بر هم هستند که با سرعت دستگاه مرجع مورد نظر چرخش می کنند. معادلات حاکم بر ماشین القایی نشان داده شده در شکل (۱-۲) به صورت زیر خواهد بود.

معادلات ولتاژ استاتور:

$$\begin{aligned} v_{as} &= i_{as} \times r_s + \frac{\partial \lambda_{as}}{\partial t} \\ v_{bs} &= i_{bs} \times r_s + \frac{\partial \lambda_{bs}}{\partial t} \\ v_{cs} &= i_{cs} \times r_s + \frac{\partial \lambda_{cs}}{\partial t} \end{aligned} \quad (1-2)$$

معادلات ولتاژ رتور نیز مشابه استاتور قابل بیان است. در نمایش ماتریسی، شار دور روتور و استاتور بر حسب جریان و اندوکتانس سیم پیچی به صورت زیر نوشته می شود.

$$\begin{bmatrix} \lambda_s^{abc} \\ \lambda_r^{abc} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_{ss}^{abc} & L_{sr}^{abc} \\ L_{rs}^{abc} & L_{rr}^{abc} \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} i_s^{abc} \\ i_r^{abc} \end{bmatrix} \quad (2-2)$$

که

$$\begin{aligned} \lambda_s^{abc} &= (\lambda_{as}, \lambda_{bs}, \lambda_{cs})^t \\ \lambda_r^{abc} &= (\lambda_{ar}, \lambda_{br}, \lambda_{cr})^t \\ i_s^{abc} &= (i_{as}, i_{bs}, i_{cs})^t \\ i_r^{abc} &= (i_{ar}, i_{br}, i_{cr})^t \end{aligned} \quad (3-2)$$

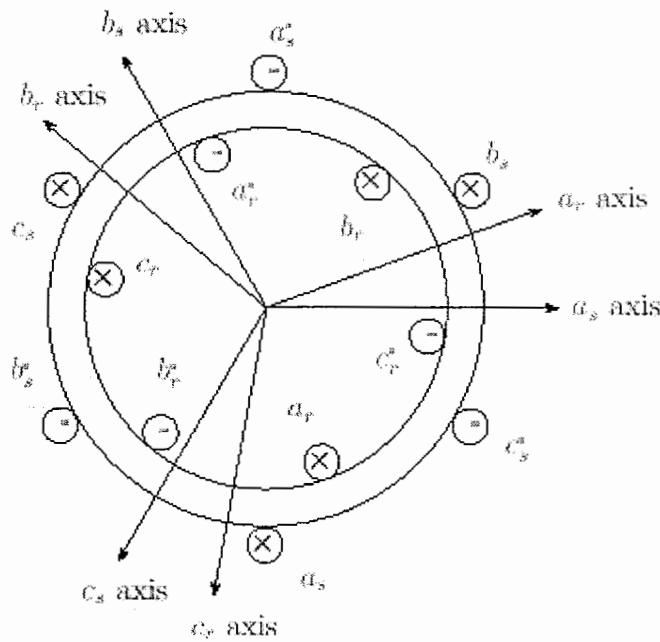
در روابط فوق بالا نویس t به معنی ترانهاده آرایه ها می باشد.

$$L_{ss}^{abc} = \begin{bmatrix} L_{ls} + L_{ss} & L_{sm} & L_{sm} \\ L_{sm} & L_{ss} + L_{ls} & L_{sm} \\ L_{sm} & L_{sm} & L_{ls} + L_{ss} \end{bmatrix} \quad L_{rr}^{abc} = \begin{bmatrix} L_{lr} + L_{rr} & L_{rm} & L_{rm} \\ L_{rm} & L_{rr} + L_{lr} & L_{rm} \\ L_{rm} & L_{rm} & L_{lr} + L_{rr} \end{bmatrix} \quad (4-2)$$

با توجه به اینکه هر دو اندوکتانس متقابل استاتور به روتور، و روتور به استاتور به زاویه روتور بستگی دارد داریم:

$$L_{sr}^{abc} = [L_{rs}^{abc}]^t = L_{sr} \begin{bmatrix} \cos \theta_r & \cos(\theta_r + \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta_r - \frac{2\pi}{3}) \\ \cos(\theta_r - \frac{2\pi}{3}) & \cos \theta_r & \cos(\theta_r + \frac{2\pi}{3}) \\ \cos(\theta_r + \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta_r - \frac{2\pi}{3}) & \cos \theta_r \end{bmatrix} \quad (5-2)$$

که در آن L_{ls} اندوکتانس پراکنده گی هر فاز سیم پیچ استاتور، L_{lr} اندوکتانس پراکنده گی هر فاز سیم پیچ روتور، L_{ss} اندوکتانس خودی سیم پیچ استاتور، L_{rr} اندوکتانس خودی سیم پیچ روتور، L_{sm} اندوکتانس متقابل سیم پیچ های استاتور، L_{rm} اندوکتانس متقابل سیم پیچ های روتور، L_{sr} اندوکتانس متقابل روتور و استاتور می باشد.



شکل ۱-۲ نمای الکتریکی ماشین القایی سه فاز

برای تبدیل پارامترهای استاتور به دستگاه مرجع اختیاری داریم:

$$f_{qdos} = k_s \times f_{abcs} \quad (6-2)$$

در رابطه (6-2) متغیر f می تواند ولتاژ، جریان یا شار دور ماشین باشد و k_s به صورت زیر تعریف می گردد:

$$k_s = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} \cos \theta & \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta + \frac{2\pi}{3}) \\ \sin \theta & \sin(\theta - \frac{2\pi}{3}) & \sin(\theta + \frac{2\pi}{3}) \\ \frac{1}{2} & \frac{1}{2} & \frac{1}{2} \end{bmatrix} \quad (7-2)$$

$$\theta(t) = \int_0^t \omega(t) dt + \theta(0) \quad (8-2)$$

و $\theta(t)$ زاویه بین محور سیم پیچ a استاتور ماشین و محور q از مدل مرجع که با سرعت $\omega(t)$ چرخش می کند. بطور نمونه اگر دستگاه مرجع، قاب سنکرون در نظر گرفته شود $\omega = \omega_e$ و اگر دستگاه مرجع ساکن انتخاب گردد ω برابر صفر جایگزین می گردد و زاویه $\theta(0)$ مقدار اولیه آن در زمان شروع t می باشد و برای سادگی محاسبات می توان آنها را صفر در نظر گرفت. جهت تبدیل متغیرهای qdo به پارامترهای استاتور از تبدیل زیر بکار می رود:

$$f_{abcs} = k_s^{-1} \times f_{qdos} \quad (9-2)$$

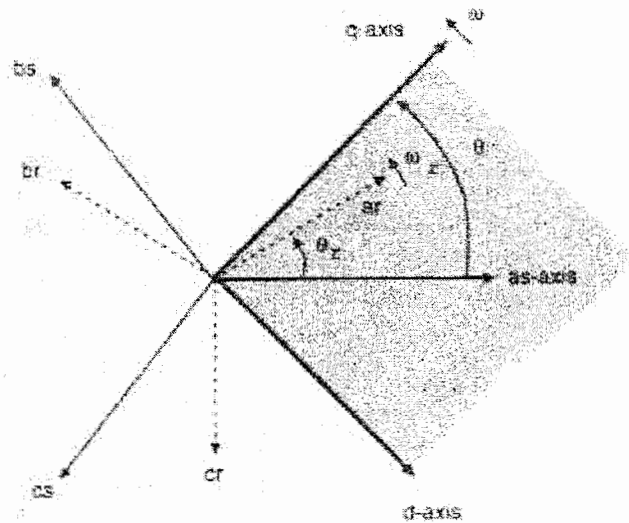
بطوریکه:

$$k_s^{-1} = \begin{bmatrix} \cos \theta & \sin \theta & 1 \\ \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) & \sin(\theta - \frac{2\pi}{3}) & 1 \\ \cos(\theta + \frac{2\pi}{3}) & \sin(\theta + \frac{2\pi}{3}) & 1 \end{bmatrix} \quad (10-2)$$

برای تبدیل پارامترهای روتور به دستگاه مرجع اختیاری از روابط زیر استفاده می گردد.

$$f_{qdor} = k_r \times f_{abcr} \quad (11-2)$$

در شکل می توان مشاهده کرد که زاویه تبدیل برای مقادیر روتور $(\theta - \theta_r)$ است.



شکل ۲-۲ محورهای سیم پیچی abc و qd

در رابطه (۱۱-۲) متغیر f می تواند ولتاژ، جریان یا شار دور ماشین باشد و k_r به صورت زیر تعریف می گردد:

$$k_r = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} \cos(\theta - \theta_r) & \cos(\theta - \theta_r - \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta - \theta_r + \frac{2\pi}{3}) \\ \sin(\theta - \theta_r) & \sin(\theta - \theta_r - \frac{2\pi}{3}) & \sin(\theta - \theta_r + \frac{2\pi}{3}) \\ \frac{1}{2} & \frac{1}{2} & \frac{1}{2} \end{bmatrix} \quad (۱۲-۲)$$

$$\theta(t) = \int_0^t \omega(t) dt + \theta(0) \quad \theta_r(t) = \int_0^t \omega_r(t) dt + \theta_r(0) \quad (۱۳-۲)$$

و $\theta(t) - \theta_r(t)$ زاویه بین محور a از سیم پیچ روتور ماشین و محور q از مدل مرجع که با سرعت $\omega(t)$ چرخش می کند. به طور نمونه اگر دستگاه مرجع، قاب سنکرون در نظر گرفته شود $\omega = \omega_e$ و اگر دستگاه مرجع ساکن انتخاب گردد ω برابر صفر جایگزین می گردد. زوایای $\theta(0)$ و $\theta_r(0)$ مقادیر اولیه این زاویه ها در زمان شروع $t = 0$ می باشد و در خیلی از موارد برای سادگی محاسبات می توان آنها را صفر در نظر گرفت. جهت تبدیل متغیرهای odq به پارامترهای روتور از تبدیل زیر استفاده می کنیم.

$$f_{abc} = k_r^{-1} \times f_{qd} \quad (۱۴-۲)$$

$$k_r^{-1} = \begin{bmatrix} \cos(\theta - \theta_r) & \sin(\theta - \theta_r) & 1 \\ \cos(\theta - \theta_r - \frac{2\pi}{3}) & \sin(\theta - \theta_r - \frac{2\pi}{3}) & 1 \\ \cos(\theta - \theta_r + \frac{2\pi}{3}) & \sin(\theta - \theta_r + \frac{2\pi}{3}) & 1 \end{bmatrix} \quad (15-2)$$

همانطور که گفته شد برای تبدیل پارامترهای استاتور به دستگاه مرجع اختیاری روابط فوق به صورت زیر اصلاح می گردد.

$$f_{qdos} = k_s \times f_{abcs} \quad (16-2)$$

که در آن k_s مشابه k_r قابل بیان است ولی با این تفاوت که عدد صفر جایگزین θ_r می گردد [۱۲].

۱-۱-۲ معادلات ولتاژ و گشتاور در قاب dqo

برای مدلسازی ماشین القایی ابتدا با استفاده از روابط تبدیل، ولتاژهای فاز استاتور به مدل مرجع dqo دلخواه انتقال می یابد. یعنی:

$$v_{qs} = \frac{2}{3} [v_{as} \cos \theta + v_{bs} \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) + v_{cs} \cos(\theta + \frac{2\pi}{3})]$$

$$v_{ds} = \frac{2}{3} [v_{as} \sin \theta + v_{bs} \sin(\theta - \frac{2\pi}{3}) + v_{cs} \sin(\theta + \frac{2\pi}{3})]$$

$$v_{os} = \frac{1}{3} (v_{as} + v_{bs} + v_{cs}) \quad (17-2)$$

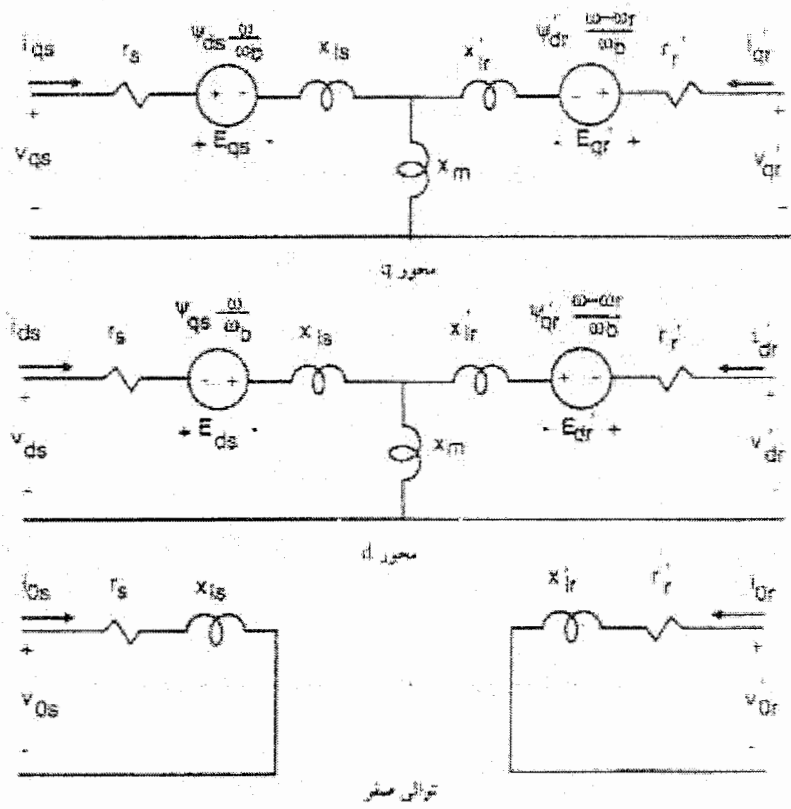
روابط ولتاژ روتور نیز در همان دستگاه مرجع می شود:

$$v'_{qr} = \frac{2}{3} [v'_{ar} \cos(\theta - \theta_r) + v'_{br} \cos(\theta - \theta_r - \frac{2\pi}{3}) + v'_{cr} \cos(\theta - \theta_r + \frac{2\pi}{3})]$$

$$v'_{dr} = \frac{2}{3} [v'_{ar} \sin(\theta - \theta_r) + v'_{br} \sin(\theta - \theta_r - \frac{2\pi}{3}) + v'_{cr} \sin(\theta - \theta_r + \frac{2\pi}{3})]$$

$$v'_{or} = \frac{1}{3} (v'_{ar} + v'_{br} + v'_{cr}) \quad (18-2)$$

بعد از محاسبه ولتاژهای qd روتور و استاتور، با استفاده از مدار معادل ماشین القایی شار دور ماشین و در نهایت جریان های qd متناظر با آن ها بدست می آید. مدار معادل ماشین القایی به صورت شکل زیر قابل ترسیم است.



شکل ۲-۳ مدار معادل qd ماشین القایی

معادله KVL طرف اولیه مدار معادل q را می توان به صورت زیر نوشت:

$$v_{qs} = r_s \times i_{qs} + \frac{\omega}{\omega_b} \psi_{ds} + \frac{1}{\omega_b} \frac{d}{dt} \psi_{qs} \quad (19-2)$$

که در آن $\omega_b = 2\pi f$ رادیان الکتریکی بر ثانیه و f فرکانس نامی بر حسب هرتز می باشد.

و

$$\psi_{qs} = X_{ls} i_{qs} + \psi_{mq} \quad \psi_{mq} = X_m (i_{qs} + i'_{qr}) \quad (20-2)$$

بنابراین

$$i_{qs} = \frac{\psi_{qs} - \psi_{mq}}{X_{ls}} \quad (21-2)$$

با جایگزینی رابطه (۲۱-۲) در (۱۹-۲) خواهیم داشت:

$$v_{qs} = r_s \frac{\psi_{qs} - \psi_{mq}}{X_{ls}} + \frac{\omega}{\omega_b} \psi_{ds} + \frac{1}{\omega_b} \frac{d}{dt} \psi_{qs} \quad (22-2)$$

و در نهایت ψ_{qs} به صورت زیر تعریف می گردد.

$$\psi_{qs} = \omega_b \int \left([v_{qs} + \frac{r_s}{X_{ls}} (\psi_{mq} - \psi_{qs})] - \frac{\omega}{\omega_b} \psi_{ds} \right) dt \quad (23-2)$$

و به طریق مشابه داریم:

$$\psi_{qr}' = \omega_b \int \left(v_{qr}' + r_r' \frac{\psi_{mq} - \psi_{qr}'}{X_{lr}'} + \frac{\omega_r - \omega}{\omega_b} \psi_{dr}' \right) dt \quad (24-2)$$

$$\psi_{ds} = \omega_b \int v_{ds} + \frac{r_s}{X_{ls}} (\psi_{md} - \psi_{ds}) + \frac{\omega}{\omega_b} \psi_{qs} \quad (25-2)$$

$$\psi_{dr}' = \omega_b \int v_{dr}' + r_r' \frac{\psi_{md} - \psi_{dr}'}{X_{dr}'} + \frac{\omega - \omega_r}{\omega_b} \psi_{qr}' \quad (26-2)$$

$$\psi_{mq} = X_m (i_{qs} + i_{qr})$$

$$\psi_{md} = X_m (i_{ds} + i_{qr}) \quad (27-2)$$

$$\psi_{qr} = X_{lr}' i_{qr}' + \psi_{mq} \quad (28-2) \quad i_{qr}' = \frac{\psi_{qr} - \psi_{mq}}{X_{lr}'} \quad (29-2)$$

$$\psi_{ds} = X_{ls} i_{ds} + \psi_{md} \quad (30-2) \quad i_{ds} = \frac{\psi_{ds} - \psi_{md}}{X_{ls}} \quad (31-2)$$

$$\psi_{dr}' = X_{lr}' i_{dr}' + \psi_{md} \quad (32-2)$$

$$i_{dr}' = \frac{\psi_{dr}' - \psi_{md}}{X_{lr}'} \quad (33-2)$$

حال شار دورهای متقابل را بر حسب شار دورهای روتور و استاتور بیان می کنیم. با جایگزینی رابطه (29-2) و (21-2) در (27-2) خواهیم داشت:

$$\psi_{mq} = X_m \left(\frac{\psi_{qs} - \psi_{mq}}{X_{ls}} + \frac{\psi_{ds} - \psi_{mq}}{X_{lr}'} \right) \quad (34-2)$$

$$\Rightarrow X_m \left(\frac{1}{X_m} + \frac{1}{X_{ls}} + \frac{1}{X_{lr}'} \right) \psi_{mq} = X_m \left(\frac{\psi_{qs}}{X_{ls}} + \frac{\psi_{ds}}{X_{lr}'} \right)$$

با تعریف یک متغیر جدید به صورت زیر داریم:

$$\frac{1}{X_M} = \frac{1}{X_m} + \frac{1}{X_{ls}} + \frac{1}{X_{lr}'}$$

در نتیجه:

$$\psi_{mq} = X_M \left(\frac{\psi_{qs}}{X_{ls}} + \frac{\psi'_{qr}}{X'_{lr}} \right) \quad (35-2)$$

به طریق مشابه داریم:

$$\psi_{md} = X_M \left(\frac{\psi_{ds}}{X_{ls}} + \frac{\psi'_{dr}}{X'_{lr}} \right) \quad (36-2)$$

رابطه گشتاور ماشین به صورت زیر نوشته می شود:

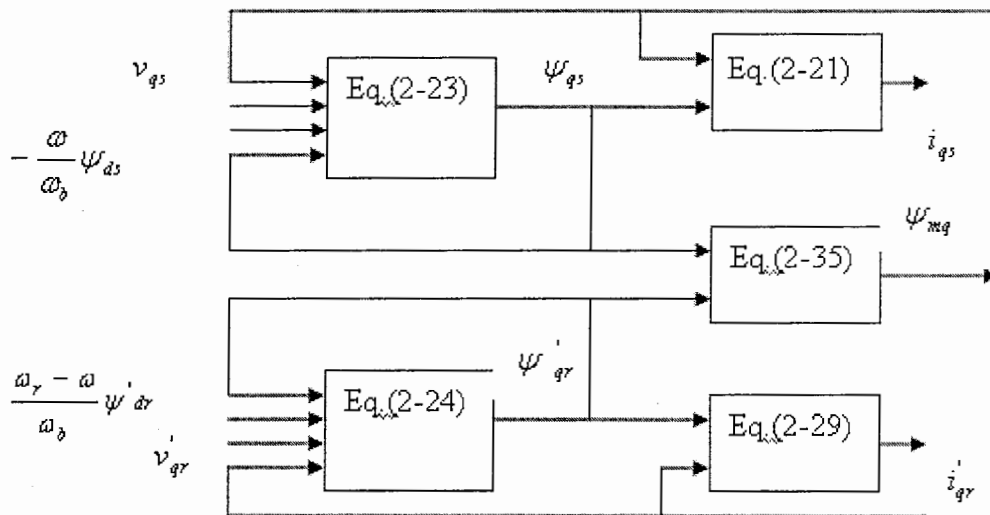
$$T_{em} = \frac{3}{2} \frac{p}{2\omega_b} (\psi_{ds} i_{qs} - \psi_{qs} i_{ds}) \quad (37-2)$$

معادله حرکت روتور نیز با مساوی قرار دادن گشتاور بار با مجموع گشتاور شتاب دهنده بدست می آید.

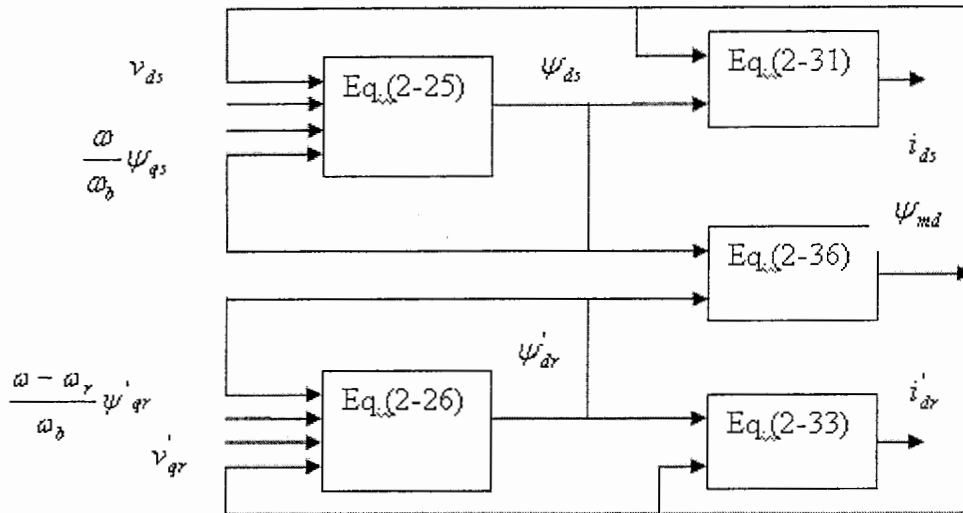
$$j \frac{d\omega_r}{dt} = T_{em} + T_{mech} \quad (38-2)$$

که در آن T_{mech} گشتاور مکانیکی اعمال شده خارجی در جهت چرخش روتور است و مقدار آن برای حالت موتوری منفی و برای حالت ژنراتوری مثبت است [۱۳].

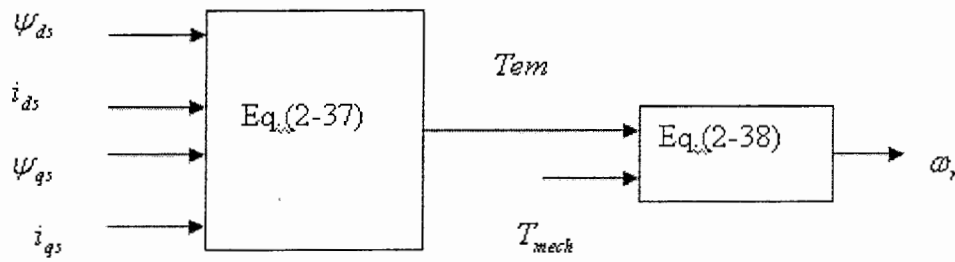
در شکل زیر فرایند شبیه سازی ماشین القایی نمایش داده شده است.



شکل ۲-۴-الف مدار محور q



شکل ۴-۲-ب مدار محور d



شکل ۴-۲-ج محاسبه گشتاور و سرعت

شکل ۴-۲ مدل‌سازی ژنراتور القایی در دستگاه مرجع دلخواه

۲-۲ شبیه سازی ژنراتور القایی

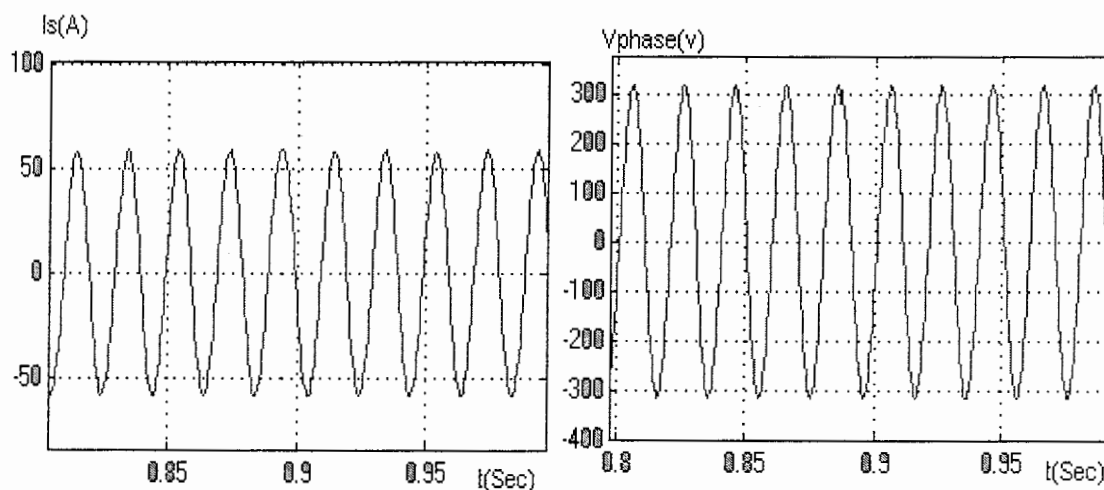
۱-۲-۲ نمونه نتایج شبیه سازی ژنراتور القایی

یک نمونه از نتایج شبیه سازی ژنراتور القایی در شکل های (۲-۵) تا (۲-۲۹) نشان داده شده است. جدول (۲-۱) پارامترهای اصلی ژنراتور بکارگرفته شده در شبیه سازی را نشان می دهد. همان طور که گفته شد با اتصال ماشین القایی به شبکه (شکل ۲-۵) و اعمال نیروی مکانیکی خارجی (شکل ۲-۷) به توربین ماشین توان راکتیو (شکل ۲-۹) از شبکه جذب می کند و توان اکتیو (شکل ۲-۱۰) به شبکه تحویل می دهد. در شکل های (۲-۱۱) و (۲-۱۲) سرعت و جریان روتور نشان داده شده است همان

طور از شکل (۲-۱۲) که دیده می شود روتور در حوالی سرعت سنکرون چرخش می کند به همین دلیل فرکانس جریان روتور برابر با فرکانس لغزش و بسیار کمتر از فرکانس استاتور است. با توجه به اینکه در این شبیه سازی مدار روتور بدون مقاومت خارجی اتصال کوتاه شده است ولتاژ محور d و محور q روتور صفر می باشد.

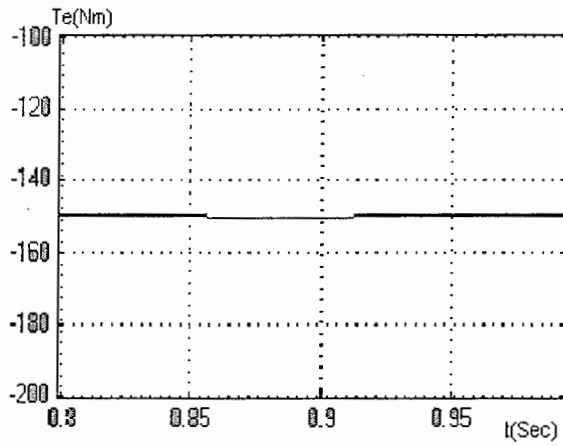
| Generator parameter | |
|---------------------|----------------------|
| P | 50(kw) |
| V | 380(v) |
| f | 50(HZ) |
| r_s | 0.087(Ω) |
| L_{ls} | 0.8e-3(Ω) |
| R_r | 0.1(Ω) |
| L_{lr} | 0.8e-3(Ω) |
| L_m | 34.7e-3(Ω) |
| p | 4 |
| J | 2(Kgm ²) |

جدول ۱-۲ پارامترهای ماشین بکار گرفته شده در شبیه سازی

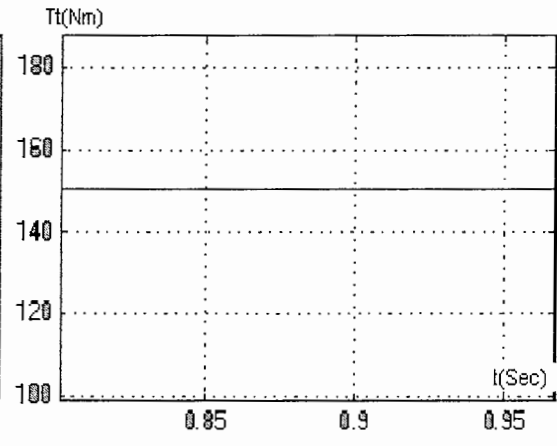


شکل ۲-۶ جریان استاتور بر حسب زمان

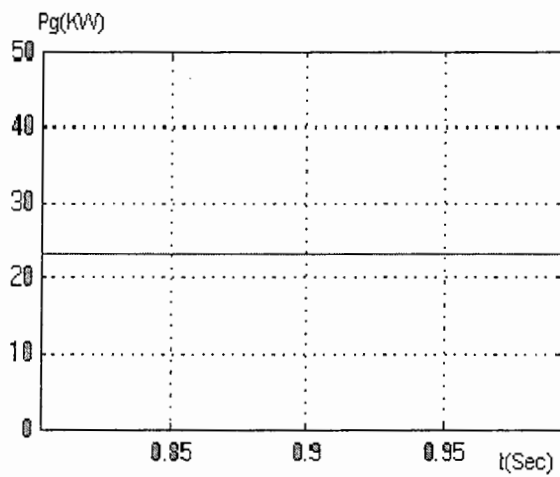
شکل ۲-۵ ولتاژ شبکه بر حسب زمان



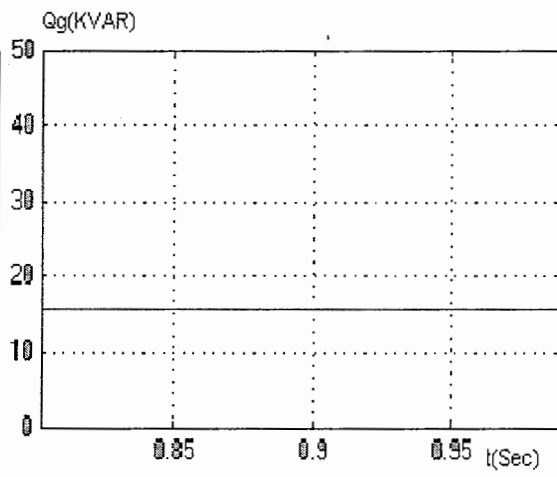
شکل ۸-۲ گشتاور الکترومغناطیسی بر حسب زمان



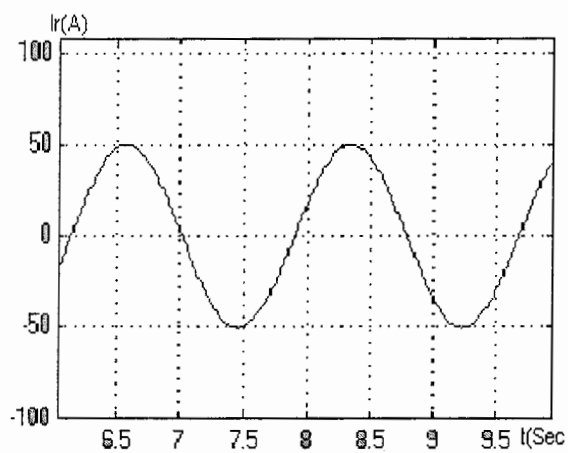
شکل ۷-۲ گشتاور مکانیکی بر حسب زمان



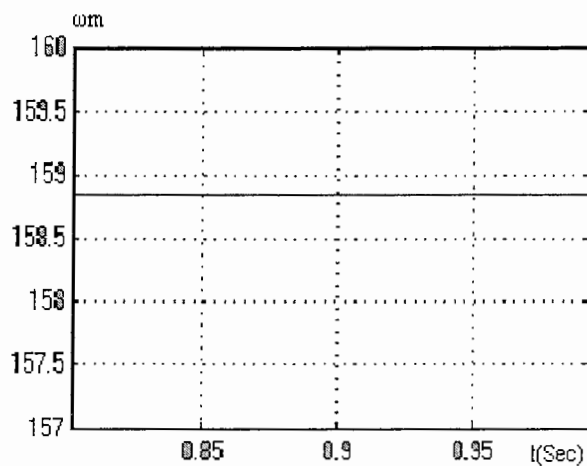
شکل ۱۰-۲ توان اکتیو تحویلی ژنراتور بر حسب زمان



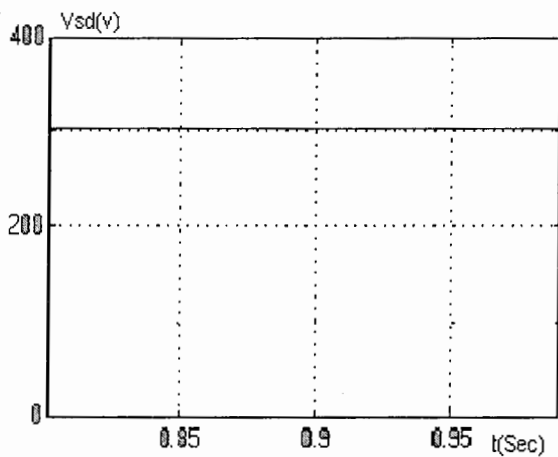
شکل ۹-۲ توان راکتیو جذب شده ژنراتور بر حسب زمان



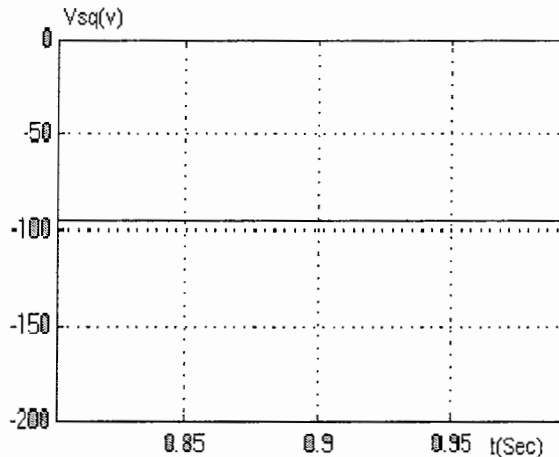
شکل ۲-۱۲ جریان روتور بر حسب زمان



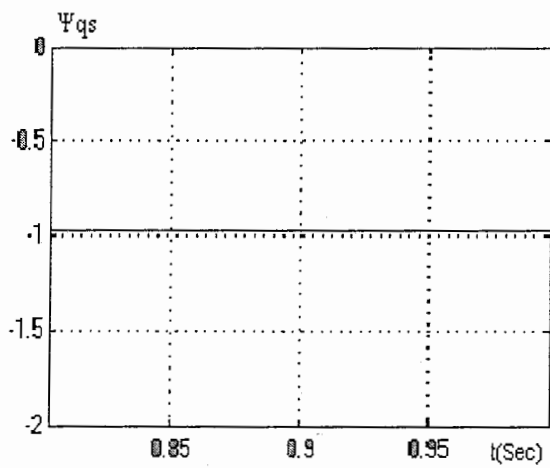
شکل ۲-۱۱ سرعت روتور بر حسب زمان



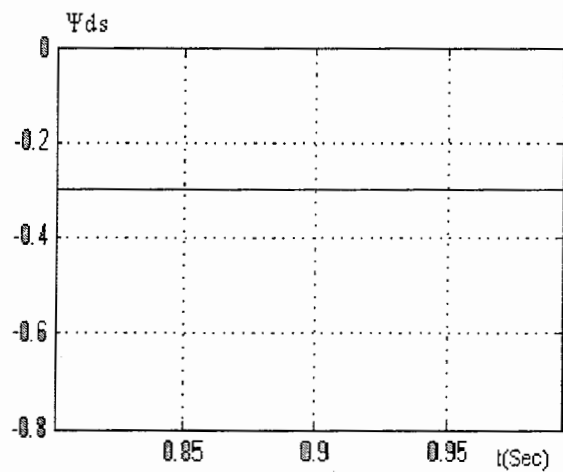
شکل ۲-۱۴ ولتاژ استاتور در راستای محور d بر حسب زمان



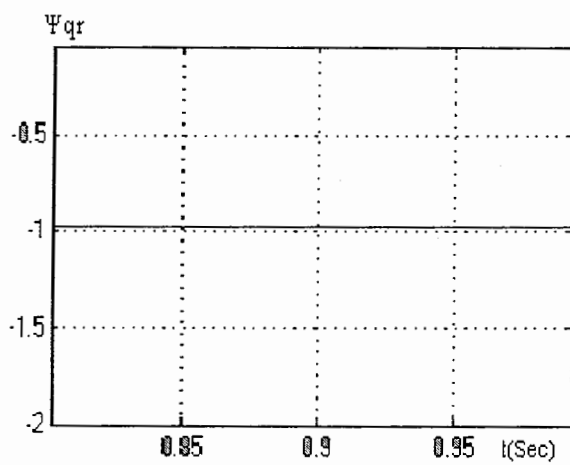
شکل ۲-۱۳ ولتاژ استاتور در راستای محور q بر حسب زمان



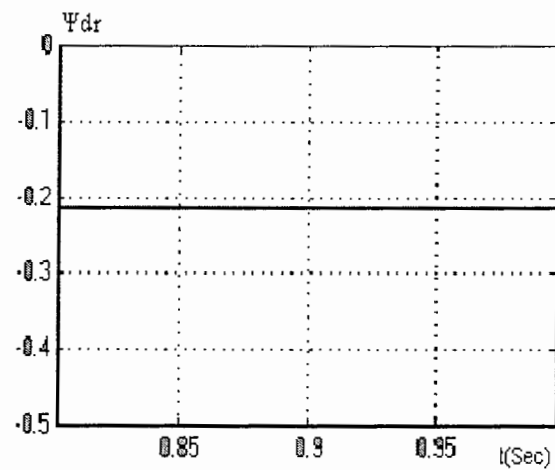
شکل ۱۶-۲ شار استاتور در راستای محور q بر حسب زمان



شکل ۱۵-۲ شار استاتور در راستای محور d بر حسب زمان



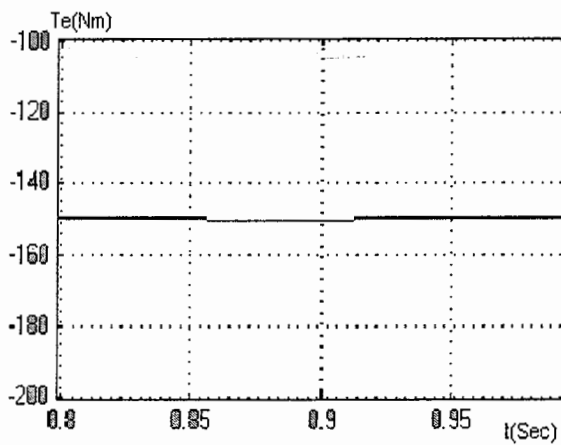
شکل ۲۰-۲ شار روتور در راستای محور q بر حسب زمان



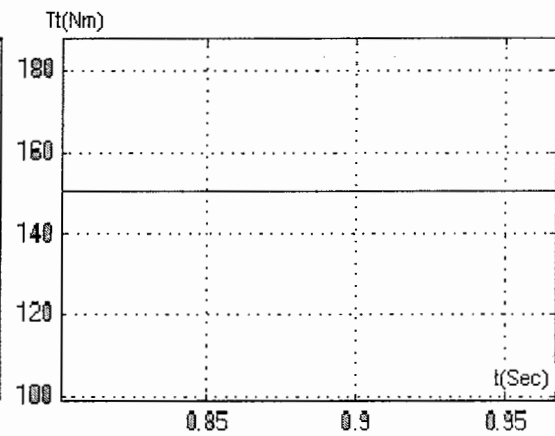
شکل ۱۹-۲ شار روتور در راستای محور d بر حسب زمان

۲-۲-۲ اثر افزایش یک مقاومت خارجی در مدار روتور روی عملکرد ژنراتور القایی

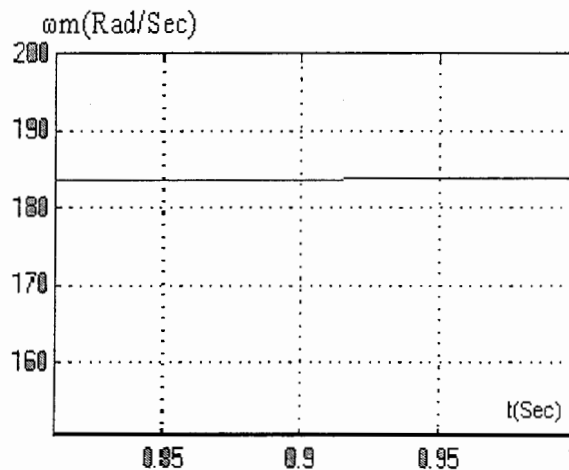
در این حالت تحت شرایط قبل ۱ اهم مقاومت خارجی به مدار روتور اضافه گردید. با وجود مقاومت روتور شیب منحنی گشتاور سرعت کاهش و در نتیجه (تحت شرایط یکسان) سرعت روتور (شکل ۲-۲۳) افزایش و در نتیجه فرکانس جریان روتور (شکل ۲-۲۷) افزایش پیدا می کند [۱۴]. مولفه های ولتاژ محور d روتور و محور q روتور در شکل های (۲-۲۸) و (۲-۲۹) نشان داده شده است. همان طور که دیده می شود به علت وجود مقاومت خارجی دامنه این مولفه ها افزایش پیدا می کند.



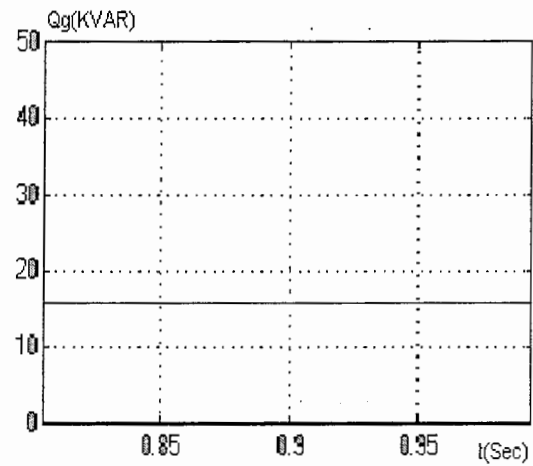
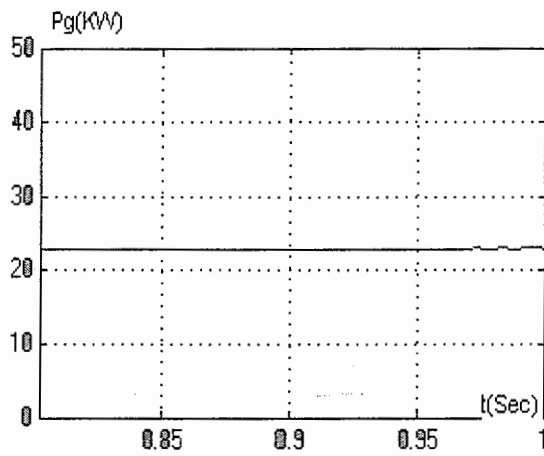
شکل ۲-۲۲ گشتاور الکترومغناطیسی بر حسب زمان



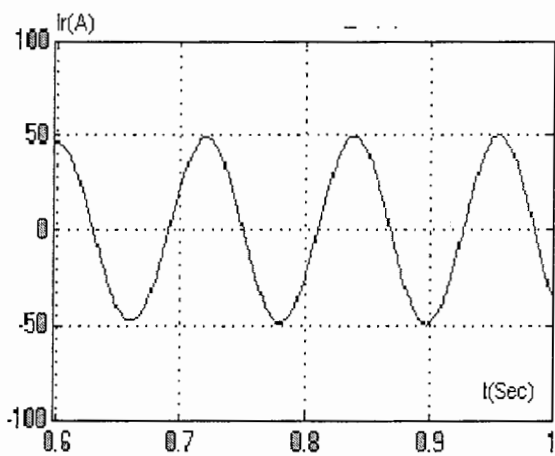
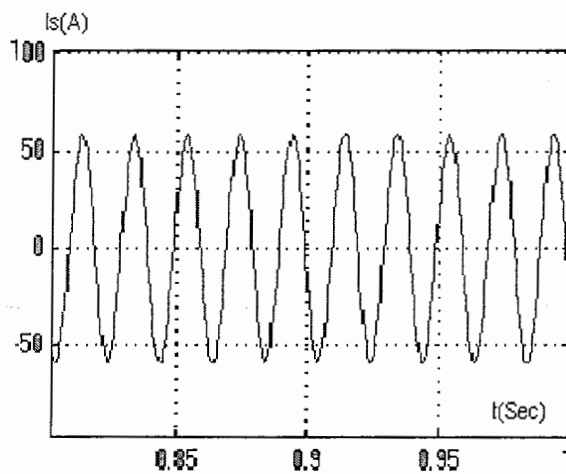
شکل ۲-۲۱ گشتاور مکانیکی بر حسب زمان



شکل ۲-۲۳ سرعت روتور بر حسب زمان

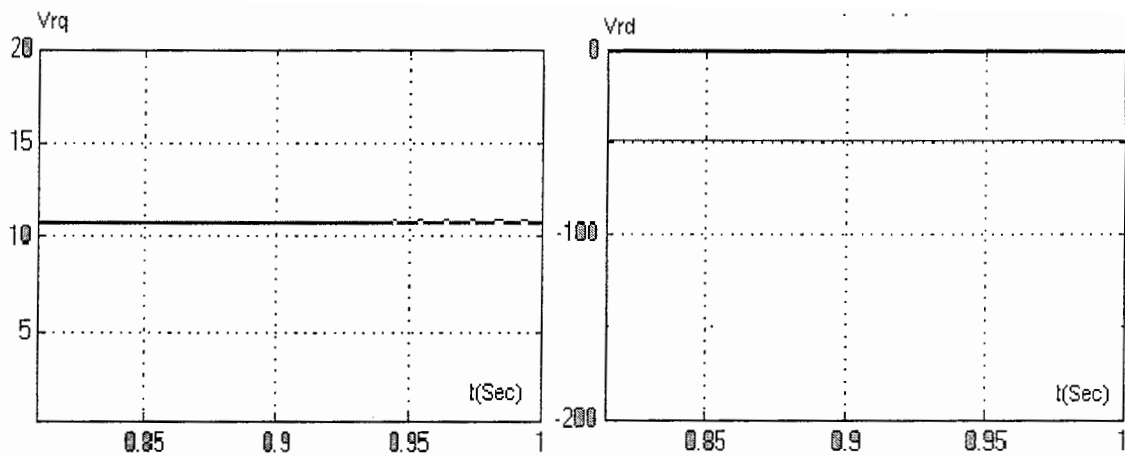


شکل ۲۴-۲ توان راکتیو جذب شده ژنراتور بر حسب زمان شکل ۲۵-۲ توان اکتیو تحویلی ژنراتور بر حسب زمان



شکل ۲۷-۲ جریان استاتور بر حسب زمان

شکل ۲۶-۲ جریان روتور بر حسب زمان



شکل ۲-۲۸ ولتاژ روتور در راستای محور d بر حسب زمان شکل ۲-۲۹ ولتاژ روتور در راستای محور q بر حسب زمان

در جدول ۲-۲ به طور خلاصه عملکرد ماشین با و بدون وجود مقاومت خارجی نشان داده شده است.

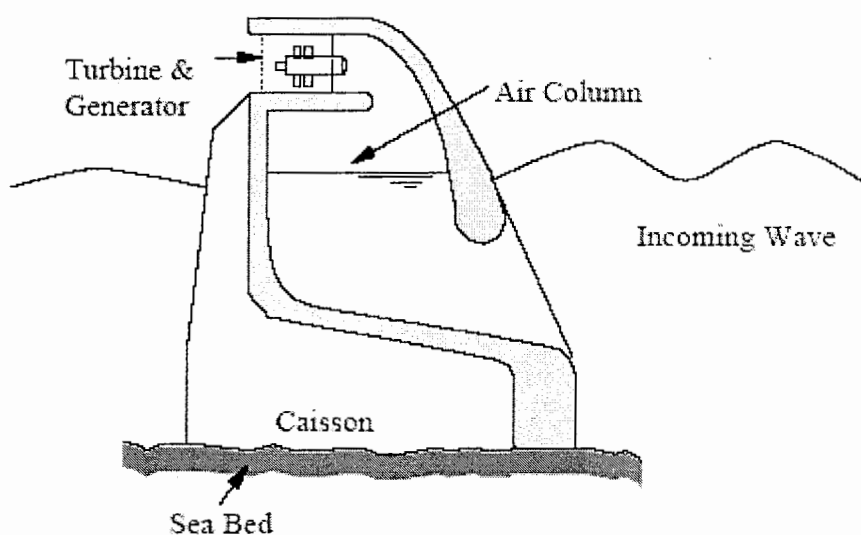
| | without external resistance | with external resistance |
|---------------------|-----------------------------|--------------------------|
| $V_{ph}(rms)$ | 220(V) | 220(V) |
| $I_s(rms)$ | 38.9(A) | 38.9(A) |
| $I_r(rms)$ | 34.65(A) | 34.65(A) |
| $T_t(Nm)$ | 150(Nm) | 150(Nm) |
| $T_e(Nm)$ | -150(Nm) | -150(Nm) |
| $P_g(KW)$ | 22(KW) | 22(KW) |
| $Q_g(KVAR)$ | 17(KVAR) | 17(KVAR) |
| $\omega_m(Rad/Sec)$ | 158.8(Rad/Sec) | 183(Rad/Sec) |
| $f_r(HZ)$ | 0.6(HZ) | 4(HZ) |
| V_{sq} | -90 | -90 |
| V_{sd} | 300 | 300 |
| V_{rq} | 0 | 12 |
| V_{rd} | 0 | 50 |

جدول ۲-۲ عملکرد ماشین با و بدون وجود مقاومت خارجی

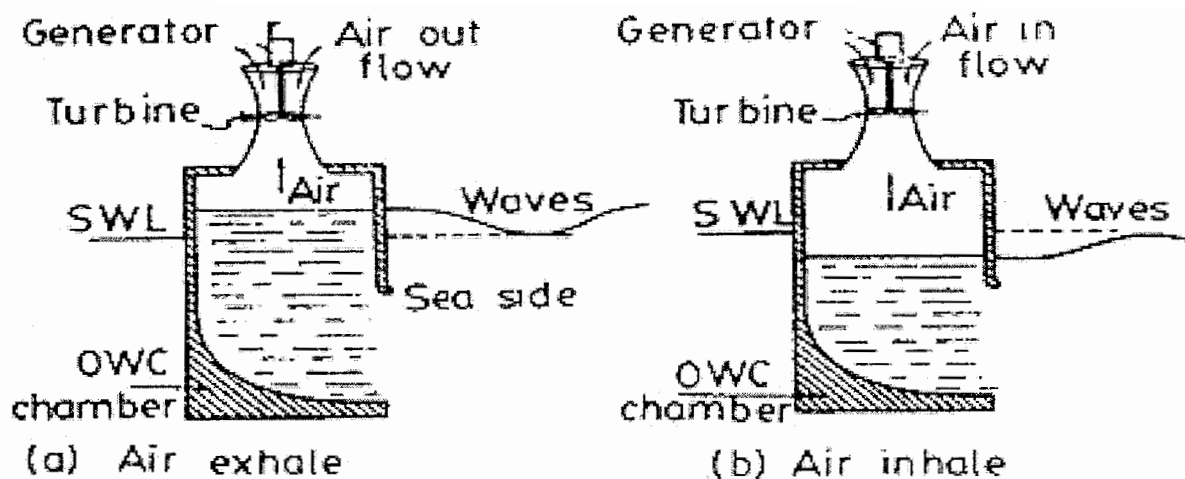
فصل سوم

معرفی و مدل‌سازی مخزن نیروگاه موجی محفظه آب
نوسانی (OWC) و توربین

در نیروگاه های موجی، از انرژی موج جهت به حرکت درآوردن توربین استفاده می شود. نیروگاه های موجی OWC شامل یک مخزن آب به نام OWC است. زمانی که دریا موج می شود سطح آب منبع بالا می رود و با افزایش سطح آب منبع OWC، هوای موجود در بالای منبع فشرده شده و به سمت توربین هدایت می شود و توربین را به حرکت در می آورد. با چرخش توربین، ژنراتوری که به توربین متصل شده است به گردش در می آید و توان به شبکه تحویل داده می شود [۱۵]. شکل (۱-۳) بطور واضح چنین سازه ای و نحوه انتقال انرژی از موج به توربین را نشان می دهد. با ایجاد موج، آب موجود در منبع افزایش پیدا می کند و سطح آب همانند شکل ۲-۳-الف به صورت یکنواخت (مانند پیستون) بالا می رود و هوای بالای منبع به سمت توربین هدایت می شود. با برگشت موج، سطح آب منبع به صورت نشان داده شده در شکل ۲-۳-ب پایین می آید و هوا بعد از برخورد به پره های توربین به داخل منبع جریان پیدا می کند. با وجود جریان هوا در جهت مخالف یکدیگر در دو نیم سیکل، توربین ولز در جهت گردش اولیه خود ادامه مسیر می دهد [۱۰].



شکل ۱-۳ نمایی از OWC یک نیروگاه موجی



شکل ۲-۳ بالا و پایین آمدن سطح آب منبع OWC و ورود و خروج هوای منبع

از مهمترین عوامل محدودیت در تاسیس نیروگاه OWC، موقعیت مکانی محل نصب نیروگاه است. نیروگاه OWC معمولاً در کنار ساحل تاسیس می شود بطوریکه دیواره ساختمان نیروگاه توسط صخره های اطراف ساحل مهار می شوند. برای ساخت چنین سازه ای بطور نمونه کف دریا ۵ متر حفاری می شود [۱۶].

۱-۳ توربین های بکاررفته در نیروگاه OWC

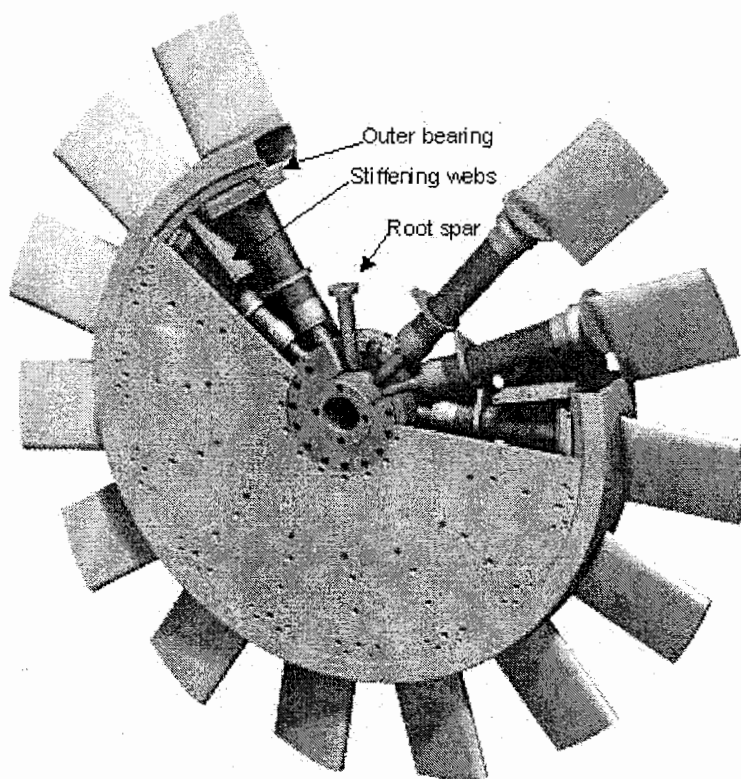
در نیروگاه موجی OWC انواع مختلف توربین با ساختارهای متفاوت مورد استفاده قرار گرفته است که پرکاربردترین آنها عبارت است از

۱- توربین ولز

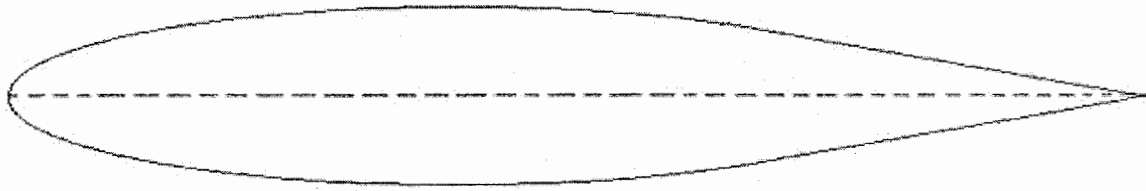
۲- توربین ضربه ای [۱۷].

۱-۱-۳ توربین ولز (Wells Turbine)

متداول ترین توربین جهت انتقال انرژی موج به روتور، در نیروگاه OWC توربین ولز است. در شکل (۳-۳) نمای کلی توربین ولز نشان داده شده است. این توربین ها دارای تعدادی پره به صورت ایرفویل است و مقطع آن در شکل (۳-۴) نمایش داده شده است.

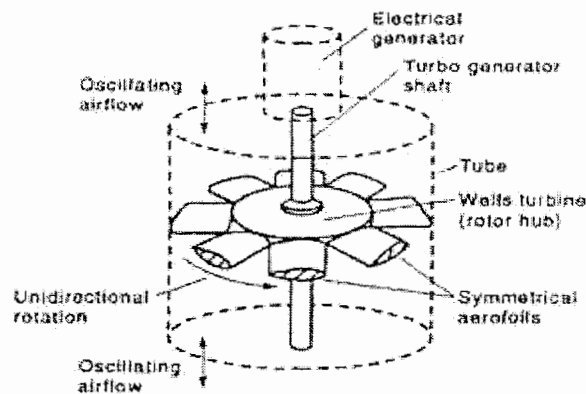


شکل ۳-۳ ساختار کلی توربین ولز



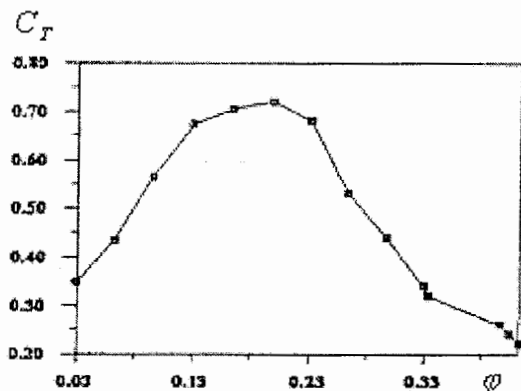
شکل ۳-۴ مقطع پره یک توربین ولز

همانطور که از شکل (۳-۵) مشاهده می شود پره این نوع توربین ها دارای ساختار متقارن است بنابراین این اگر جریان هوا از جلو و یا از پشت به آن دمیده شود، در یک جهت گردش می کنند. بنابراین در هنگام دمیده شدن و یا مکش هوا، نیروی اعمالی به توربین در یک جهت بوده و شفت ژنراتور را در یک جهت به گردش در می آورد.

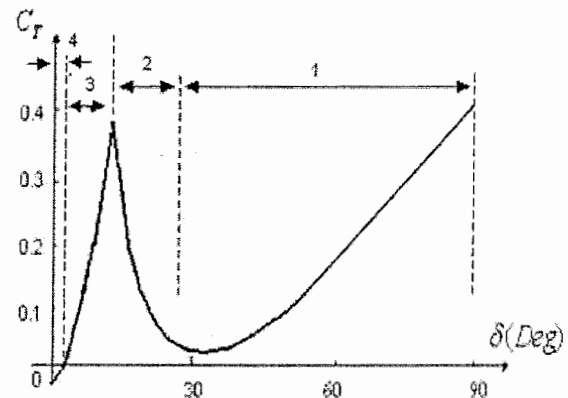


شکل ۳-۵ نحوه چرخش توربین ولز در هنگام اعمال جریان هوا

دو شکل زیر منحنی مشخصه توربین ولز را نشان می دهد که با منحنی ضریب گشتاور توربین بر حسب زاویه تماس سیال با توربین (δ) (شکل ۳-۶) و یا ضریب گشتاور بر حسب ضریب جریان (φ) (شکل ۳-۷) بیان می شود [۱۸].



شکل ۳-۷ منحنی ضریب گشتاور بر حسب ضریب جریان



شکل ۳-۶ منحنی ضریب گشتاور بر δ

که در آن

$$\delta = \tan^{-1} \frac{V_A}{V_P} \quad (1-3)$$

V_A : سرعت جریان هوا بر حسب (m/Sec) V_P : سرعت خطی توربین $r \times \omega$ بر حسب (m/Sec)

r : شعاع توربین بر حسب (m) ω : سرعت توربین بر حسب (rad/Sec)

$$\varphi = \frac{V_A}{V_P} \quad (2-3)$$

بنابراین گشتاور توربین از رابطه زیر محاسبه می گردد

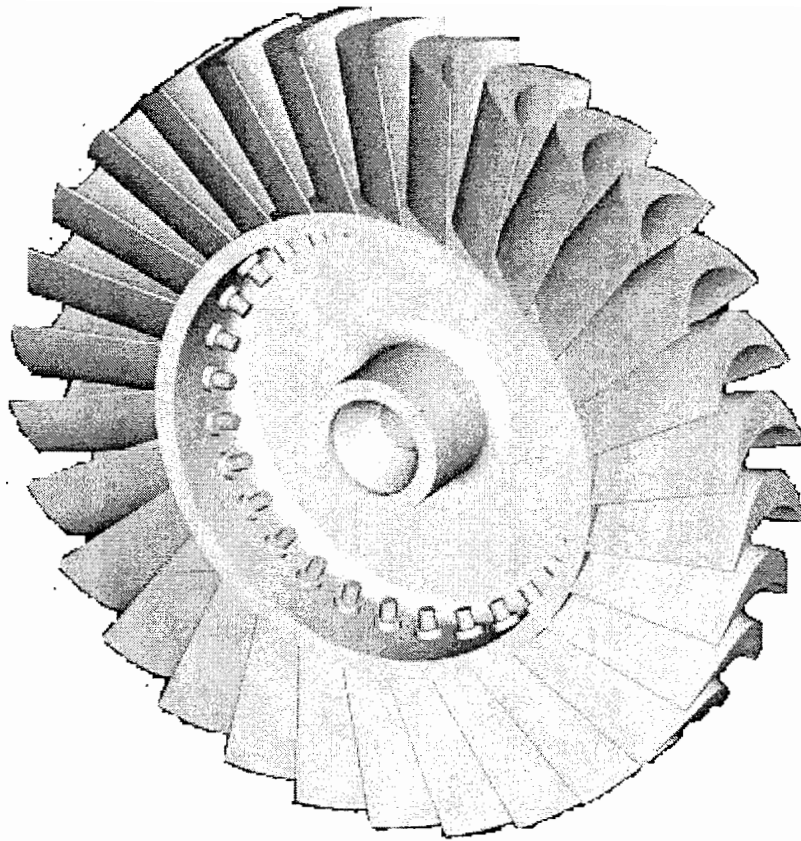
$$T_T = K \times C_T (V_A^2 + V_P^2) \quad (3-3)$$

که در آن K ثابت توربین است.

همانطور که از شکل (۳-۶) مشاهده می شود منحنی مشخصه توربین به چهار ناحیه تقسیم شده است. ناحیه (۱) رفتار توربین از لحظه شروع تا لحظه رسیدن به سرعت سنکرون را نشان می دهد. در لحظه شروع $\delta=90^\circ$ درجه و ضریب گشتاور ماکزیمم است. با افزایش سرعت چرخشی توربین، زاویه δ و ضریب گشتاور توربین کاهش پیدا می کند. در ناحیه (۱) تدریجاً ضریب گشتاور توربین کم می شود ولی با توجه به اینکه مقدار آن مثبت است، توربین می تواند شتاب بگیرد و وارد حالت ژنراتوری شود. در ناحیه (۲) و (۳) ماشین در مد ژنراتوری قرار می گیرد و می تواند به شبکه توان تحویل دهد ولی در عمل ناحیه کار توربین در $14 < \delta < 0^\circ$ درجه باید باشد زیرا در این ناحیه راندمان توربین ماکزیمم می گردد [۱۹].

۳-۱-۲ توربین ضربه ای (Impulse turbine)

یکی دیگر از توربین هایی که در نیروگاه موجی OWC قابل استفاده است توربین ضربه ای نام دارد. شکل (۳-۸) نمای کلی این توربین را نشان می دهد.

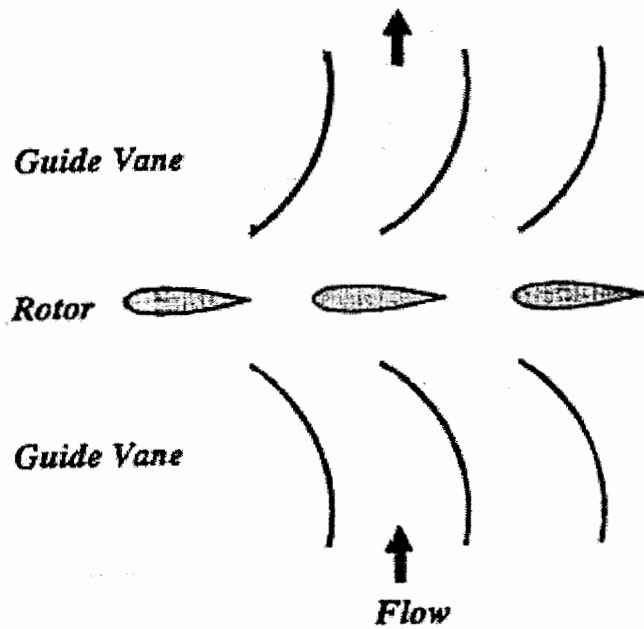


شکل ۸-۳ تصویر توربین ضربه ای

همان طور که از شکل (۸-۳) مشاهده می شود این توربین نیز دارای تعدادی پره متقارن است بنابراین همانند توربین ولز هم در هنگام دمیده شدن جریان هوا و هم در هنگام برگشت جریان هوا در یک جهت حرکت می کند. توربین ضربه ای نیز همانند توربین ولز با منحنی ضریب گشتاور بر حسب ضریب جریان قابل مدلسازی است [۲۰].

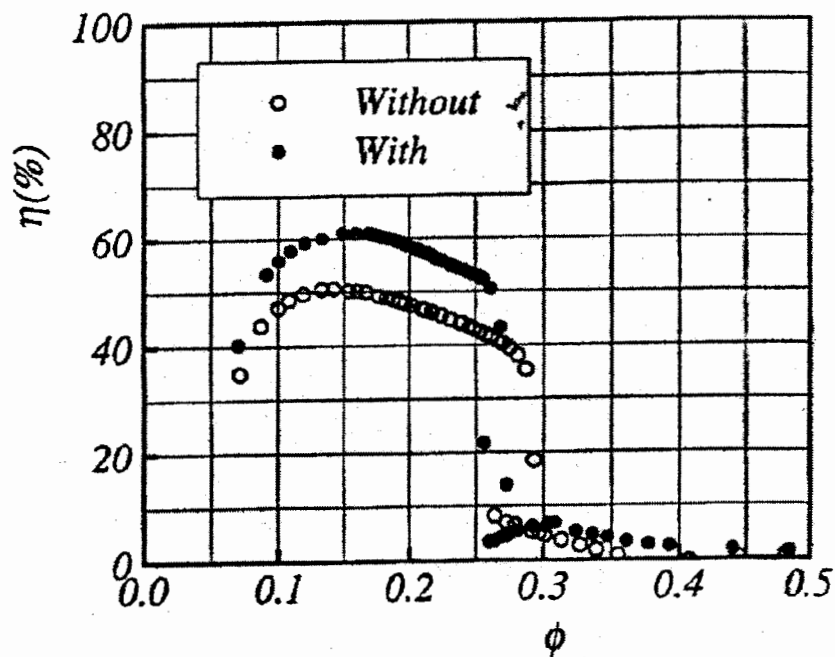
۲-۳ تیغه های راهنما (Guide Vanes)

جهت افزایش کارایی توربین از تیغه های راهنما استفاده می گردد. این تیغه ها پره های ثابتی هستند که با تعیین مسیر جریان هوا باعث افزایش راندمان و عملکرد بهتر توربین می گردد. در شکل (۹-۳) برش مقطعی یک توربین ولز به همراه تیغه های راهنما نشان داده شده است.



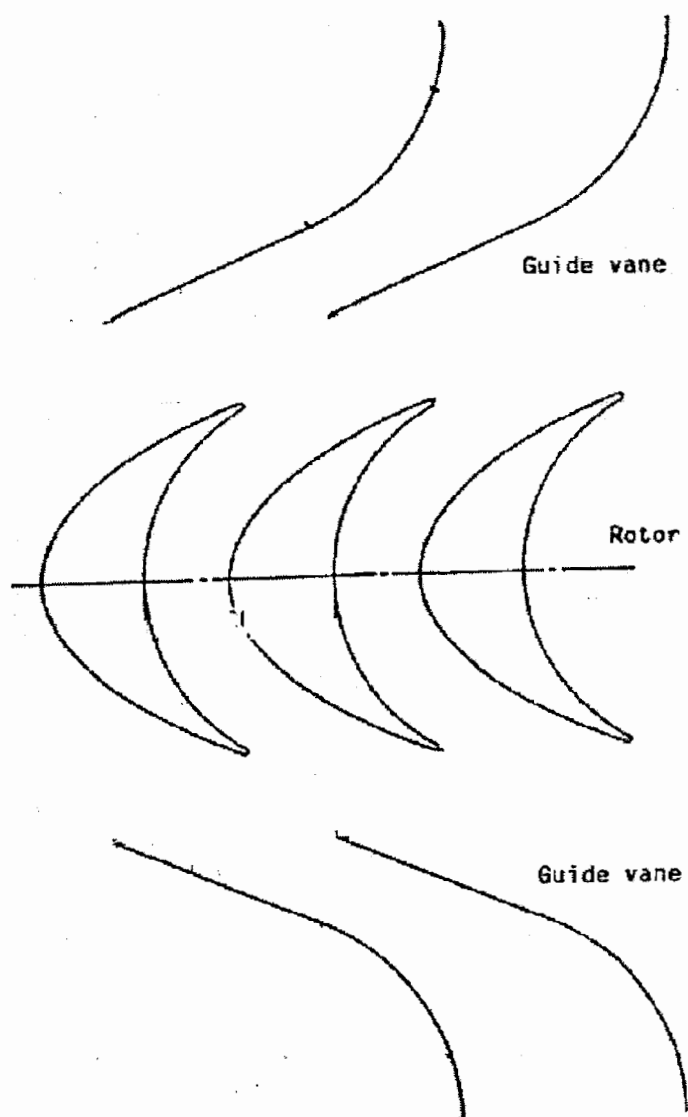
شکل ۹-۳ نمایی از مقطع توربین ولز به همراه تیغه های راهنما

همانطور که از شکل (۹-۳) مشاهده می شود خمیدگی تیغه های راهنما در جهتی است که جریان هوا را در جهت حرکت روتور به توربین اعمال می کند. در شکل (۱۰-۳) نیز منحنی راندمان بر حسب ضریب جریان برای حالت بدون وجود تیغه های راهنما و با وجود آن رسم شده است [۲۱].



شکل ۱۰-۳ تاثیر تیغه های راهنما بر راندمان توربین ولز NCA۰۰۲۰

تیغه های راهنما جهت افزایش کارایی توربین ضربه ای قابل استفاده است. شکل (۱۱-۳) مقطعی از یک توربین ضربه ای به همراه تیغه های راهنما را نشان می دهد.

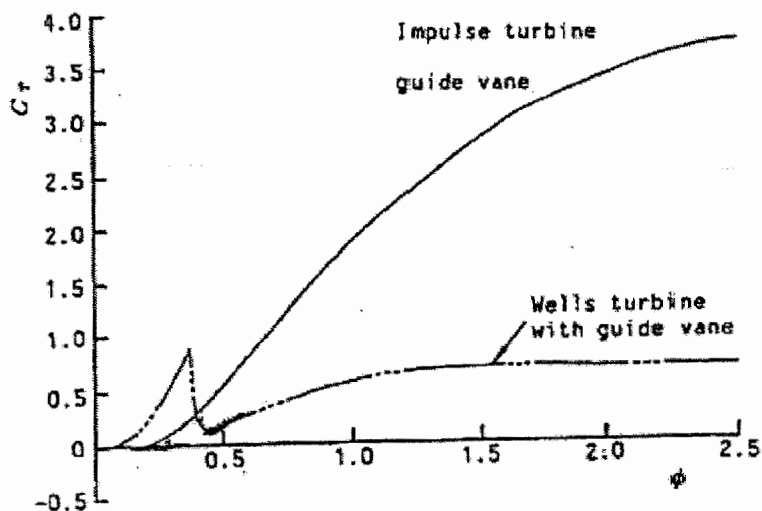


شکل ۱۱-۳ نمایی از مقطع توربین ولز به همراه تیغه های راهنما

۳-۳ منحنی مشخصه های توربین ولز و ضربه ای

۱-۳-۳ منحنی های ضریب گشتاور بر حسب ضریب جریان

در شکل (۱۲-۳) منحنی ضریب گشتاور بر حسب ضریب جریان برای توربین ضربه ای و ولز (با وجود تیغه های راهنما) رسم شده است.

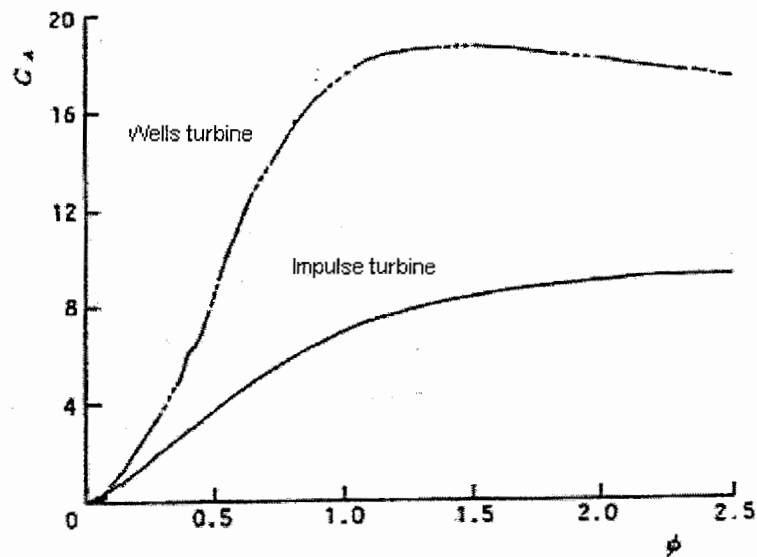


شکل ۱۲-۳ منحنی ضریب گشتاور بر حسب ضریب جریان توربین های ولز و ضربه ای با وجود تیغه های راهنما

همان طور مشاهده می شود در ضریب جریان کوچک ($\phi \leq 0.36$) یا حالت کار نرمال، گشتاور خروجی توربین ولز به مراتب بیشتر از توربین ضربه ای است ولی برای $\phi \geq 0.36$ (در حالت راه اندازی و یا ایجاد موج با دامنه بالا) گشتاور خروجی توربین ولز بسیار کمتر می باشد.

۲-۳-۳ منحنی های ضریب توان بر حسب ضریب جریان

یکی دیگر از منحنی مشخصه های توربین های ولز و ضربه ای منحنی ضریب توان ورودی توربین (C_A) بر حسب ضریب جریان (ϕ) است. توسط این منحنی توان دریافت شده توسط توربین و راندمان قابل محاسبه است. شکل (۱۳-۳) منحنی ضریب توان ضریب جریان را برای هر دو توربین نشان می دهد.



شکل ۳-۳ منحنی های ضریب توان ورودی بر حسب ضریب جریان توربین های ولز و ضربه ای

۳-۳-۳ منحنی های راندمان

راندمان این نوع توربین ها از رابطه زیر قابل محاسبه است:

$$\eta_t = \frac{p_{out}}{p_{in}} = \frac{T_t \times \omega}{\Delta p \times A \times V_A} = \frac{C_T}{C_A \times \phi} \quad (4-3)$$

که در آن

ϕ : ضریب جریان ω : سرعت روتور

A : سطح مقطع موثر دهانه خروجی محفظه V_A : سرعت جریان هوا

C_T : ضریب گشتاور توربین C_A : ضریب توان ورودی

در رابطه (۳-۳) T_t گشتاور توربین است و Δp فشار نسبی داخل محفظه می باشد که از رابطه (۳-۵) محاسبه می شود [۱۴].

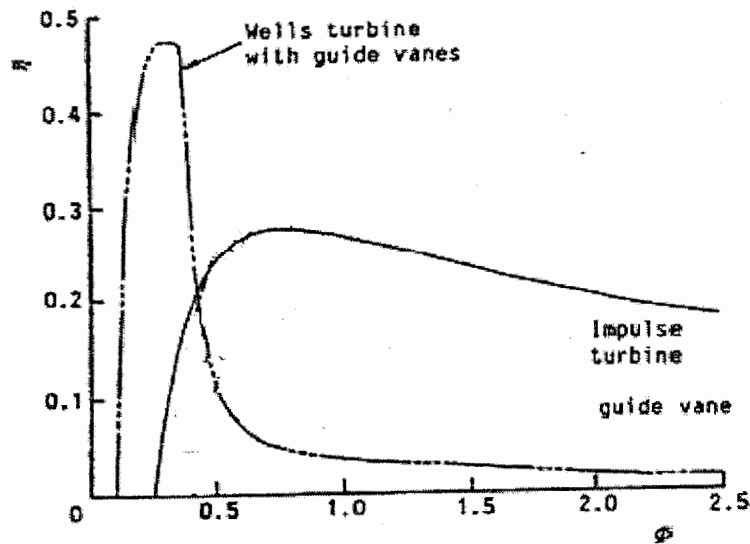
$$\Delta p = K \times C_A \times \frac{1}{A} \times (V_A^2 + V_P^2) \quad (5-3)$$

راندمان متوسط توربین با انتگرال گیری از رابطه راندمان، بصورت زیر بدست می آید.

$$\bar{\eta} = \frac{f \int_0^{1/f} (T_t \times \omega) dt}{f \int_0^{1/f} (\Delta p \times A \times V_A) dt} \quad (6-3)$$

که در آن f فرکانس موج است.

منحنی راندمان متوسط توربین بر حسب ضریب جریان در شکل (۱۴-۳) نشان داده شده است.

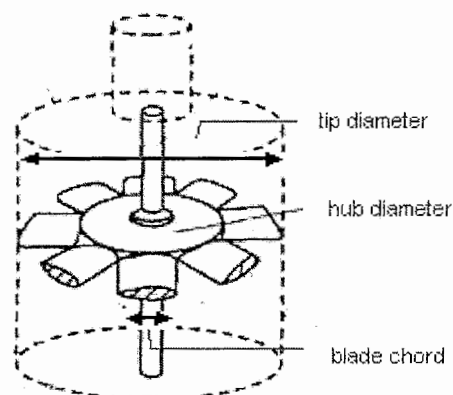


شکل ۱۴-۳ مقایسه منحنی راندمان بر حسب ضریب جریان در توربین ولز و ضربه ای

همان طور که از شکل (۱۴-۳) مشاهده می شود راندمان توربین ولز در $\phi \leq 0.36$ از توربین ولز بالاتر است ولی با افزایش ϕ راندمان توربین ولز به شدت کاهش می یابد [۲۱].

۴-۳ پارامترهای واقعی و مشخصات نمونه ای از توربین های ولز و ضربه ای

نمای کلی یک توربین ولز مجددا در شکل (۱۵-۳) آورده شده است



شکل ۱۵-۳ معرفی اجزاء توربین ولز

مشخصات توربین ولز و ضربه ای بکاررفته در این شبیه سازی به ترتیب در جدول ۱ و ۲ آورده شده است [۱۷].

| | |
|-----------------|----------|
| Nominal speed | 1475 rpm |
| Tip diameter | 298 mm |
| Hub diameter | 210 mm |
| Blade length | 44 mm |
| Number of blade | 30 |
| Blade chord | 54 mm |

جدول ۲- مشخصات توربین ضربه ای

| NCA0021 | |
|-----------------|----------|
| Nominal speed | 1475 rpm |
| Tip diameter | 304 mm |
| Hub diameter | 214 mm |
| Blade length | 45 mm |
| Number of blade | 8 |
| Blade chord | 72.3 mm |

جدول ۱- مشخصات توربین ولز

بطور خلاصه الگوریتم مدل سازی توربین به صورت زیر است:

(۱) نسبت سرعت جریان سیال ورودی (V_A) بر سرعت خطی توربین ($V_p = r \times \omega$) را محاسبه کرده و

مقدار α از رابطه $\alpha = \tan^{-1} \frac{V_A}{V_p}$ بدست می آوریم.

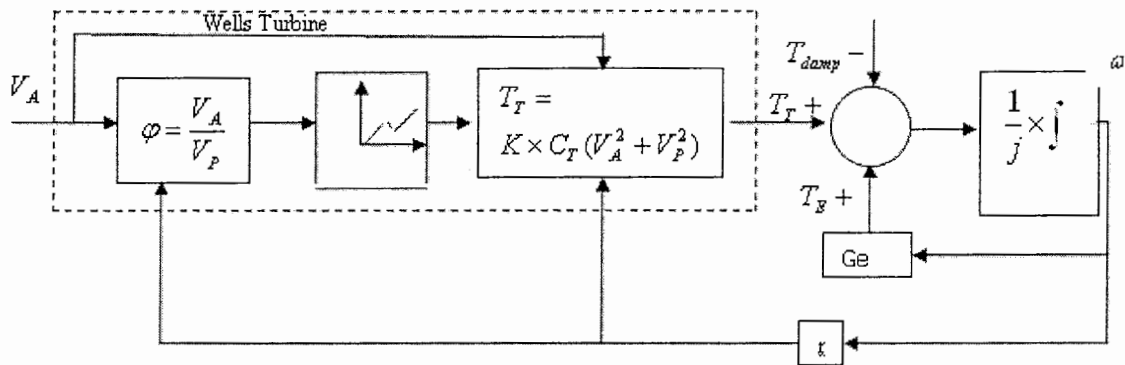
(۲) از طریق منحنی گشتاور توربین (C_T) بر حسب α (شکل (۳-۱۲))، C_T متناظر را بدست می آوریم.

(۳) طبق رابطه زیر گشتاور توربین را محاسبه می کنیم.

$$T_T = K \times C_T (V_A^2 + V_p^2)$$

که در آن K ثابت توربین نامیده می شود.

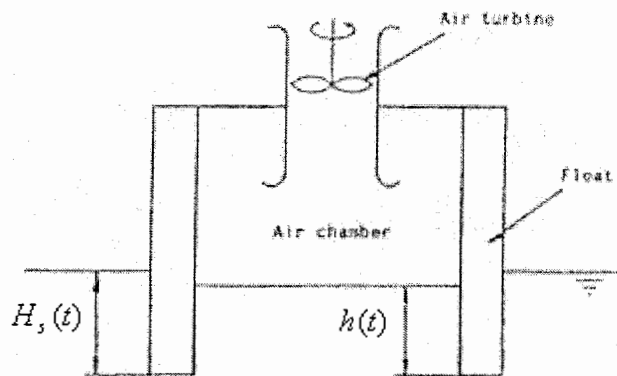
در نهایت با توجه به روابط فوق توربین به صورت زیر مدل سازی می شود.



شکل ۳-۱۶ بلوک دیاگرام ژنراتور و توربین

۳-۵ مدل‌سازی مخزن نیروگاه محفظه آب نوسانی (OWC)

محفظه OWC دارای رفتار پیچیده و کاملاً غیر خطی است. و در این بخش سعی می‌شود یک مدل تقریبی ساده برای آن با توجه به روابط تجربی ارائه شود. با توجه به اینکه به مدل موج در مقالات ارائه شده کمتر مورد توجه شده است و اطلاعات کافی در این زمینه وجود ندارد، در این گزارش نوسانات آن به شکل سیگنال سینوسی در نظر گرفته شده است. بنابراین ارتفاع لحظه‌ای موج در خارج از محفظه با رابطه زیر توصیف می‌شود.



شکل ۳-۱۷ نمایش برخی از پارامترهای مورد نیاز جهت شبیه‌سازی محفظه OWC

$$H_s(t) = H_s \cos(\omega t) \quad (۳-۷)$$

که در آن:

$H_s(t)$: ارتفاع لحظه ای موج H_s : ارتفاع قله موج f : فرکانس موج
و فشار داخلی محفظه $(\frac{N}{m^2})$ برابر خواهد بود با:

$$\Delta p = \rho_s \times g(H_s(t) - h(t)) \quad (۸-۳)$$

که در آن چگالی آب، g نیروی جاذبه و $h(t)$ ارتفاع لحظه ای آب در داخل محفظه است. $h(t)$ بر حسب سرعت وزش هوای اعمالی به توربین (V_A) بصورت زیر بیان می گردد.

$$\frac{\partial h}{\partial t} = \left(\frac{A_T}{A_w}\right) \times V_A \quad (۹-۳)$$

که در آن $(\frac{A_T}{A_w})$ نسبت سطح مقطع توربین (دهانه خروجی) به سطح مقطع دهانه ورودی (اشغال شده توسط آب) است. با جایگذاری معادله (۹-۳) در (۸-۳) رابطه سرعت هوای داخل محفظه بر حسب فشار داخلی محفظه بدست می آید.

$$\Delta p = \rho_s (h_s(t) - \left(\frac{A_T}{A_w}\right) \times \int V_A(t) dt) \quad (۱۰-۳)$$

از طرفی با توجه به رابطه تجربی ارائه شده در مرجع (۲۴) داریم:

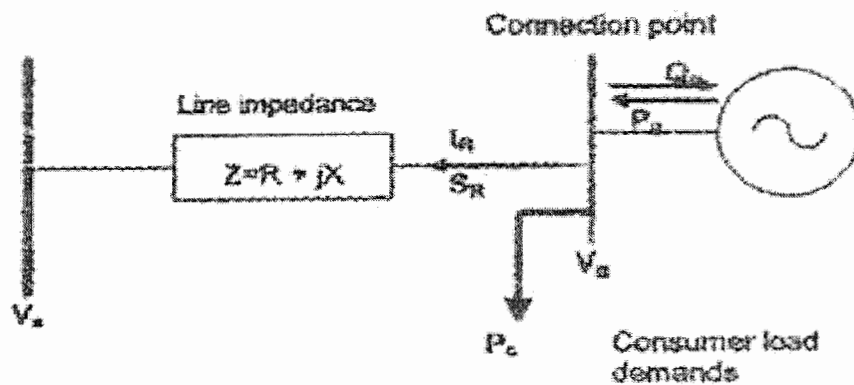
$$\Delta p = 1.74 \times V_A^3 + 39.71 \times V_A \quad (۱۱-۳)$$

بنابراین سرعت وزش هوا بر حسب $\frac{m}{s}$ و فشار از حل دو معادله (۱۰-۳) و (۱۱-۳) با هم قابل محاسبه است [۲۳].

فصل چهارم

شبیه سازی یک نیروگاه موجی با توربین ولز
و توربین ضربه ای

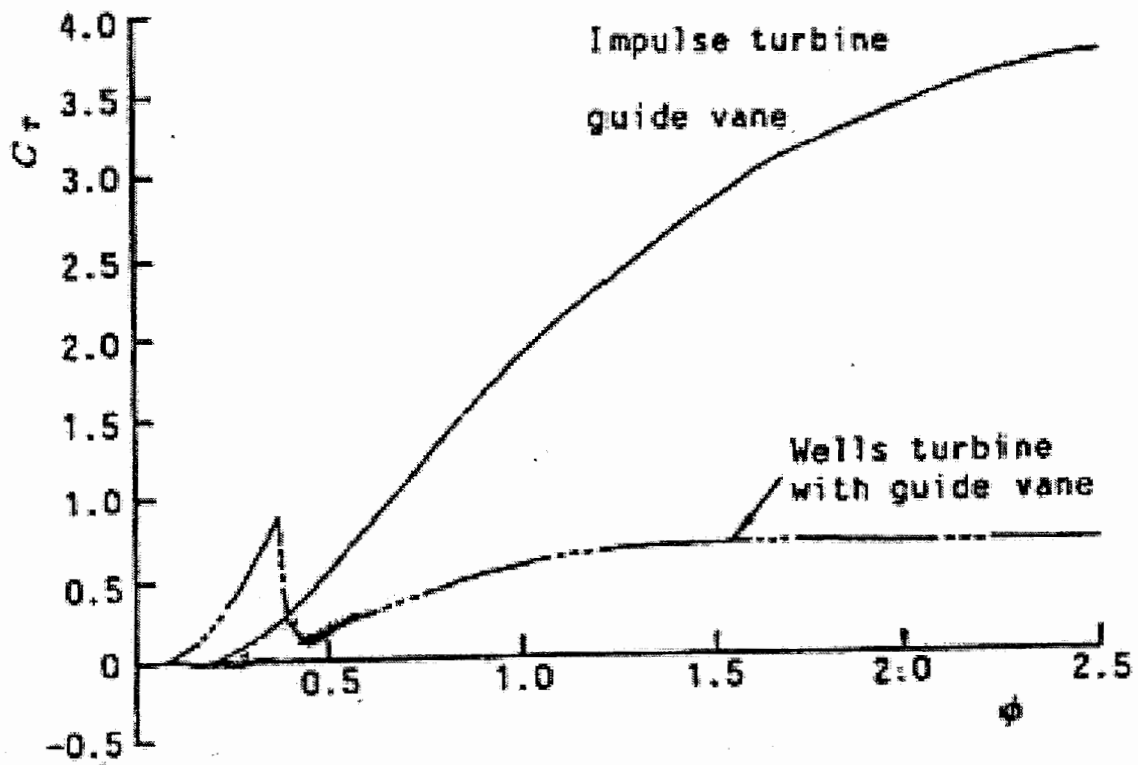
در این فصل نتایج شبیه سازی یک نیروگاه موجی با دو توربین مختلف ولز و ضربه ای ارائه می شود و عملکرد توربین ولز و ضربه ای مورد تحلیل و بررسی قرار می گیرد. همان طور که قبلا گفته شد، ارتفاع لحظه ای موج خارج از محفظه OWC به صورت سیگنال سینوسی در نظر گرفته می شود. در واقع ورودی محفظه OWC، ارتفاع لحظه ای موج و خروجی آن سرعت لحظه ای هوای اعمالی به توربین در نظر گرفته می شود. در این شبیه سازی، یک بار مدل توربین ولز و بار دیگر مدل توربین ضربه ای بکار گرفته می شود و ویژگی های هر کدام به صورت مجزا بررسی می شود. سیستم تحت بررسی یک ژنراتور القایی است که توسط خطی با امپدانس (mH) ۲ به شبکه توزیع متصل شده و بار محلی (Kw) ۱۰۰ با ضریب توان ۱ را تغذیه می کند.



شکل ۱-۴ ژنراتور القایی متصل به شبکه توزیع

۱-۴ نیروگاه موجی با توربین های ولز و ضربه ای در حین راه اندازی

در این قسمت به علت اهمیت عملکرد توربین در هنگام راه اندازی، گشتاور راه اندازی توربین ولز و ضربه ای بطور مختصر مقایسه می شود. در شکل (۲-۴) مجدداً منحنی مشخصه توربین ها رسم شده است. در هنگام راه اندازی توربین، روتور در حالت سکون می باشد و ضریب $\phi = \frac{VA}{r \times \omega}$ ، به سمت بی نهایت میل می کند. توربین ضربه ای تحت این شرایط ضریب گشتاور (C_T) قابل توجهی را ایجاد می کند. در عمل نیز بزرگترین مزیت توربین ضربه ای نسبت به توربین ولز گشتاور راه اندازی آن است ولی با افزایش سرعت روتور، ضریب گشتاور (C_T) به تدریج کاهش پیدا می کند.



شکل ۲-۴ منحنی ضریب گشتاور بر حسب ضریب جریان در توربین ولز و ضربه ای

۲-۴ نیروگاه موجی با توربین های ولز و ضربه ای در حالت ماندگار

در این بخش رفتار حالت ماندگار نیروگاه موجی OWC مورد مطالعه و عملکرد توربین ولز و ضربه ای در تحویل توان به شبکه به طور جداگانه بررسی می شود. جهت بررسی مزایا و معایب توربین ها، نیروگاه موجی را در دو ناحیه کار مختلف مورد شبیه سازی و بررسی قرار می دهیم ($0.4 < \varphi < 0.4$).

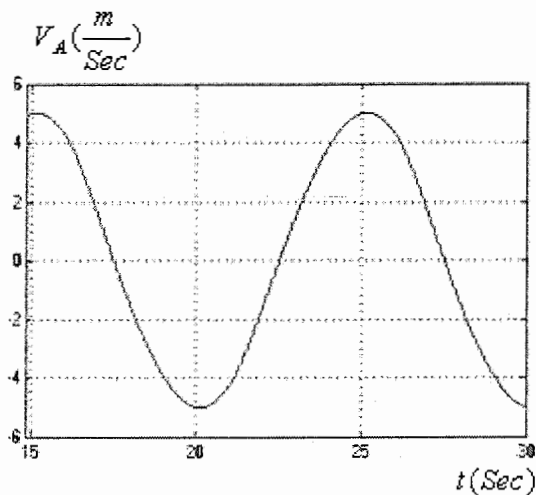
ناحیه کار توربین به شرایط جوی، فرکانس شبکه، نوع و تعداد قطب های ماشین، ابعاد توربین و محفظه OWC وابسته است ولی در این شبیه سازی ساختار مکانیکی تجهیزات ثابت فرض شده و فقط با تغییر شرایط جوی، توربین ها در نواحی کار مختلف قرار داده می شوند. به این ترتیب که ابتدا V_A کمتر از $0.4 \times (r \times \omega)$ در نظر گرفته شده و یا به عبارت دیگر رفتار توربین ها در برابر امواج کم دامنه مورد بررسی قرار می گیرد و سپس V_A بزرگتر از $0.4 \times (r \times \omega)$ انتخاب می شود. همچنین اثر افزایش مقاومت روتور و اینرسی سیستم در راندمان توربین و نیروگاه بررسی شده و در نهایت اثر نیروگاه موجی بر کیفیت توان شبکه مورد مطالعه قرار گرفته است.

۱-۲-۴ نیروگاه موجی در رژیم عملکرد با ضریب شار کوچکتر از ۰/۴

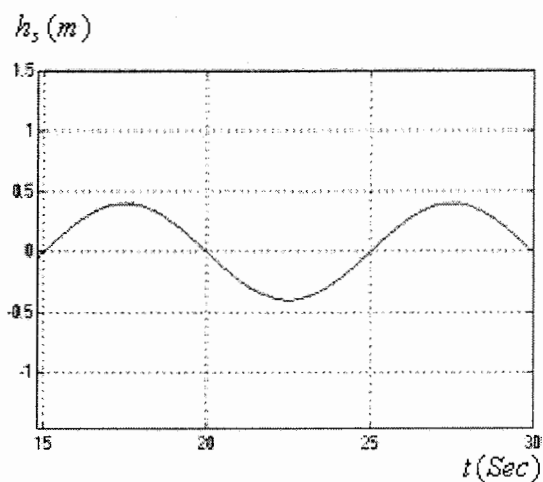
۱-۱-۲-۴ نیروگاه موجی با توربین ضربه ای در رژیم عملکرد با ضریب شار کوچکتر از ۰/۴

در این بخش جهت بررسی نتایج، ابتدا شبیه سازی نیروگاه موجی OWC به همراه توربین ضربه ای مورد مطالعه قرار می گیرد مشخصات ژنراتور بکاررفته در شبیه سازی در فصل ۲ و مشخصات توربین در فصل ۳ داده شده است. در شکل (۳-۴) و (۴-۴) ارتفاع موج و سرعت متناسب با آن نشان داده شده است. در واقع دامنه موج ورودی به عنوان ورودی سیستم در نظر گرفته شده و همانطور که گفته شد دامنه موج به نحوی انتخاب شده است که سرعت متناظر با آن کمتر از $0.4(r \times \omega)$ گردد. بدین ترتیب در این بخش توربین در $\varphi = \frac{VA}{r \times \omega}$ کوچکتر از ۰/۴ مورد مطالعه قرار می گیرد. همانطور که از شکل (۵-۴) مشاهده می شود با توجه به آنکه موج از صفر تا مقدار ماکزیمم در نوسان است φ بین صفر تا ۰/۲۵ نوسان می کند و ضریب گشتاور متناسب با آن در شکل (۶-۴) نشان داده شده است. در شکل (۹-۴) و (۱۰-۴) گشتاور مکانیکی و الکترومغناطیسی نشان داده شده است همان طور که دیده می شود با توجه به آنکه توربین ضربه ای فقط در یک جهت چرخش می کند گشتاور مکانیکی اعمال شده به روتور همواره دارای مقدار مثبت است.

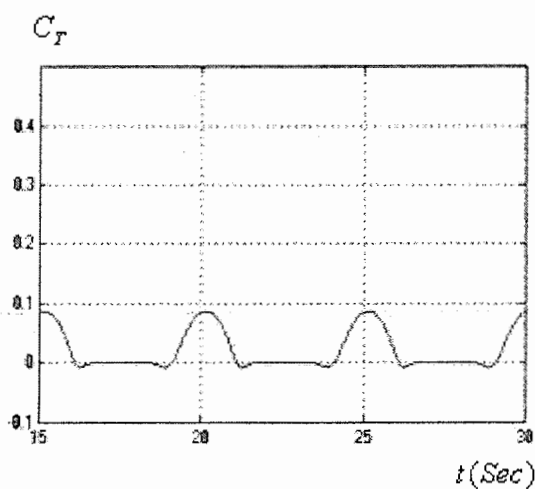
همان طور که گفته شد ژنراتور مورد استفاده در این شبیه سازی ژنراتور القایی است. در ژنراتور القایی با چرخش روتور بالاتر از سرعت سنکرون و جذب توان راکتیو از شبکه، توان اکتیو به شبکه داده می شود. در نیروگاه های موجی نوسانات توان ورودی باعث ایجاد نوسان در گشتاور مکانیکی توربین، سرعت روتور (شکل ۴-۱۱)، توان راکتیو (شکل ۴-۱۲) و اکتیو تحویلی از طرف نیروگاه به بار (شکل ۴-۱۳) و توان تحویلی از شبکه به بار (شکل ۴-۱۴) می شود.



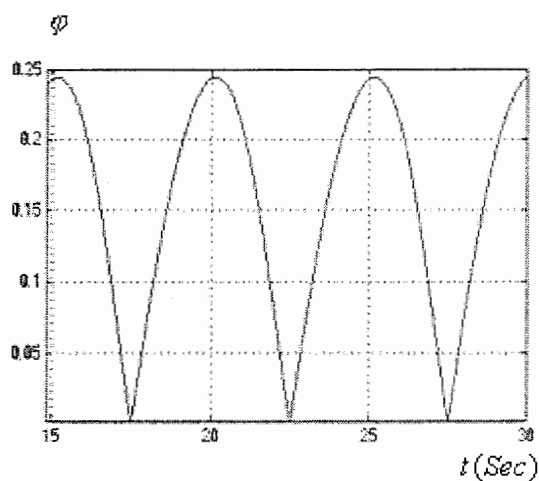
۴-۴ سرعت هوا دمیده شده به توربین بر حسب زمان



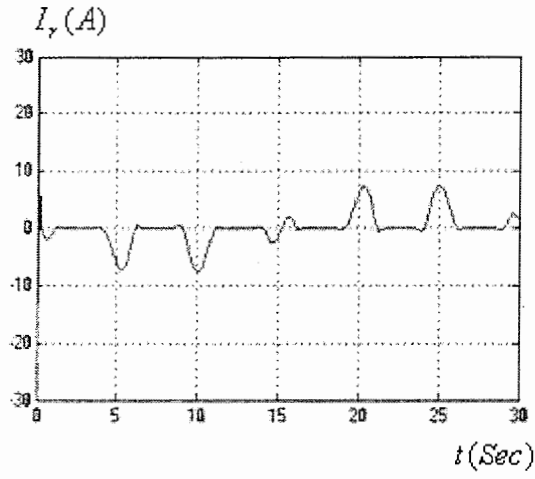
۴-۳ دامنه موج خارج از محفظه بر حسب زمان



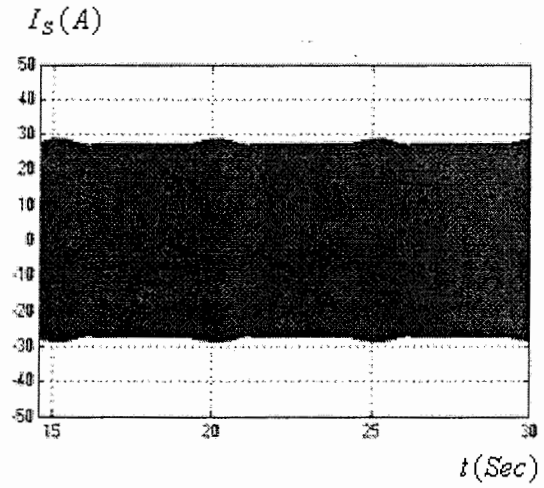
شکل ۴-۶ ضریب گشتاور بر حسب زمان



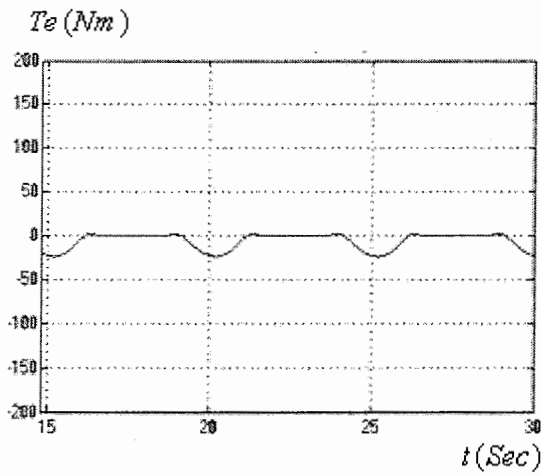
۴-۵ ضریب جریان بر حسب زمان



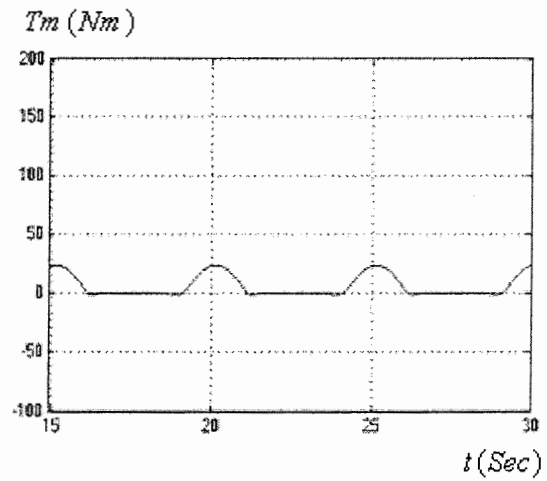
شکل ۴-۸ جریان زوتور بر حسب زمان



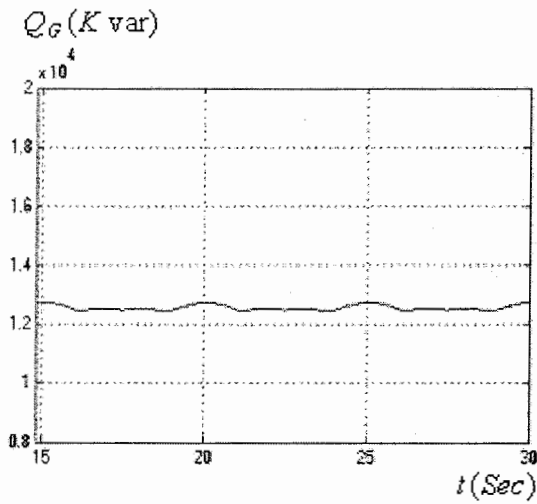
شکل ۴-۷ جریان استاتور بر حسب زمان



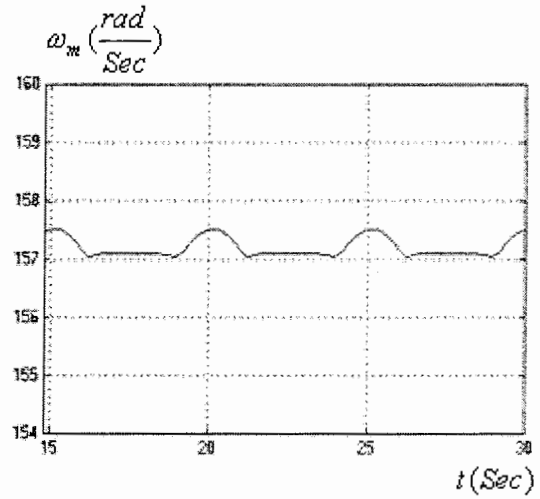
شکل ۴-۱۰ گشتاور الکترومغناطیسی بر حسب زمان



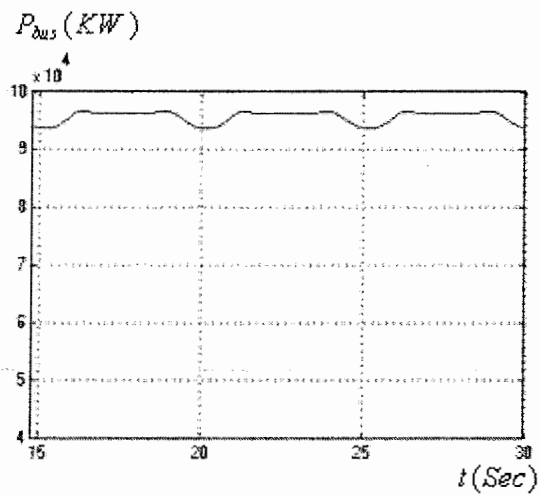
شکل ۴-۹ گشتاور مکانیکی بر حسب زمان



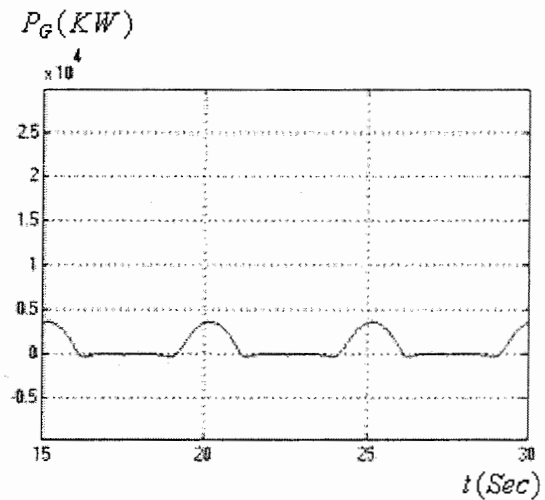
شکل ۴-۱۲ توان راکتیو جذب شده توسط ژنراتور



شکل ۴-۱۱ سرعت روتور بر حسب زمان

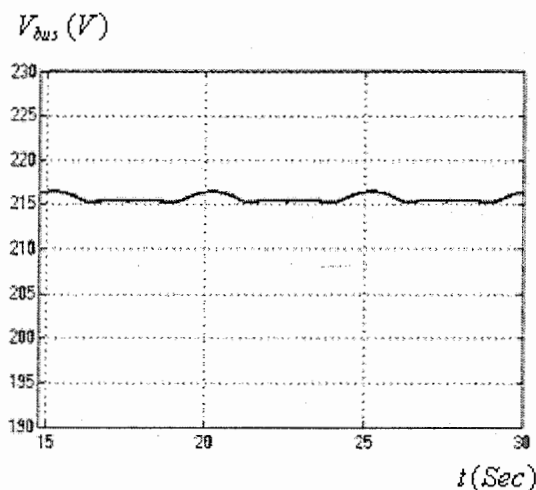


شکل ۴-۱۴ توان تحویلی شبکه به بار

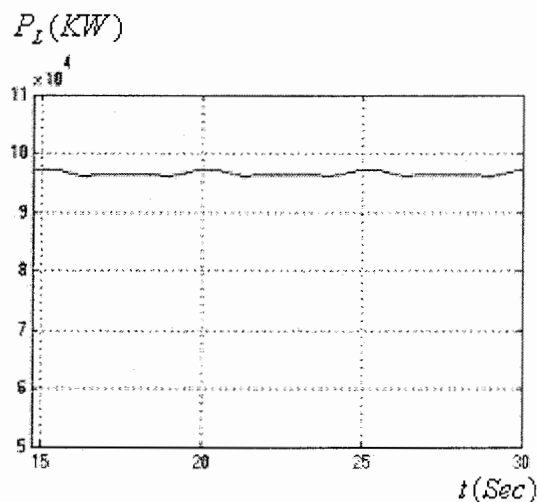


شکل ۴-۱۳ توان اکتیو تحویلی ژنراتور به بار

مجموع توان تحویلی نیروگاه و شبکه به بار $100(KW)$ و ولتاژ موثر دو سر بار در شکل های (۴-۱۵) و (۴-۱۶) نشان داده شده است. در واقع با توجه به چرخش یکطرفه توربین، فرکانس پوش نوسانات مشاهده شده در توان خروجی و ولتاژ دو برابر فرکانس موج است و در صورت افزایش دامنه و فرکانس موج، دامنه و فرکانس پوش نوسانات افزایش پیدا می کند.



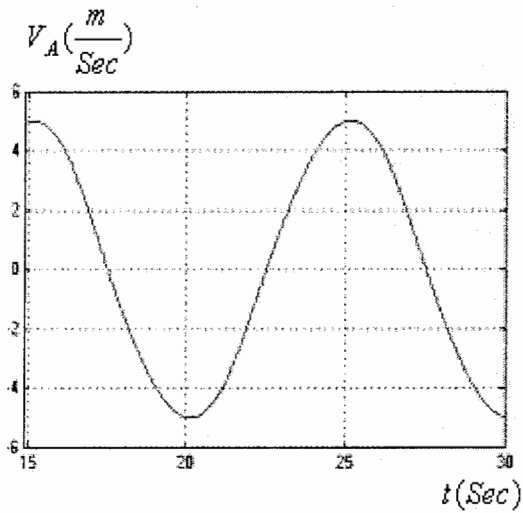
شکل ۴-۱۶ ولتاژ موثر شین مصرف کننده بر حسب زمان



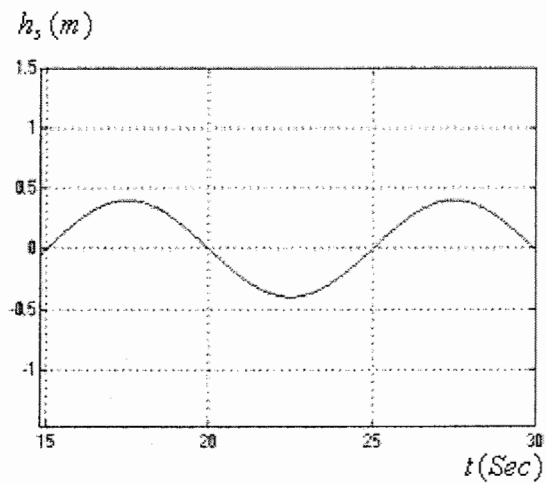
شکل ۴-۱۵ توان تحویلی به بار بر حسب زمان

۴-۲-۱-۲-۴ نیروگاه موجی با توربین ولز در رژیم عملکرد با ضریب شار کوچکتر از 0.4

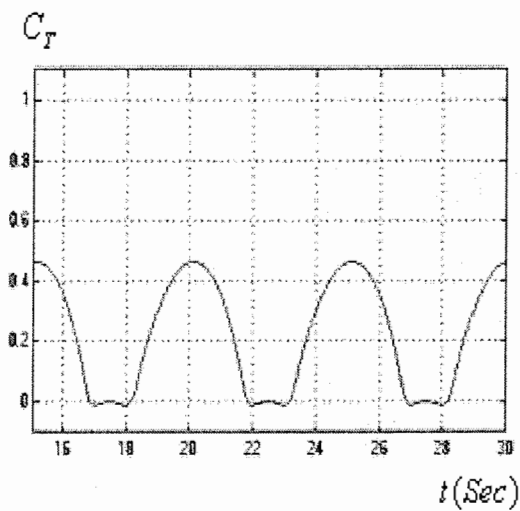
در این بخش با جایگزینی توربین ضربه ای با توربین ولز عملکرد سیستم مجدداً در همان ناحیه کار $\varphi < 0.4$ مورد مطالعه قرار گرفته است. همان طور که از شکل (۴-۱۷) مشاهده می شود ورودی سیستم نیز مشابه حالت قبل است. با مقایسه ضریب گشتاور ایجاد شده توسط توربین ولز (شکل ۴-۲۰) با ضریب گشتاور توربین ضربه ای (شکل ۴-۵)، بدیهی است که در این حالت گشتاور مکانیکی (شکل ۴-۲۳) و در نتیجه راندمان توربین ولز در $\varphi < 0.4$ تحت شرایط یکسان بیشتر از توربین ضربه ای خواهد بود بنابراین سرعت روتور نیز افزایش پیدا خواهد کرد (شکل ۴-۲۵).



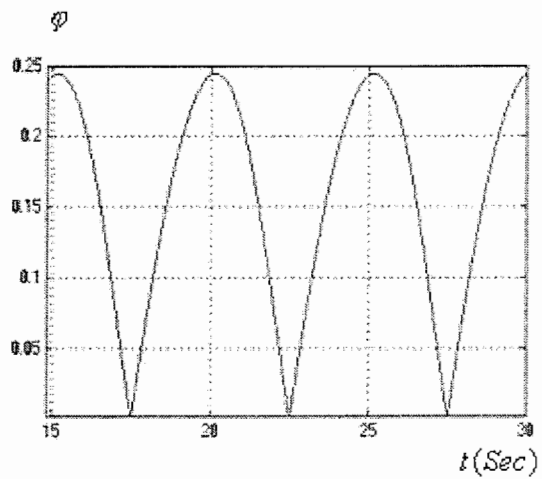
۱۸-۴ سرعت هوا دمیده شده به توربین بر حسب زمان



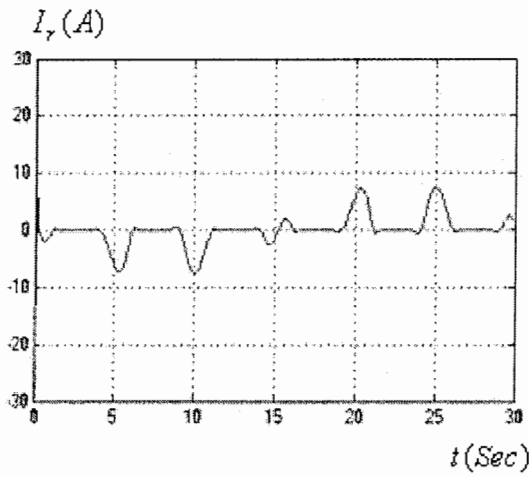
۱۷-۴ دامنه موج خارج از محفظه بر حسب زمان



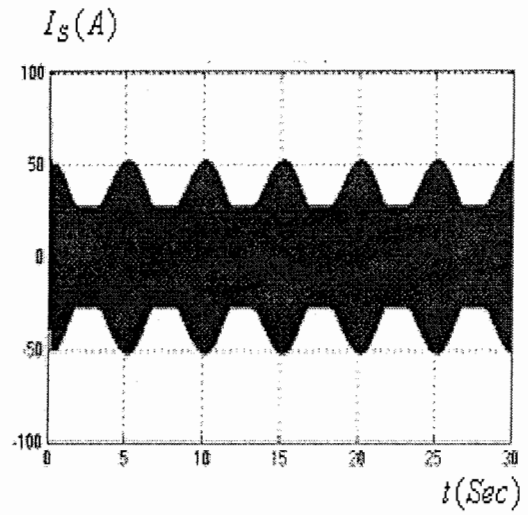
شکل ۲۰-۴ ضریب گشتاور بر حسب زمان



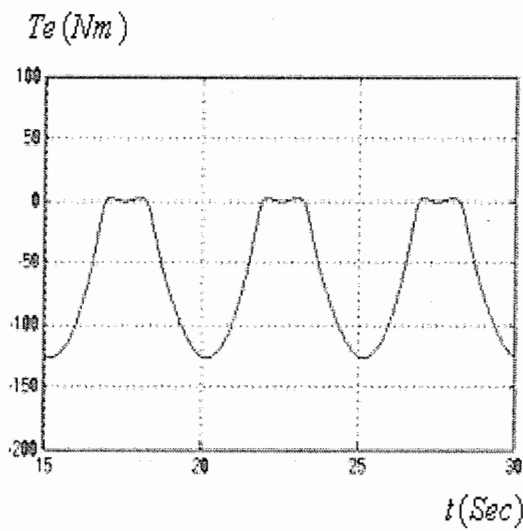
۱۹-۴ ضریب جریان بر حسب زمان



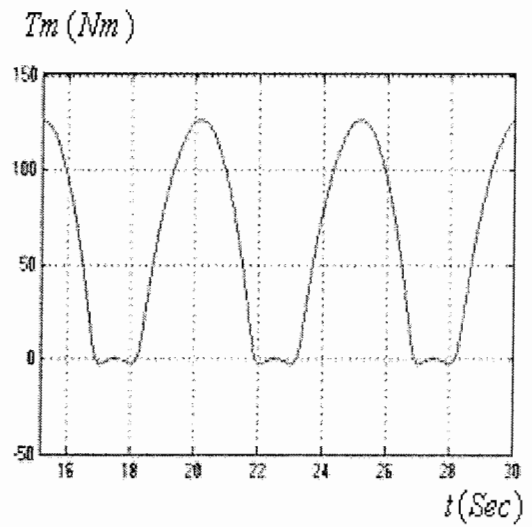
شکل ۲۲-۴ جریان روتور بر حسب زمان



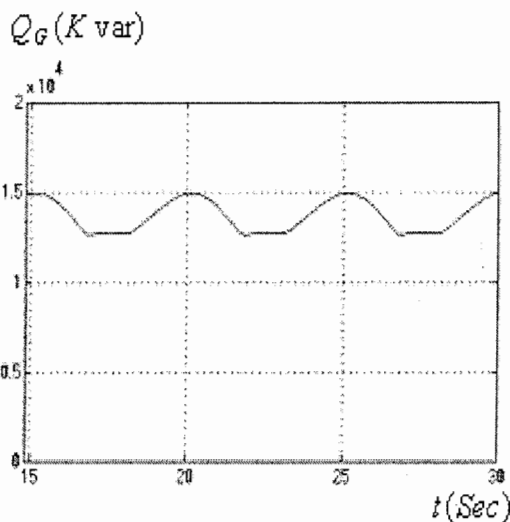
شکل ۲۱-۴ جریان استاتور بر حسب زمان



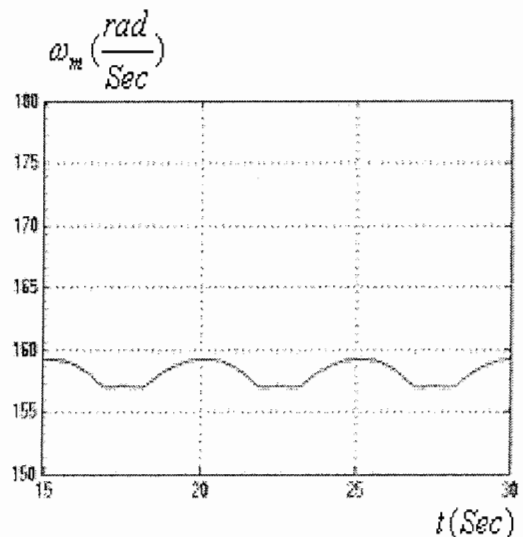
شکل ۲۴-۴ گشتاور الکترومغناطیسی بر حسب زمان



شکل ۲۳-۴ گشتاور مکانیکی بر حسب زمان

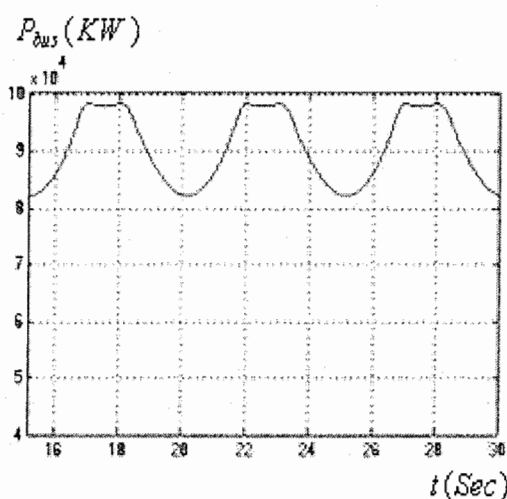


شکل ۲۶-۴ توان راکتیو جذب شده توسط ژنراتور

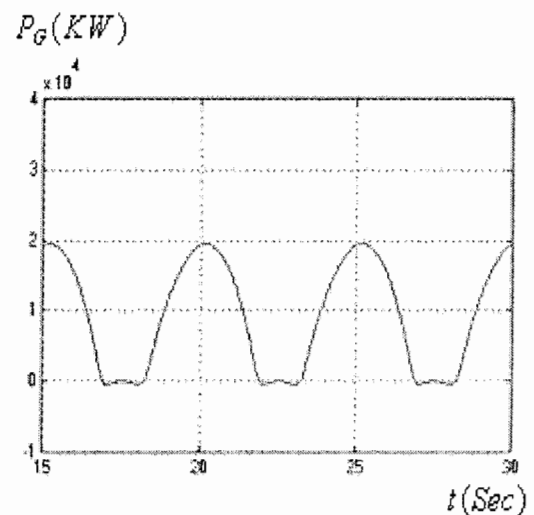


شکل ۲۵-۴ سرعت روتور بر حسب زمان

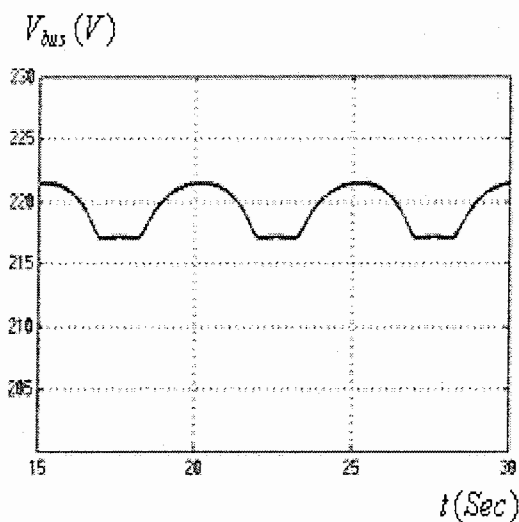
توان تحویلی ژنراتور و شبکه به بار در شکل (۲۷-۴) و (۲۸-۴) نشان داده شده است. با توجه به شکل های (۲۷۴-۴) و (۲۸-۴) در این حالت نیروگاه با توربین ولز نسبت به توربین ضربه ای نقش بیشتری در تغذیه بار خواهد داشت و طبعاً نوسانات ولتاژ دو سر بار نیز بیشتر خواهد بود. بنابراین در صورتی که شرایط مکانیکی و جوی (از قبیل ابعاد توربین، ابعاد محفظه OWC، تعداد قطبهای ماشین و شرایط جوی) باعث گردد که توربین در ناحیه $\phi < 0.4$ بهره برداری گردد، بهتر است از توربین ولز استفاده گردد.



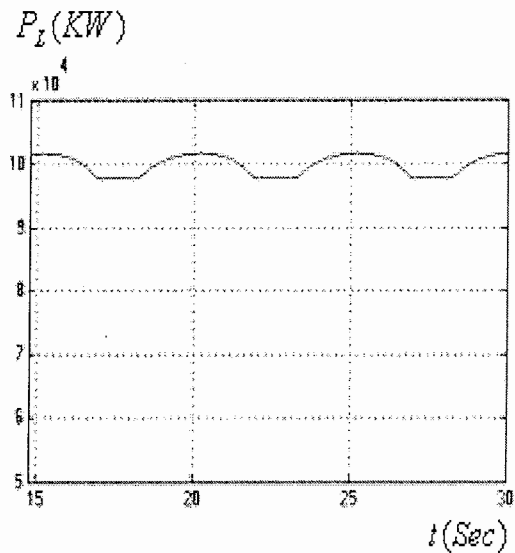
شکل ۲۸-۴ توان تحویلی شبکه به بار



شکل ۲۷-۴ توان اکتیو تحویلی ژنراتور به بار



شکل ۴-۳ ولتاژ موثر شین مصرف کننده بر حسب زمان



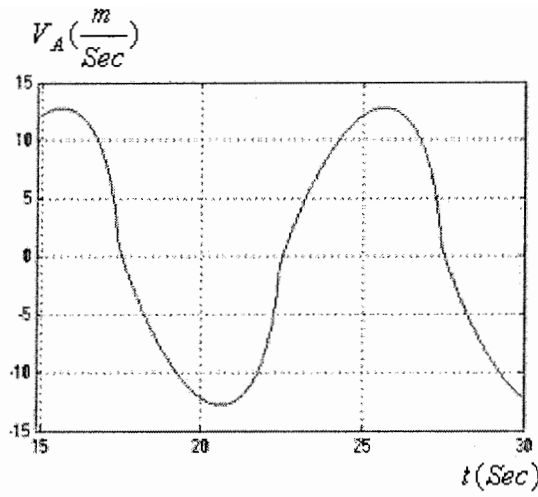
شکل ۴-۲۹ توان تحویلی به بار بر حسب زمان

۲-۲-۴ نیروگاه موجی در رژیم عملکرد با ضریب شار بزرگتر از ۰/۴

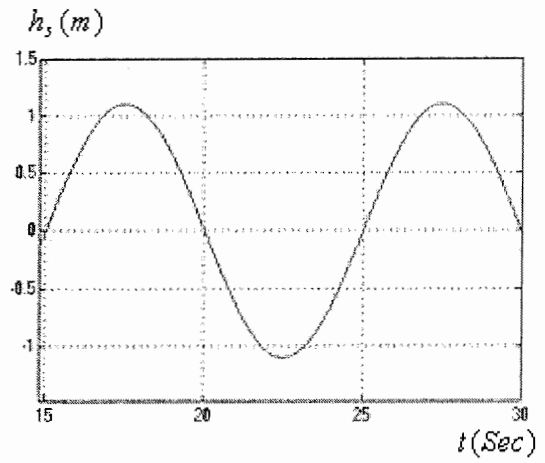
در این بخش با افزایش دامنه موج ورودی، نیروگاه در ناحیه کار توربین $\varphi > 0.4$ مورد بهره برداری قرار می گیرد و هر دو توربین در این ناحیه مورد شبیه سازی، مطالعه و مقایسه قرار می گیرند.

۱-۲-۲-۴ نیروگاه موجی با توربین ضربه ای در رژیم عملکرد با ضریب شار بزرگتر از ۰/۴

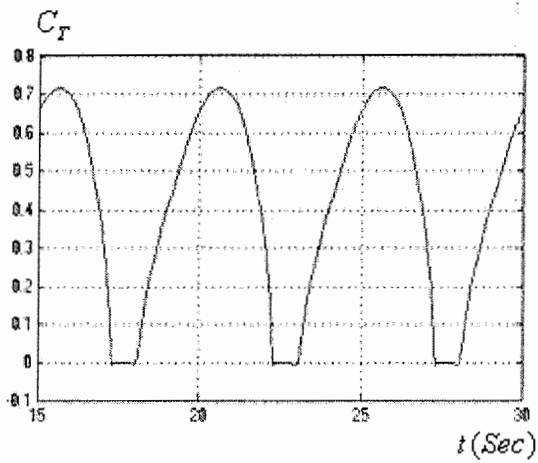
همان طور که گفته شد با ثابت در نظر گرفتن پارامترهای مکانیکی نیروگاه و فقط با افزایش دامنه موج ورودی (شکل ۴-۳۱) ناحیه کار توربین در $\varphi > 0.4$ قرار می گیرد. با توجه به شکل (۲-۴) در ناحیه $\varphi > 0.4$ در توربین ضربه ای بر خلاف توربین ولز با افزایش ضریب جریان (شکل ۴-۳۳)، ضریب گشتاور (شکل ۴-۳۴) و در نتیجه گشتاور مکانیکی (شکل ۴-۳۸) افزایش پیدا می کند.



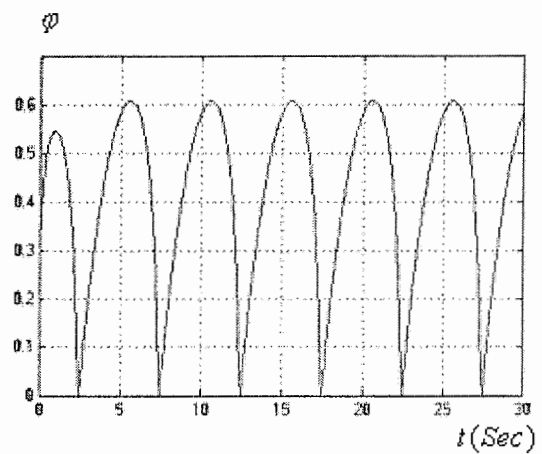
۳۲-۴ سرعت هوا دمیده شده به توربین بر حسب زمان



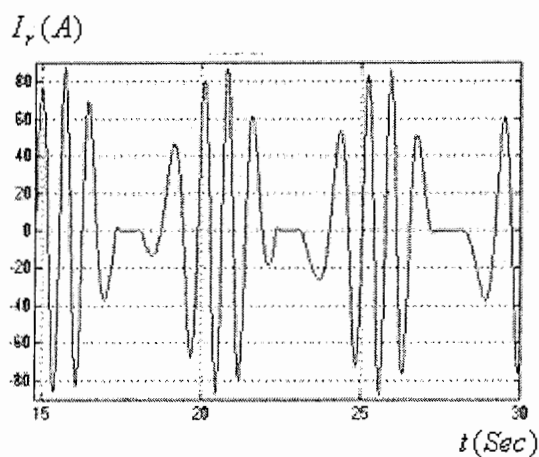
۳۱-۴ دامنه موج خارج از محفظه بر حسب زمان



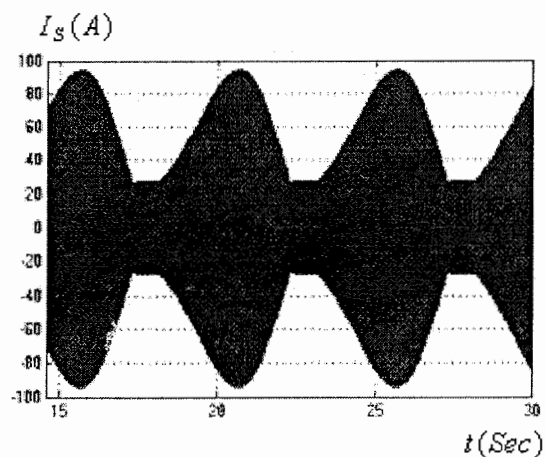
شکل ۳۴-۴ ضریب گشتاور بر حسب زمان



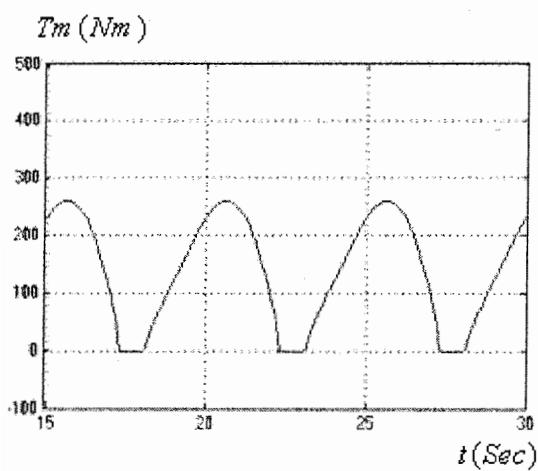
۳۳-۴ ضریب جریان بر حسب زمان



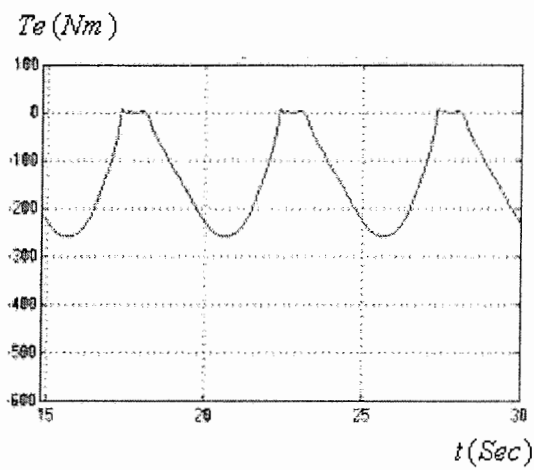
شکل ۴-۳۶ جریان روتور بر حسب زمان



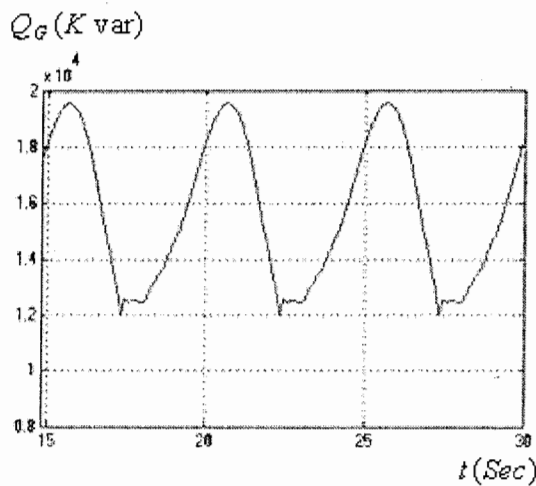
شکل ۴-۳۵ جریان استاتور بر حسب زمان



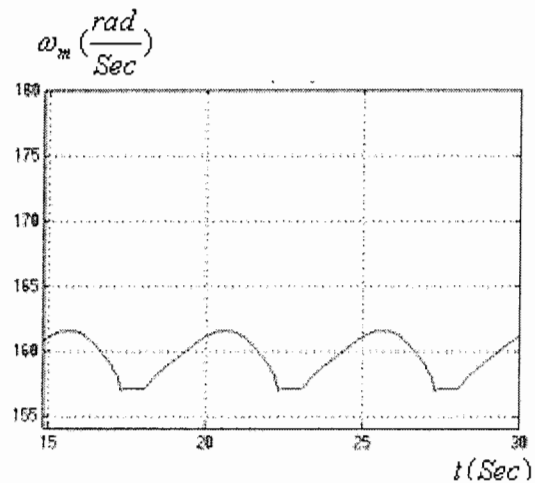
شکل ۴-۳۸ گشتاور مکانیکی بر حسب زمان



شکل ۴-۳۷ گشتاور الکترومغناطیسی بر حسب زمان

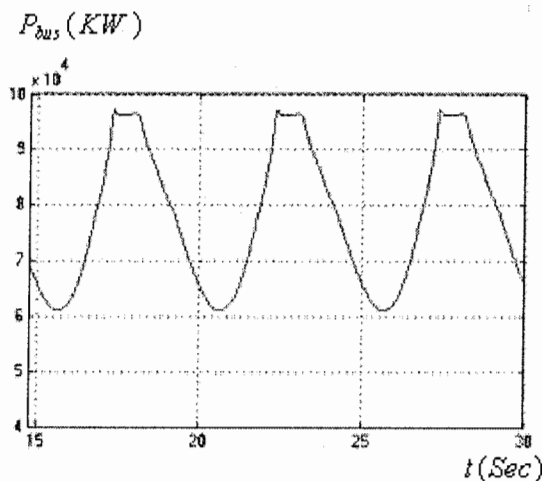


شکل ۴-۴۰ توان راکتیو جذب شده توسط ژنراتور

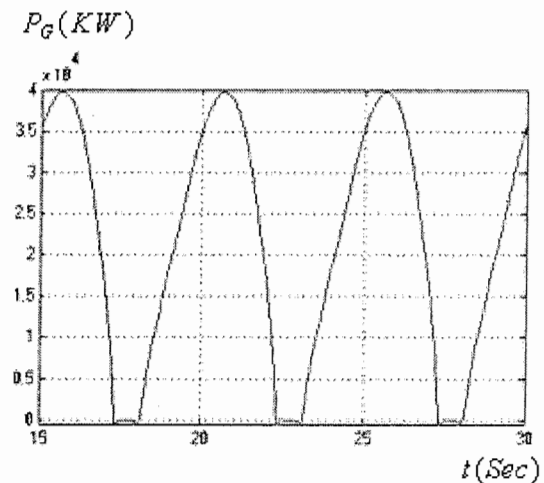


شکل ۴-۳۹ سرعت روتور بر حسب زمان

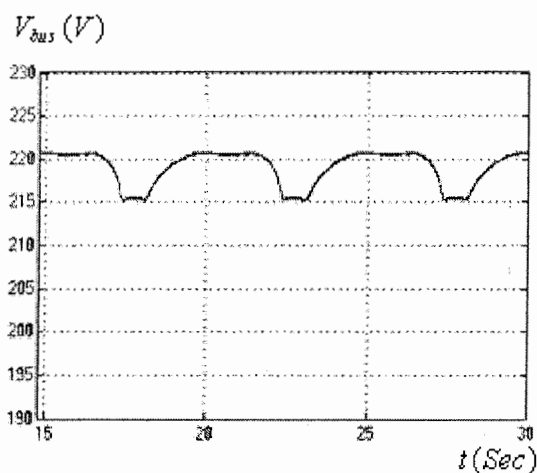
در شکل های (۴-۴۱) و (۴-۴۲) توان تحویلی ژنراتور و توان تحویلی شبکه به بار نشان داده شده است. در این حالت توان متوسط تحویلی ژنراتور حدود ۲۵ (KW) است. اثر نوسانات توان تحویلی بر ولتاژ باس مصرف کننده در شکل (۴-۴۴) نشان داده شده است.



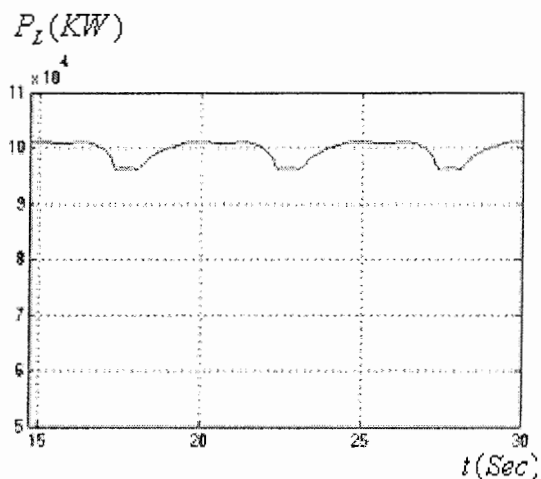
شکل ۴-۴۲ توان تحویلی شبکه به بار



شکل ۴-۴۱ توان اکتیو تحویلی ژنراتور به بار



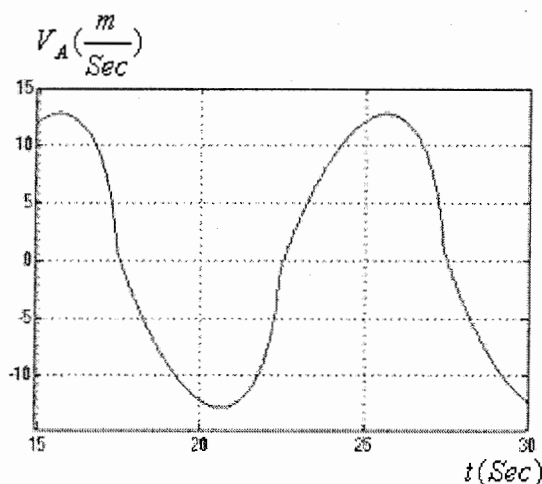
شکل ۴-۴ ولتاژ موثر شین مصرف کننده بر حسب زمان



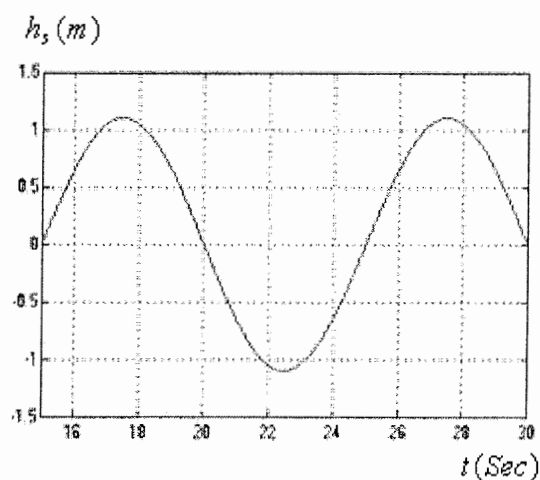
شکل ۴-۳ توان تحویلی به بار بر حسب زمان

۴-۲-۲-۲ نیروگاه موجی با توربین ولز در رژیم عملکرد با ضریب شار بزرگتر از ۰/۴

در این بخش با جایگزینی مدل توربین ولز نتایج مجدداً در همان ناحیه کار $\phi > 0.4$ مورد مطالعه قرار گرفته است. همان طور که از شکل (۴-۴۵) مشاهده می شود ورودی سیستم نیز مشابه حالت قبل است.

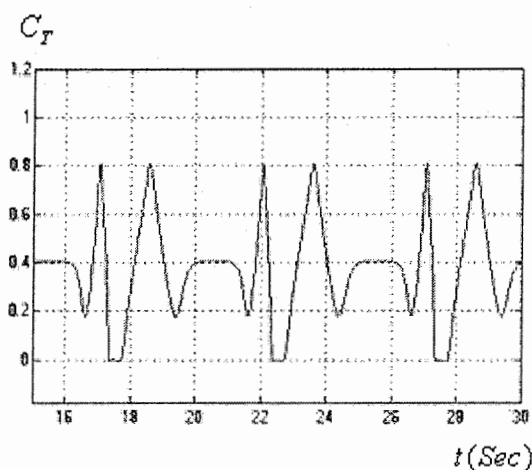


۴-۴۶ سرعت هوا دمیده شده به توربین بر حسب زمان

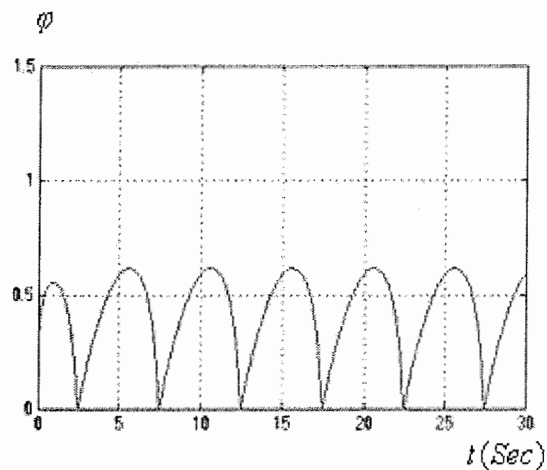


۴-۴۵ دامنه موج خارج از محفظه بر حسب زمان

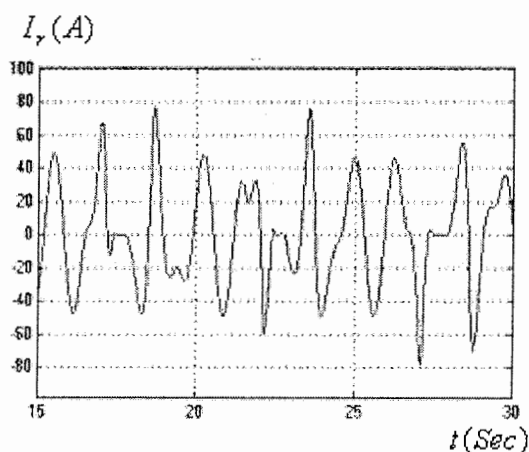
در شکل (۴-۴۷) ضریب جریان بر حسب زمان نشان داده شده است در این حالت ϕ در بازه صفر تا $0/6$ در نظر گرفته شده است. با توجه به منحنی مشخصه توربین ولز ضریب گشتاور (شکل ۴-۴۸) در بازه حدود $0/1$ تا $0/4$ روند افزایشی و بعد از آن سیر کاهشی پیدا می کند و این امر باعث کاهش گشتاور مکانیکی (شکل ۴-۵۱) و در نتیجه کاهش راندمان توربین می گردد. شکستگیهای قابل مشاهده تقریباً در همه گراف ها به علت تغییر ناحیه عملکرد توربین می باشد. این شکستگیها می تواند جهت شناسایی تغییرات رژیم عملکرد ماشین و کنترل سیستم مورد بهره برداری قرار گیرد.



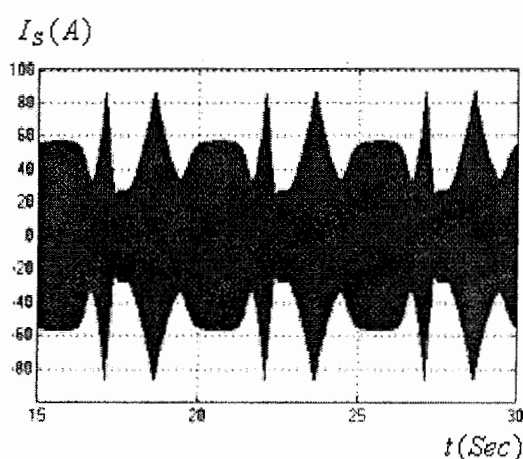
شکل ۴-۴۸ ضریب گشتاور بر حسب زمان



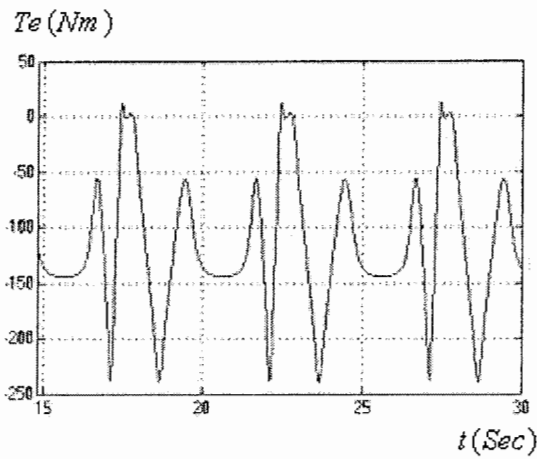
شکل ۴-۴۷ ضریب جریان بر حسب زمان



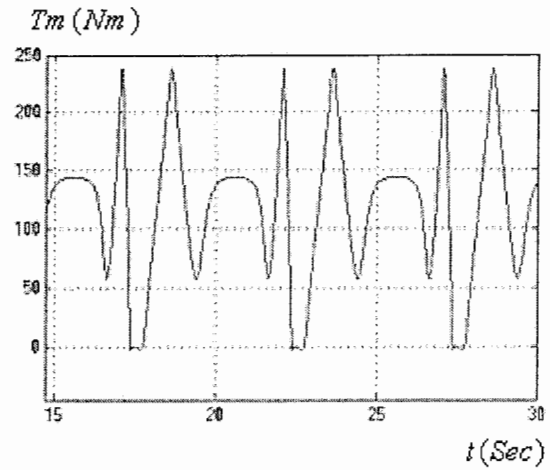
شکل ۴-۵۰ جریان روتور بر حسب زمان



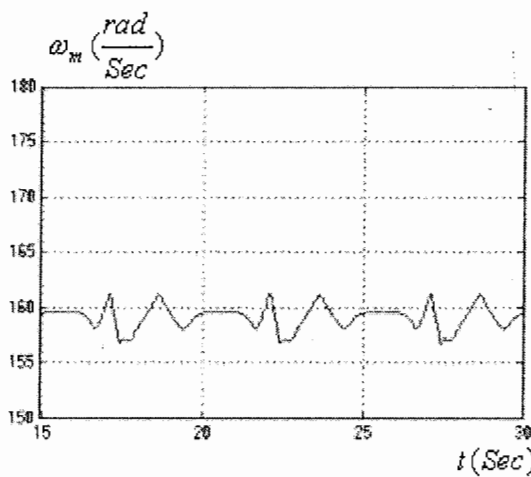
شکل ۴-۴۹ جریان استاتور بر حسب زمان



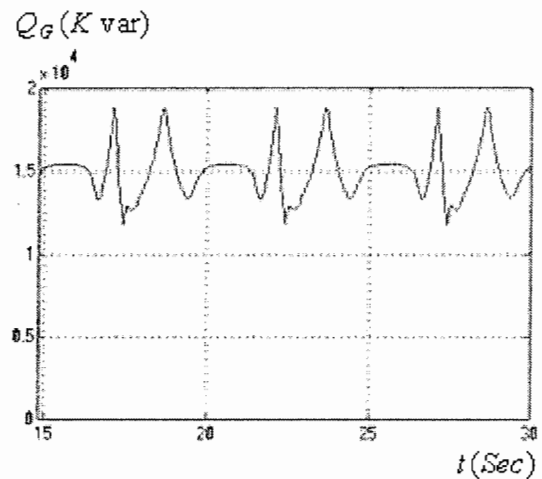
شکل ۴-۵۲ گشتاور الکترومغناطیسی بر حسب زمان



شکل ۴-۵۱ گشتاور مکانیکی بر حسب زمان



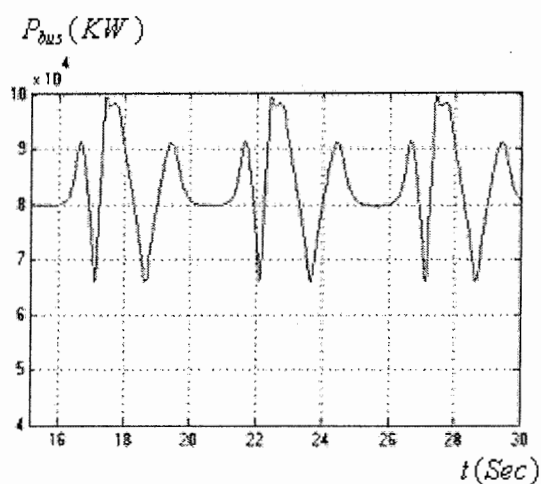
شکل ۴-۵۴ سرعت روتور بر حسب زمان



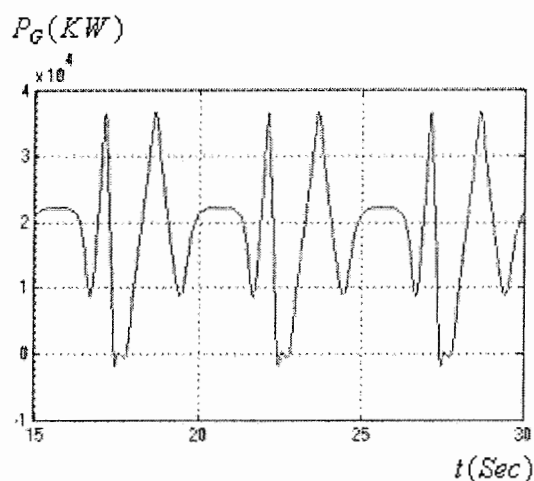
شکل ۴-۵۳ توان راکتیو جذب شده بر حسب زمان

توان تحویلی از ژنراتور و شبکه به بار در شکل های (۴-۵۵) و (۴-۵۶) نشان داده شده است و در واقع مجموع آنها توان کل تحویلی به بار (شکل ۴-۵۷) را تامین می باشد. در این حالت متوسط توان ژنراتور حدود $20 (KW)$ است در صورتی که توان اخذ شده از توربین ضربه ای در شرایط مشابه حدود $25 (KW)$ تخمین زده شد و با افزایش φ این اختلاف بیشتر خواهد شد. بنابراین می توان ادعا کرد که در ناحیه $\varphi > 0.4$ راندمان توربین ضربه ای معمولا بیشتر از توربین ولز است و در صورتی که شرایط مکانیکی و جوی (از قبیل ابعاد توربین، ابعاد محفظه OWC، تعداد قطبهای ماشین و شرایط جوی) باعث گردد که توربین در ناحیه $\varphi > 0.4$ بهره برداری گردد بهتر است از توربین ضربه ای استفاده گردد.

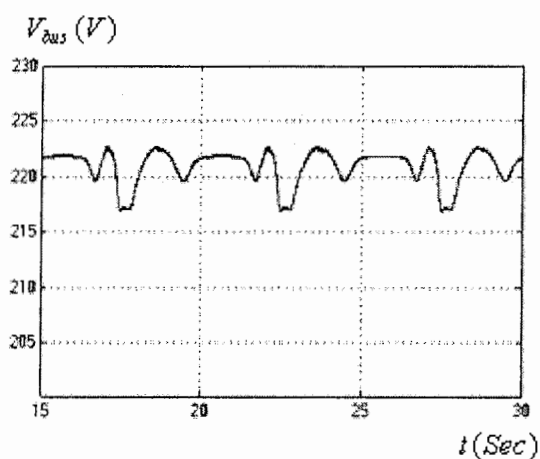
همچنین ولتاژ در باس مصرف کننده ولتاژ باس مصرف کننده برای نیروگاه موجی با توربین و لزد در شکل (۴-۵۸) نشان داده شده است.



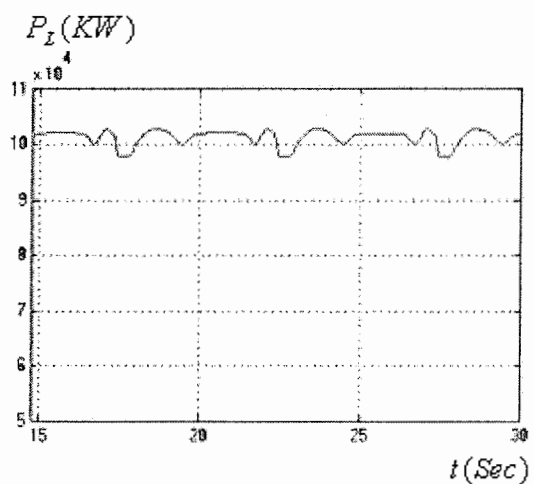
شکل ۴-۵۶ توان تحویلی شبکه به بار بر حسب زمان



شکل ۴-۵۵ توان اکتیو تحویلی ژنراتور به بار بر حسب زمان



شکل ۴-۵۸ ولتاژ موثر شین مصرف کننده بر حسب زمان



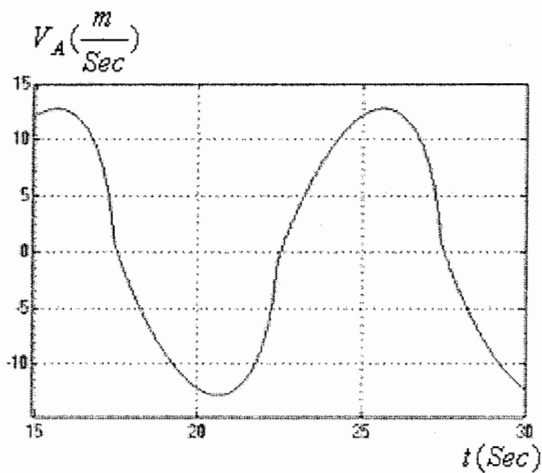
شکل ۴-۵۷ توان تحویلی به بار بر حسب زمان

۴-۲-۳ نیروگاه موجی با توربین های ولز و ضربه ای و ژنراتور روتور سیم پیچی شده

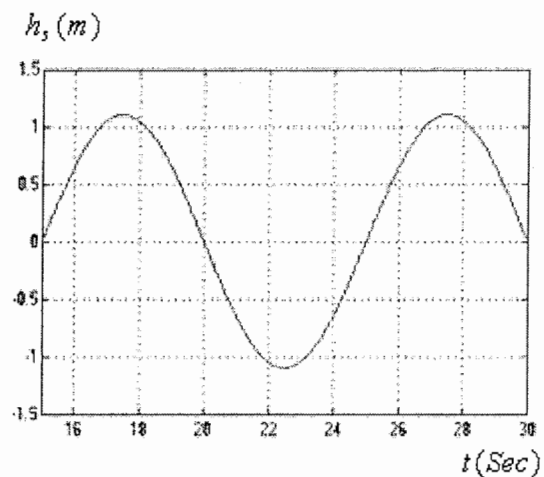
هما نظور که در بخش شبیه سازی ماثین بحث شد با افزایش مقاومت روتور، سرعت چرخش روتور افزایش پیدا می کند و با توجه به اینکه $T_T = K \times C_T (V_A^2 + (r \times \omega)^2)$ است، با افزایش سرعت روتور راندمان توربین و گشتاور مکانیکی می تواند افزایش پیدا کند. در شبیه سازی های قبل در حالت اعمال موج ورودی با دامنه $0.4(m)$ توربین در ناحیه کار کوچکتر از 0.4 مورد بهره برداری قرار گرفت. با وجود آنکه افزایش سرعت رتور تاثیر مستقیم بر گشتاور توربین خواهد داشت ولی در این ناحیه با توجه به اینکه کاهش ضریب جریان (ناشی از افزایش سرعت) باعث کاهش ضریب گشتاور و گشتاور توربین می گردد، وجود مقاومت خارجی تاثیر قابل توجهی در افزایش راندمان نخواهد داشت بنابراین در ادامه، نتایج به سیگنال ورودی با دامنه $1/1(m)$ محدود می گردد.

۴-۲-۳-۱ نیروگاه موجی با ژنراتور روتور سیم پیچی شده و توربین ضربه ای

همان طور که گفته شد در این بخش اثر افزایش مقاومت روتور در افزایش راندمان توربین ضربه ای و توان تحویلی نیروگاه مورد بررسی قرار می گیرد. در شکل (۴-۵۹) شکل موج ورودی نشان داده شده است که مشابه حالت قبل در نظر گرفته شده است و سرعت متناظر آن در شکل (۴-۶۰) نشان داده می شود.



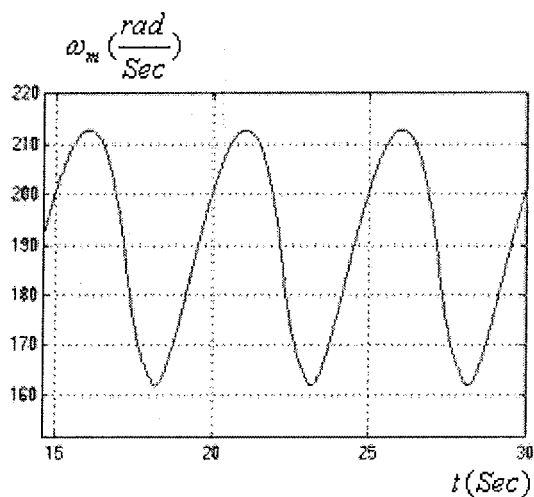
۴-۶۰ سرعت هوا دمیده شده به توربین بر حسب زمان



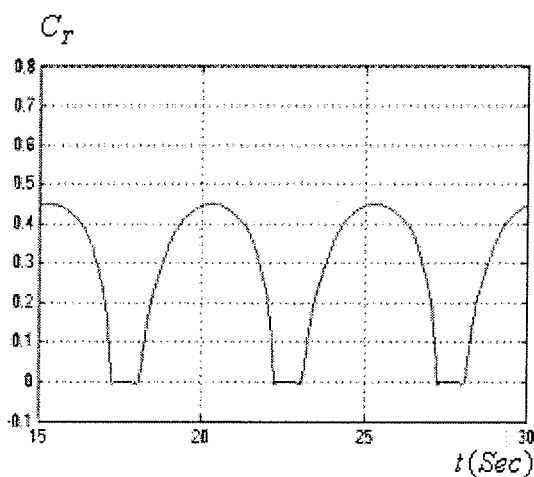
۴-۵۹ دامنه موج خارج از محفظه بر حسب زمان

با توجه به شکل زیر و مقایسه آن با شکل (۴-۳۹) مشاهده می شود که با افزایش مقاومت روتور، سرعت روتور (شکل ۴-۶۱) افزایش و ضریب شار ϕ (شکل ۴-۶۲) کاهش پیدا می کند که نتیجه آن

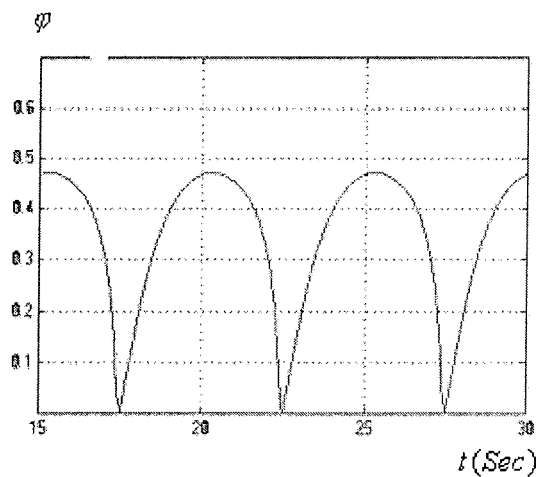
برای توربین ضربه ای کاهش ضریب گشتاور C_T (شکل ۴-۶۳) و نهایتاً کاهش گشتاور (شکل ۴-۶۴) و راندمان توربین است که این نتیجه با توجه به منحنی مشخصه توربین ضربه ای قابل توجیه است.



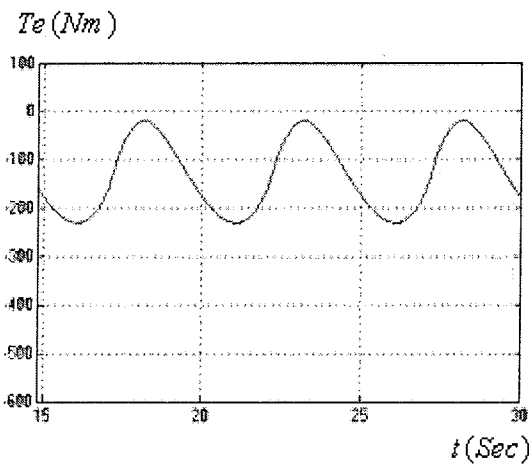
شکل ۴-۶۱ منحنی سرعت روتور بر حسب زمان



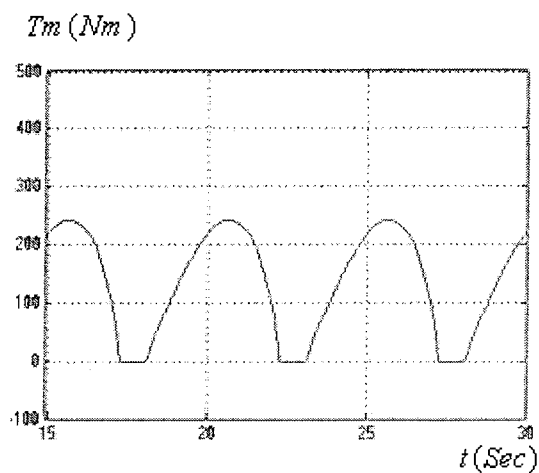
شکل ۴-۶۳ ضریب گشتاور بر حسب زمان



شکل ۴-۶۲ ضریب جریان بر حسب زمان

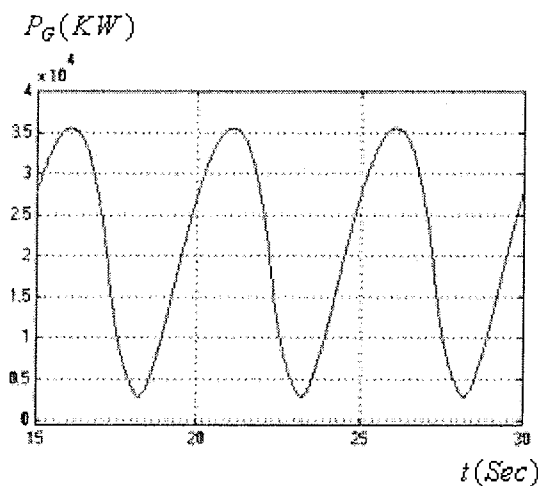


شکل ۴-۶۵ گشتاور الکترومغناطیسی بر حسب زمان

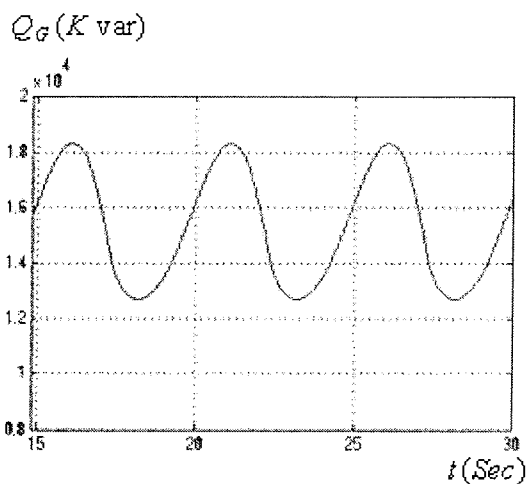


شکل ۴-۶۴ گشتاور مکانیکی بر حسب زمان

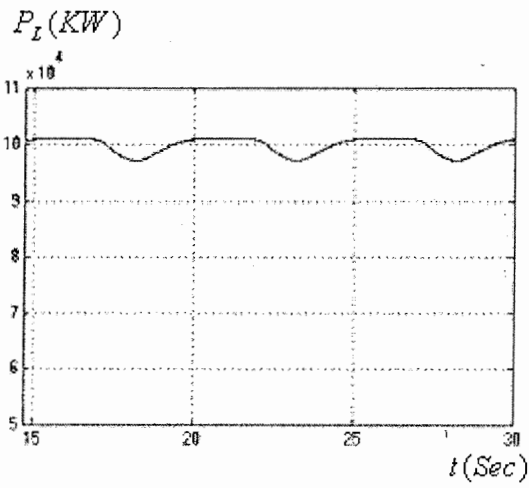
توان راکتیو دریافتی و توان اکتیو تحویلی نیروگاه در شکل های (۴-۶۶) و (۴-۶۷) نشان داده شده است. با توجه به اشکال فوق نوسان توان در حالت وجود مقاومت اضافی در روتور کمی کاهش پیدا کرده و همین امر باعث کاهش نامحسوس ریپل در توان تحویلی به بار (شکل ۴-۶۹) و فلیکر ولتاژ (شکل ۴-۷۰) شده است. ولی همان طور که انتظار میرفت در این حالت (افزایش مقاومت روتور) راندمان توربین ضربه ای و در نتیجه توان تحویلی از ژنراتور به شبکه را کاهش می دهد. در این شبیه سازی توان ژنراتور از ۲۵ به کمتر از ۲۴ کاهش پیدا کرده است. بنابراین در این حالت استفاده از ماشین القایی قفسه سنجایی با توجه به مزایای آن نسبت به ماشین روتور سیم پیچی شده شاید منطقی تر باشد.



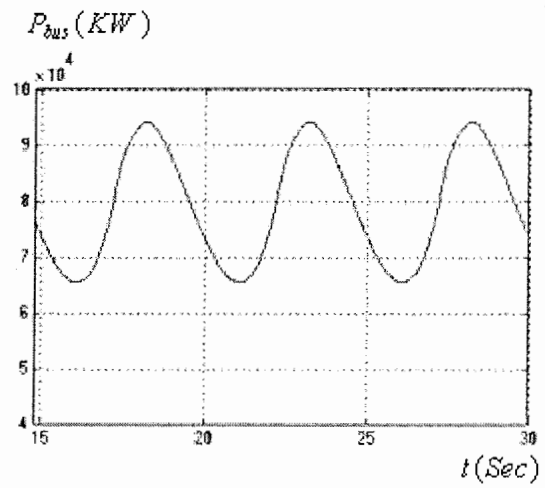
شکل ۴-۶۷ توان اکتیو تحویلی ژنراتور به بار بر حسب زمان



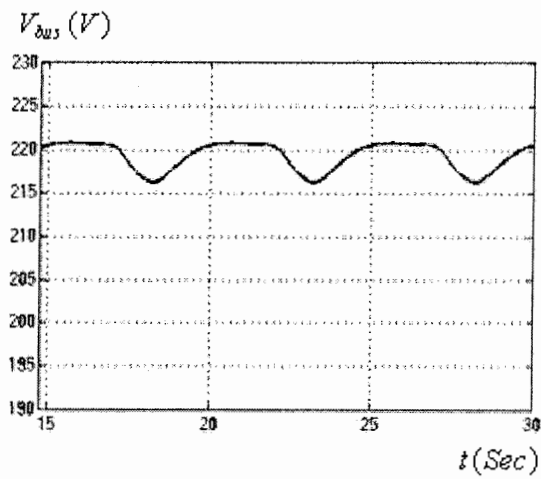
شکل ۴-۶۶ توان راکتیو جذب شده توسط ژنراتور بر زمان



شکل ۴-۶۹ توان تحویلی به بار بر حسب زمان



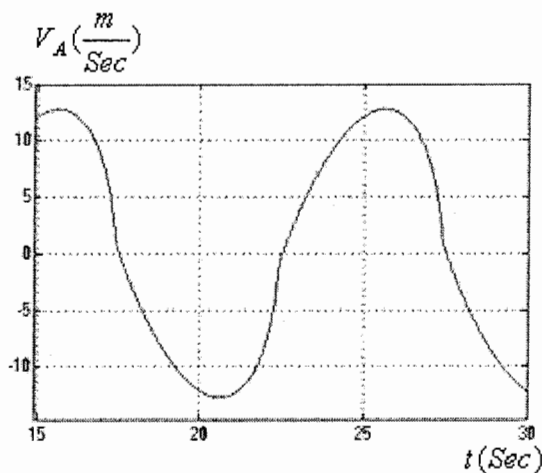
شکل ۴-۶۸ توان تحویلی شبکه به بار بر حسب زمان



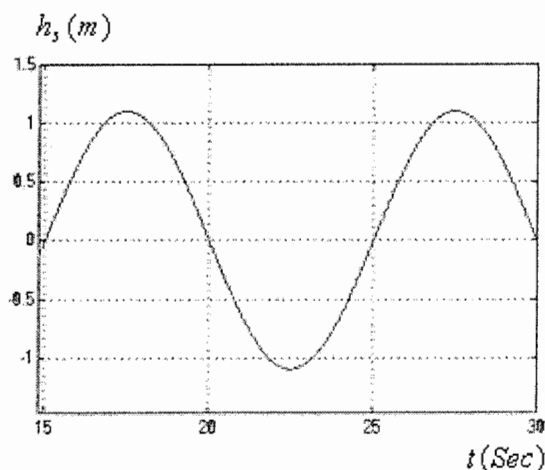
شکل ۴-۷۰ ولتاژ موثر شین مصرف کننده بر حسب زمان

۲-۳-۲-۲-۴ نیروگاه موجی با ژنراتور روتور سیم پیچی شده و توربین ولز

در شکل زیر شکل موج ورودی (شکل ۴-۷۱) و سرعت متناظر مربوط به آن (شکل ۴-۷۲) نشان داده شده و مشابه حالت قبل مشاهده می شود.

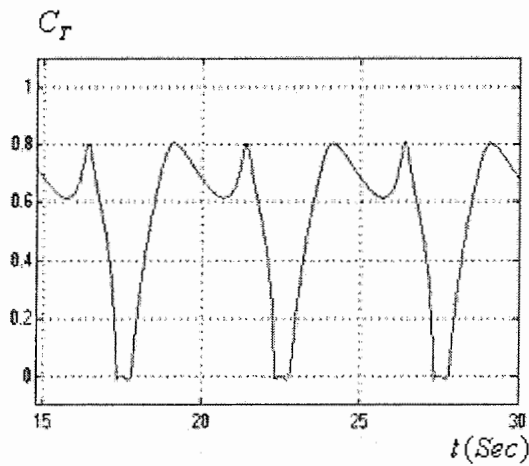


۴-۷۲ سرعت هوا دمیده شده به توربین بر حسب زمان

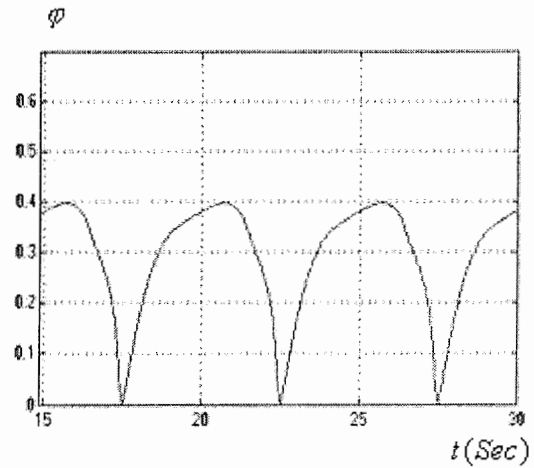


۴-۷۱ دامنه موج خارج از محفظه بر حسب زمان

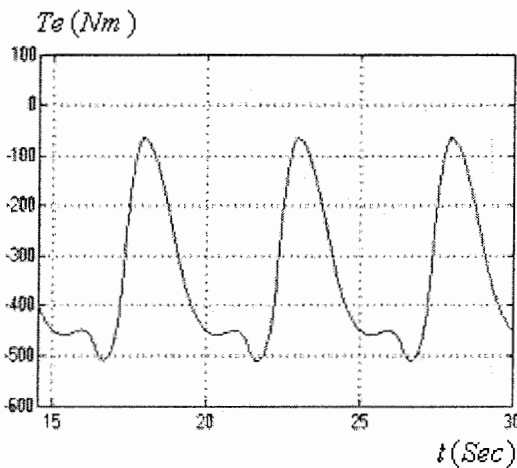
در این حالت با افزایش مقاومت روتور، سرعت ژنراتور افزایش پیدا کرده و در نتیجه ضریب جریان φ (شکل ۴-۷۳) کاهش پیدا می کند و توربین در نقطه ای مورد بهره برداری قرار می گیرد که ضریب گشتاور (شکل ۴-۷۴) به مقدار ماکزیمم نزدیک شده است. (منحنی مشخصه توربین ولز نشان می دهد که در حوالی $\varphi = 0.35$ ضریب گشتاور ماکزیمم می شود).
با توجه به آنکه در این شرایط سرعت روتور و ضریب گشتاور تواما افزایش پیدا می کند بنابراین، افزایش گشتاور توربین (شکل ۴-۷۵) قابل توجه است.



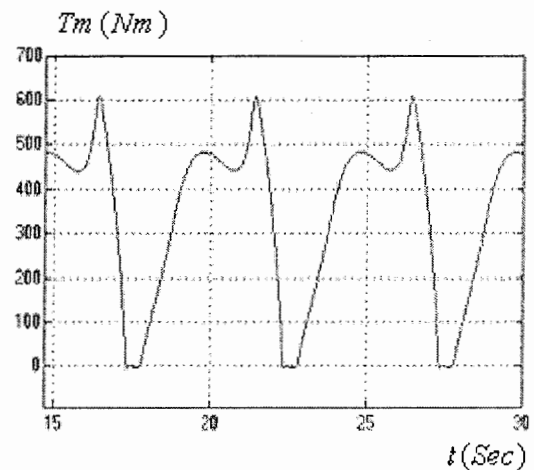
شکل ۴-۷۴ ضریب گشتاور بر حسب زمان



شکل ۴-۷۳ ضریب جریان بر حسب زمان

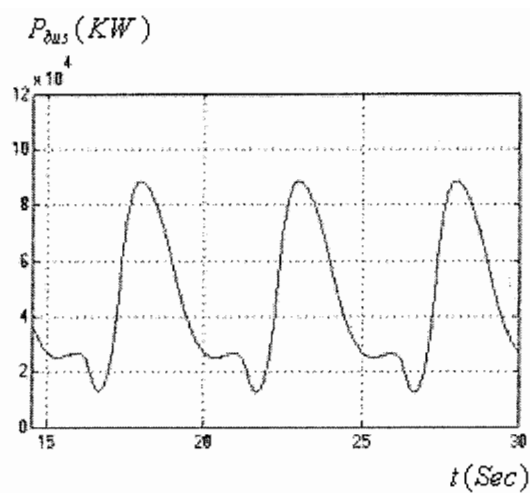


شکل ۴-۷۶ گشتاور الکترومغناطیسی بر حسب زمان

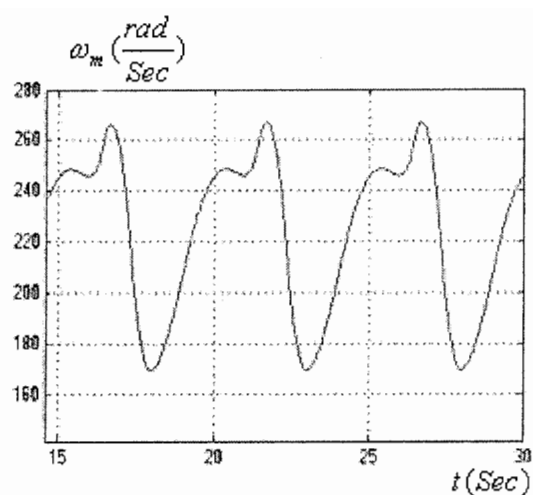


شکل ۴-۷۵ گشتاور مکانیکی بر حسب زمان

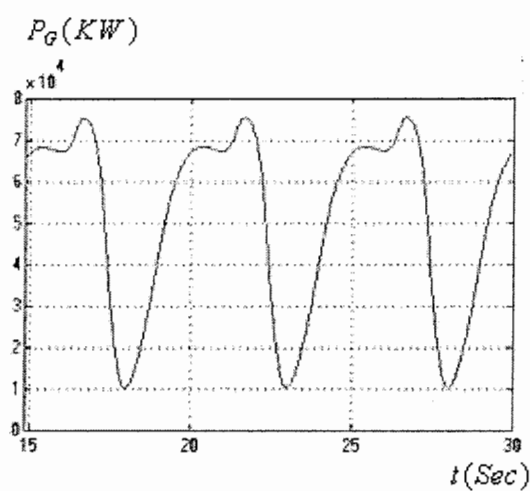
در شکل (۴-۷۷) منحنی سرعت روتور نشان داده شده است در این حالت وجود مقاومت خارجی روتور و همچنین افزایش ناگهانی گشتاور توربین، باعث تشدید نوسانات سرعت روتور شده است. توان راکتیو مصرفی و توان اکتیو تولیدی به ترتیب در شکل (۴-۷۹) و (۴-۸۰) نشان داده شده است. همانطور که مشاهده می شود در این حالت توان نیروگاه و نوسانات آن افزایش پیدا کرده است. این نوسانات توان به شدت ولتاژ بار محلی (شکل ۴-۸۲) را تحت تاثیر قرار می دهد. نوسانات شدید ولتاژ می تواند عملکرد نرمال شبکه را مختل ساخته کند.



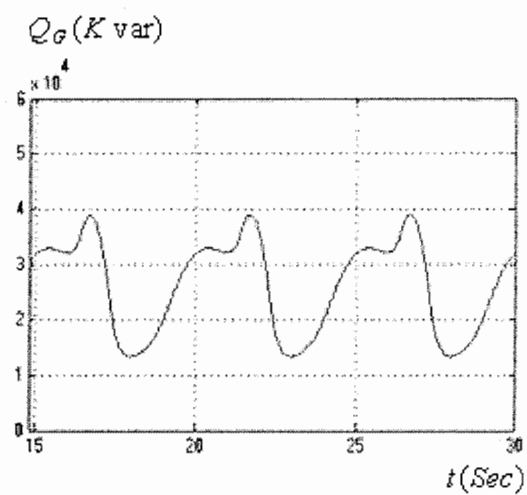
شکل ۴-۷۸ توان تحویلی شبکه به بار بر حسب زمان



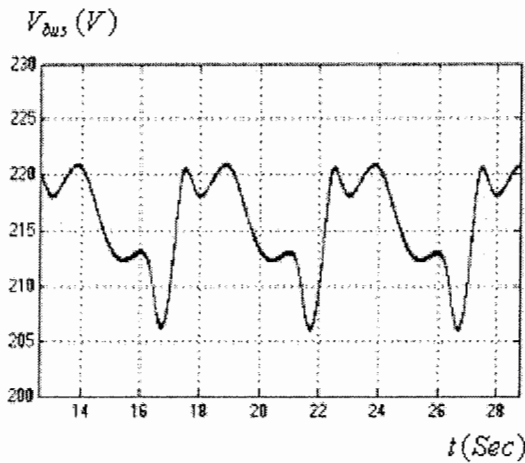
شکل ۴-۷۷ سرعت روتور بر حسب زمان



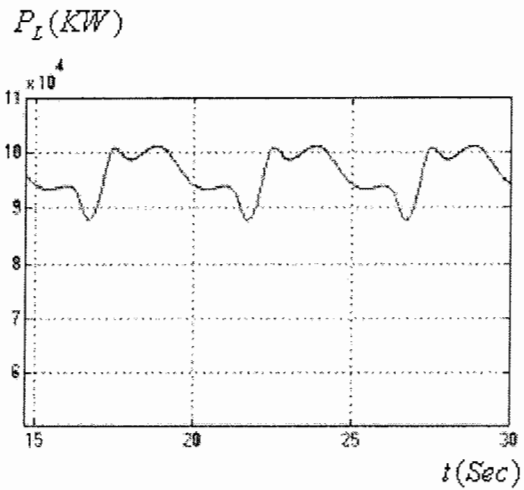
شکل ۴-۸۰ توان اکتیو تحویلی ژنراتور به بار



شکل ۴-۷۹ توان راکتیو جذب شده توسط ژنراتور



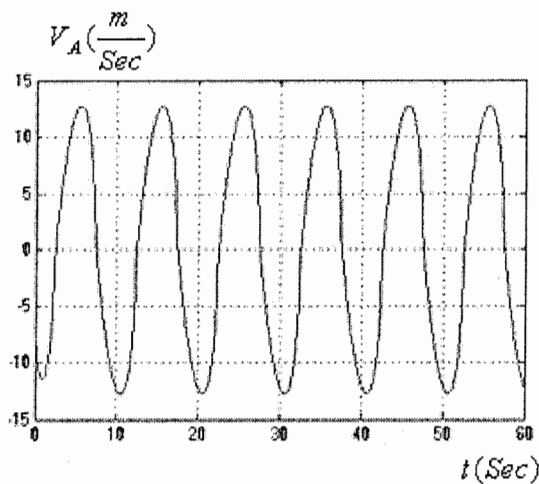
شکل ۴-۸۲ ولتاژ موثر شین مصرف کننده بر حسب زمان



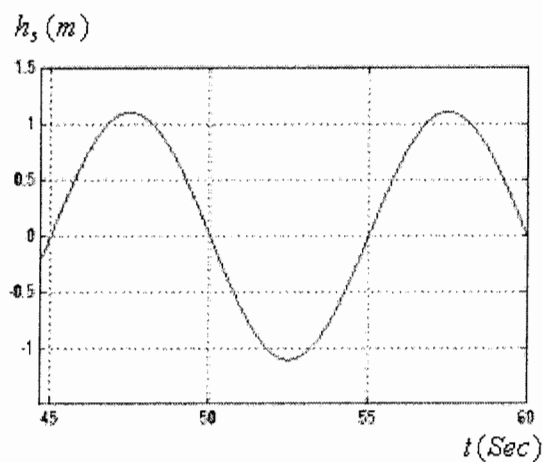
شکل ۴-۸۱ توان تحویلی به بار بر حسب زمان

۴-۲-۲-۳-۳-۳ نیروگاه موجی با توربین ولز، ژنراتور روتور سیم پیچی شده و چرخ طیار

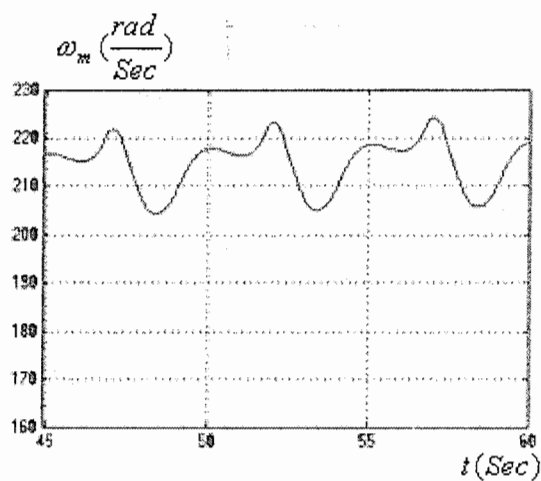
همانطور که در شبیه سازی های قبل مشاهده شد افزایش مقاومت روتور در ناحیه $\varphi > 0.4$ باعث افزایش راندمان نیروگاه می شود ولی از طرفی نوسانات موجود در شبکه را افزایش می دهد. برای کاهش نوسانات می توان با افزایش اینرسی رتور با استفاده از چرخ طیار نوسانات ایجاد شده را کاهش داد. ولی همانطور که انتظار می رود وجود فلاپیویل می تواند راندمان نیروگاه را کمی کاهش دهد. در شبیه سازی های انجام گرفته در این بخش ورودی سیستم (شکل ۴-۸۳) مشابه حالت های قبل انتخاب شده با این تفاوت که اینرسی سیستم از 2 Kg m^2 به 12 Kg m^2 افزایش داده شده است و اثر آن یعنی کاهش نوسانات سرعت روتور بررسی شده است (شکل ۴-۸۵).



۸۴-۴ سرعت هوا دمیده شده به توربین بر حسب زمان

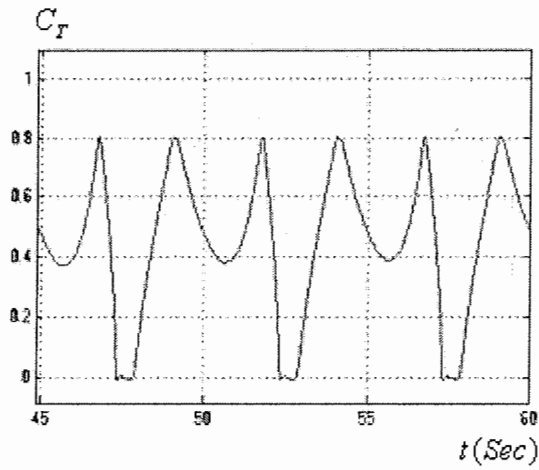


۸۳-۴ دامنه موج خارج از محفظه بر حسب زمان

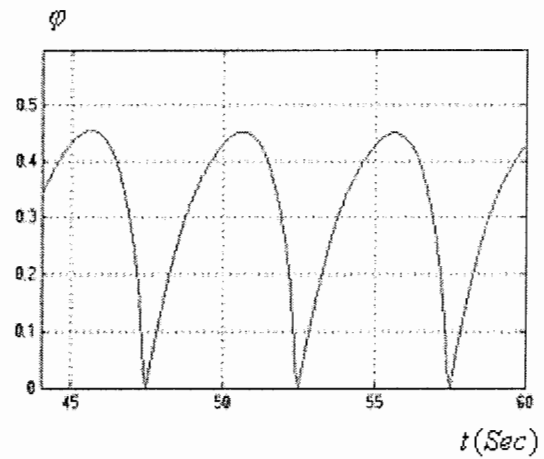


شکل ۸۵-۴ سرعت روتور بر حسب زمان

در این حالت به دلیل کاهش سرعت متوسط روتور، ضریب جریان (شکل ۸۶-۴) افزایش و متوسط ضریب گشتاور (شکل ۸۷-۴) کاهش می یابد که نتیجه آن اثر منفی کم روی کاهش گشتاور توربین (شکل ۸۸-۴) و گشتاور الکترومغناطیسی (شکل ۸۹-۴) است. ولی همانطور که از شکل (۸۹-۴) مشاهده می شود در این حالت نوسانات گشتاور کاهش چشم گیری پیدا کرده است که در واقع به عنوان مزیت اصلی چرخ طیار می تواند بیان شود.

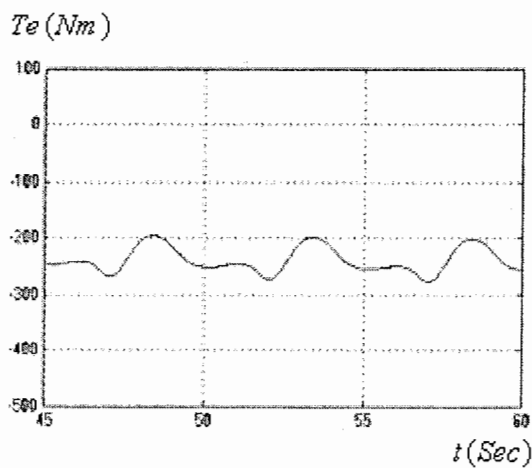


شکل ۴-۸۷ ضربی گشتاور بر حسب زمان

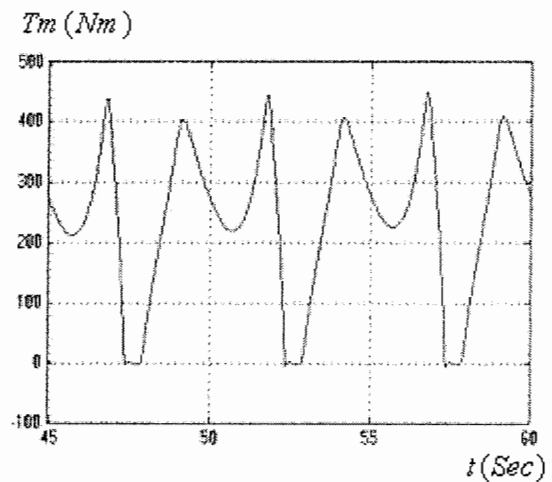


شکل ۴-۸۶ ضربی جریان بر حسب زمان

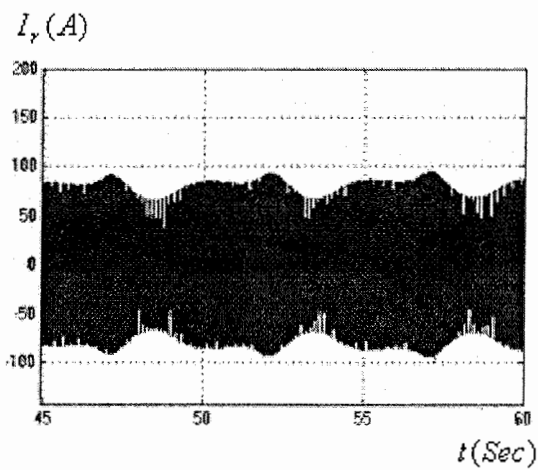
با کاهش نوسانات گشتاور ماشین، نوسانات توان راکتیو دریافتی (شکل ۴-۹۳) و توان تحویلی ژنراتور به بار (شکل ۴-۹۴) کاهش پیدا می کند که نتیجه ان تثبیت ولتاژ شبکه (شکل ۴-۹۶) است.



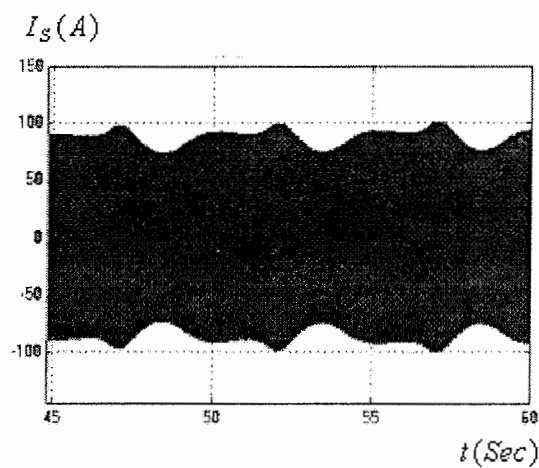
شکل ۴-۸۹ گشتاور الکترومغناطیسی بر حسب زمان



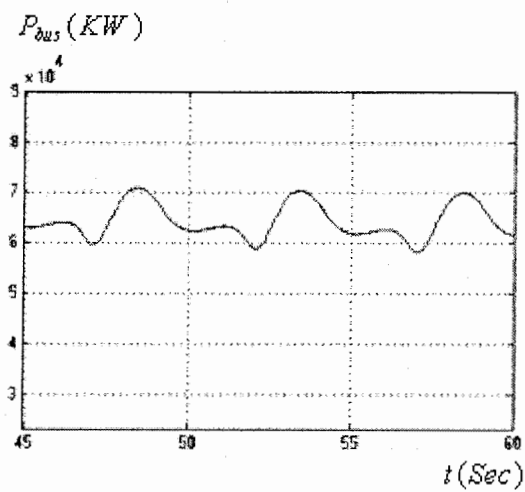
شکل ۴-۸۸ گشتاور مکانیکی بر حسب زمان



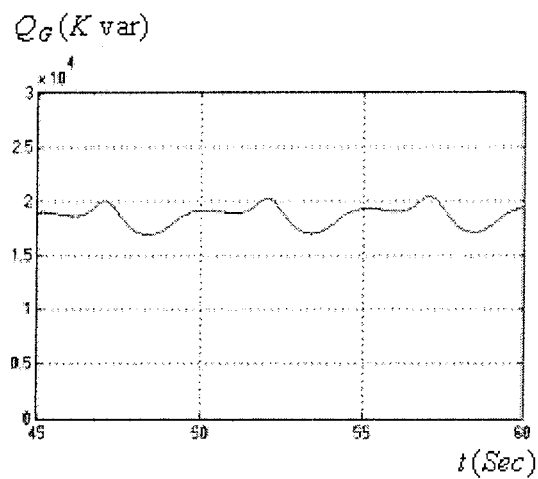
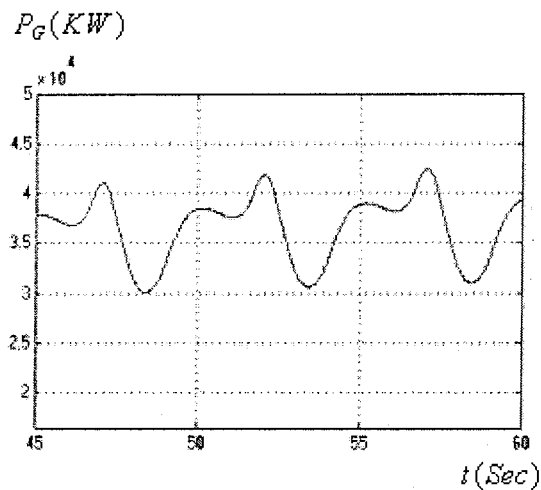
شکل ۹۱-۴ جریان روتور بر حسب زمان



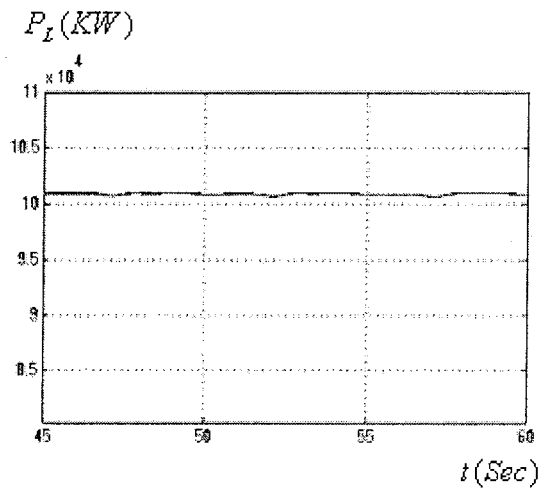
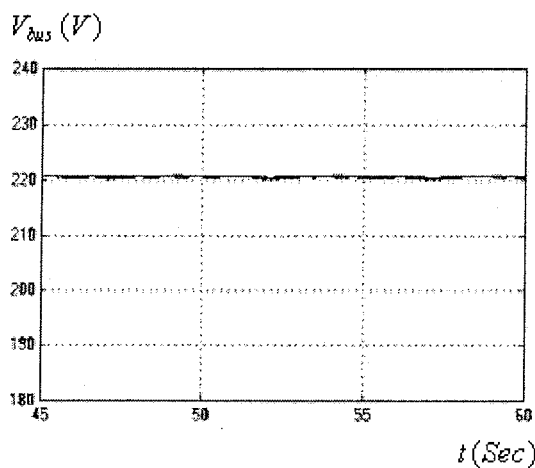
شکل ۹۰-۴ جریان استاتور بر حسب زمان



شکل ۹۲-۴ توان تحویلی شبکه به بار بر حسب زمان



شکل ۹۳-۴ توان راکتیو جذب شده توسط ژنراتور بر حسب زمان شکل ۹۴-۴ توان اکتیو تحویلی ژنراتور به بار بر زمان



شکل ۹۶-۴ ولتاژ موثر شین مصرف کننده بر حسب زمان

شکل ۹۵-۴ توان تحویلی به بار بر حسب زمان

توان خروجی نیروگاه و ولتاژ دو سر بار به ترتیب در شکل های (۹۴-۴) و (۹۶-۴) نشان داده شده است. همانطور که مشاهده می شود نوسانات شبکه به شدت کاهش پیدا کرده است. ولی همان طور که گفته شد وجود فلاپویل می تواند باعث کاهش راندمان نیروگاه گردد. با مقایسه شکل (۹۴-۴) با شکل

(۴-۸۰) اثر چرخ طیار بر کاهش راندمان برای این شبیه سازی قابل محاسبه است. ولی با این وجود، در عمل معمولاً جهت کاهش نوسانات توان و ولتاژ از چرخ طیار استفاده می شود.

در توربین ولز در ناحیه $\varphi > 0.4$ با افزایش توان ورودی، توان خروجی توربین می تواند کاهش پیدا کند که آن را اصطلاحاً واماندگی پره (Blade Stalls) می گویند که یکی از معایب توربین ولز است. جهت رفع این عیب می توان مقاومت روتور را افزایش داد [۱۴]. یکی دیگر از راهکارهای مطرح شده استفاده از توربین گام متغیر (Variable-Pitch Turbine) است. در این توربین ها جهت جلوگیری از واماندگی توربین از تیغه های قابل حرکت استفاده می گردد بنابراین در هنگام ایجاد امواج با دامنه بالا ($\varphi > 0.4$) زاویه تیغه توربین متناسب با شرایط جوی اصلاح می گردد [۲۲]. ولی به علت آنکه گشتاور راه اندازی توربین ضربه ای به مراتب بیشتر از توربین ولز است، در بعضی موارد استفاده از توربین ضربه ای ترجیح داده می شود.

نتیجه گیری

با وجود اینکه متوسط توان امواج ایران کمتر از متوسط توان امواج جهان ارزیابی شده است، ولی به عنوان یک منبع انرژی نامحدود مطرح و قابل استفاده است. در همین راستا تحقیقات آماری در زمینه برداشت انرژی از امواج در ایران صورت گرفته و چابهار مناسب ترین محل جهت اخذ انرژی از امواج تشخیص داده شده است بنابراین بررسی ساختار و تاسیسات نیروگاه موجی جهت ادامه و تکمیل تحقیقات ضروری است.

در این پایان نامه تجهیزات برخی از نیروگاه های موجی مرسوم معرفی گردید و با توجه به شرایط منطقه، تجهیزات نیروگاه موجی OWC به تفصیل مورد بررسی قرار گرفت. و با توجه به اینکه توربین ولز و ضربه ای دو توربین مرسوم در نیروگاه های OWC است سعی گردید هر دو توربین به طور همزمان معرفی و مزایا و معایب هر کدام در محدوده کار متفاوت مورد بررسی قرار گیرد. همان طور که بررسی گردید توربین ولز در ضریب شار کوچکتر از $0/4$ نسبت به توربین ضربه ای دارای راندمان بالاتری است و در ضریب شار حدود $0/35$ راندمان توربین ولز حداکثر می شود و بعد از آن با افزایش دامنه موج ورودی، راندمان توربین کاهش پیدا می کند و از ضریب شار بزرگتر از $0/4$ توربین ضربه ای گشتاور بیشتری به رتور اعمال می کند. در عمل سعی می گردد با استفاده از روش های مختلف از قبیل افزایش مقاومت خارجی رتور، از توربین ولز در ناحیه کار کوچکتر از $0/4$ بهره برداری گردد.

همچنین اثر نوسانات ورودی بر کیفیت توان شبکه توزیع مورد مطالعه قرار گرفت. همان طور که مشاهده گردید نوسانات امواج می تواند باعث افزایش نوسانات ولتاژ و توان تحویلی به مصرف کننده گردد بنابراین یکی از معایب انرژی های تجدیدپذیر از جمله انرژی موج رفتار غیر قابل پیش بینی آنها است ولی روند تحقیقات انجام گرفته در این زمینه، نشان از بهره برداری روزافزون از انرژی های تجدیدپذیر از جمله انرژی موج را دارد.

۱- نیروگاه OWC یکی از نیروگاه های ساده و در عین حال به روز است که جهت تبدیل انرژی موج به انرژی الکتریکی مورد استفاده قرار می گیرد بنابراین می تواند در ایران نیز به عنوان یک پروژه اجرائی مطرح گردد. یکی از موانع اصلی احداث این نیروگاه ساختار ویژه توربین بکاررفته در این نوع نیروگاه ها است بنابراین طراحی و ساخت توربین بکاررفته در نیروگاه OWC از جمله توربین ولز خود به تنهایی می تواند گام بلندی در زمینه بهره برداری از انرژی امواج محسوب گردد.

۲- رفتار نوسانی امواج معمولا باعث ایجاد نوسان در توان خروجی نیروگاه می گردد و این امر اثرات نامطلوبی در کیفیت توان شبکه می گذارد و ضریب پایداری شبکه را کاهش می دهد. جهت کاهش نوسانات توان خروجی نیروگاه، روش های گوناگونی مطرح شده است. یکی از روش های قابل اجراء، ذخیره توان تحویلی نیروگاه در ذخیره کننده های DC توسط مدارهای یکسوکننده و تحویل توان از ذخیره کننده ها به بار توسط مدارهای اینورتر با دامنه و فرکانس مطلوب است که می تواند در قالب تحقیقات تئوری و عملی مطرح گردد.

۳- در نیروگاه موجی OWC معمولا از ماشین القایی جهت تبدیل انرژی موج به انرژی الکتریکی استفاده می شود. ژنراتورهای القایی معمولا توان راکتیو قابل توجهی از شبکه دریافت می کنند و این امر باعث کاهش سطح ولتاژ شبکه به ویژه در باس های مصرف کننده نزدیک نیروگاه می شود. جهت کنترل و یا تغذیه جداگانه توان راکتیو مصرفی ژنراتور نیروگاه موجی، می توان از ادوات FACTS نظیر SVC و STATCOM استفاده کرد. بنابراین بررسی اثر ادوات FACTS در کاهش توان راکتیو مصرفی نیروگاه می تواند مورد توجه قرار گیرد.

۴- نیروگاه های درایو مستقیم یکی دیگر از نیروگاه های موجی است که در سالهای اخیر مورد بهره برداری قرار گرفته است. در این نیروگاه ها از ژنراتور خطی با ساختار ویژه و منحصر به فردی استفاده شده است. هر چند که بکارگیری این گونه ژنراتورهای خطی چند مگاوات در ایران کمی دور از ذهن به نظر می رسد ولی در توانهای پایین تر، ژنراتورهای خطی مرسوم ممکن است قابل استفاده باشد بنابراین تحقیق در زمینه نیروگاه های درایو مستقیم یکی دیگر از موضوعاتی است که می تواند مورد بررسی قرار گیرد.

- [1] Les Duckers, "Wave Energy Utilization in Europe", Centre For Renewable Energy Source(CRES),June 2002
- [2] عباسعلی فرداد, فرشید ذبیحیان, "استفاده از انرژی های نهفته در دریاها و اقیانوس ها ششمین کنفرانس سالانه مکانیک " انجمن مهندسی مکانیک ایران ۱۹۹۸
- [3] Nicholas jon baker"linear generator for direct drive marine renewable energy converter" PHD thesis submitted to the University of Durham, February 2003.
- [4] Umesh A.korde"control system applications in wave energy conversion" oceans MTS/IEEE conference and exhibition,No.1, volume 3, pp.11-14 September 2000.
- [5] Les Duckers,"Wave Power",Engineering Science And Education Journal, pp.312-319, June 2000.
- [6] C.E.Tindall, M.Xu, "Optimising a Wells turbine-Type Wave Energy system", IEEE Transaction on Energy Conversion, Vol.11, No.3 pp. 631-635, September 1996.
- [7] george Hagerman" Wave Energy Systems for Recharging AUV Energy Supplies" IEEE transaction on energy conversion,No.1, vol.4, pp. 75-84, November 2002.
- [8] Mirko Previsic,Roger Bedard, George Hagerman,"Offshore Wave energy Conversion Devices", Report Report E21 EPRI,pp.40-45 June 2004.
- [9] Henk Polinder,Michiel E.C. Damen,Fred Gardner," Linear PM Generator System For Wave Energy Conversion in the AWS", IEEE Transmission on Wave Energy Conversion. Vol.19 No.3, pp. 583-589 September 2004.
- [10] P.V.Indiresan" Generating Electrical Power From Wave Energy", the 24th Intersociety Energy Conversion Engineering Conference,pp. 2121-2126, IECEC 1989
- [۱۱] محمد نادری ؛ مدلسازی و شبیه سازی نیروگاه بادی منجیل؛ پایان نامه کارشناسی ارشد دانشگاه تهران ۱۳۷۷
- [۱۲] پ . س . کراز ؛ تحلیل ماشین های الکتریکی: انتشارات دانشگاه صنعتی اصفهان: دکتر مجتبی سقائیان نژاد-دکتر حسن نیک خواجویی
- [۱۳] جی مون اونگ : مدلسازی و شبیه سازی دینامیکی ماشین های الکتریکی: انتشارات دانشگاه تهران-دکتر لسانی
- [14] V.Jayashankar, B. Karthikeyan" Maximizing Power Output From A Wave Energy Plant", power engineering society, pp.1796-1801,No.1, vol.3,IEEE 2000.
- [15] F.Hung and W.C.Beattie" Modeling and Simulation of the Islay Wave Power Conversion System", electric and machines and drives conference, pp. MB2/2.1-MB2/2.4 vol1 issue 18-21, IEEE 1997
- [16] Henk Polinder and Mattia Scuotto" Wave Energy Conversion and their Impact on Power System", future power system, 2005 international conference.
- [17] T.Setoguchi, M.Takao , Y.Kinoue and K.Kaneko " Study on an Impulse Turbine for Wave Energy Conversion"International Journal of offshore and Polar Engineerig vol. 10, NO. 2,pp.1344-1349, June 2000
- [18] Dr.M.Xu ,Dr.C.E.Tindall" Attenuation of power fluctuations on Islay wave power system" IEE 2nd International conference on Advances in Power system Control, Operation and management, Hong Kong,No.3,vol,10, p.p 967-971 December 1995.

[19] E A.L.Naikodi, G.S.Rao," Efficient Operation Of AC Voltage Controller Fed Induction Machine For Wave Power Generation",IEEE Transaction on Power Electronic,Drives and Energy systems For Industrial Growth,No.3,Vol.1,8-11,pp.265-270,June 1996.

[20] J.W.Weber and G.P. Thomas "Hydrodynamic Aerodynamic coupling of an OWC Wava Energy Devices"

[21] M.Suzuki and C.Arakawa,"Guide Vanes Effect of Wells Turbine for Wave Power Generator",International Journal of offshore and Polar Engineerig vol. 10, NO. 2 June 2000"

[22] J.R.M. Taylor, N.J. Caldwell Design and Construction of the Variable-Pitch Air Turbine for the Azores Wave Energy Plant

[23] D.G.Dorrell, J.R.Halliday," Review of Wave Energy Resource and Oscillating Water Column Modeling", Power engineering conference UPEC,9th International, vol.2,6-8,pp.649-653, September 2003.

Abstract

New a day, renewable energy such as unlimited wave energy caught the attention of researchers because of their exploitation advantages.

This paper describes an introduction into ocean wave energy converter and its impacts on power system. There are a lot of different methods and systems for converting wave power into electrical power.

The most common structure of wave power plant is Oscillating Water Column (OWC) plant. In this paper structure of OWC plant will introduce and its parts will be investigated and simulated by computer.

there are various type of turbines for wave power generation, but Wells and Impulse turbines are the most important turbines on OWC wave power plant that comparative analyses for both of them are proposed in different operation regions. also effect of output power fluctuation on power system is investigated and effect of rotor resistance and inertia increment on power and voltage ripple are given.



Shahrood University of Technology
Faculty of Electrical and Robotic Eng.

Dissertation Submitted for the Award of the
Degree of MSc in Power Engineering

Subject

Power and Voltage fluctuation on Wave Power Plants

Supervisor

Dr. A. Darabi

By

Payam poriavali

March 2007