شرکت مهندسی

قدس نیرو

نشریه فنی تخصصی قدس نیرو
شماره ۳۳ - بهار ۱۳۸۹

واحد پست های انتقال نیرو

این واحد متشکل از دو بخش: مدیریت ارشد پستها و مدیریت اجرایی می‌باشد.

۱ - مدیریت ارشد پستها در قدس‌نیرو درحال حاضر مجموعه‌ایست از ۲۵۰ متخصص کارآزموده که یک تجربه ۳۵ ساله را پشتوانه خود دارند. این جمع که بعضاً سابقه بیش از ربع قرن تجربه و کار مشترک در قدس‌نیرو را دارند تابحال بیش از ۴۰۰ دستگاه پست را در زمینه‌ها و حوزه‌های مختلف کاری از طراحی اولیه تا تست و برقدار نمودن با موفقیت، مشاوره و نظارت نموده‌اند.

۲ - در زمینه کارهای اجرائی و EPC نیز این واحد در پروژه‌های مختلف در سطوح ولتاژی ۱۳۲ تا ۴۰۰ کیلوولت پروژه‌های مختلفی را انجام داده است.

واحد پستها در قدس‌نیرو با بکارگیری دانش‌روز، التزام به سیستم‌های مدیریتی یکپارچه "IMS" و مهمتر از همه هماهنگی و همدلی بین پرسنل و دلبستگی به کاری که انجام می‌دهد موفق به کسب رضایت کارفرمایان داخلی و خارجی خود شده است. رضایت نامه‌های فراوان موجود که از طرف کارفرمایان صادر شده است دلیل بر این ادعا می‌باشد.

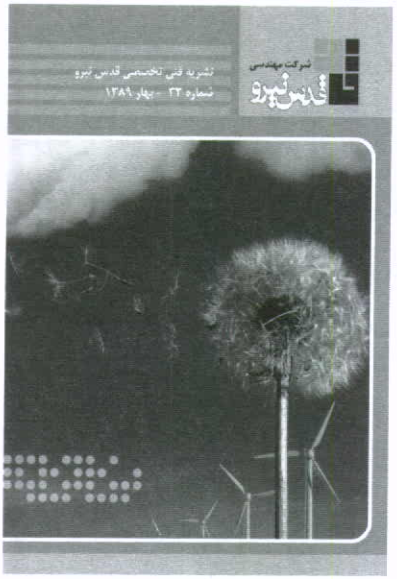
از ما بخواهید تا در:

- انجام مطالعات اولیه در زمینه انتخاب نوع پست مناسب
- خدمات مشاوره، مهندسی، طراحی، نظارت بر اجرای پستهای فشار قوی
- انجام طراحی تفصیلی در زمینه نوسازی، بازسازی و بهینه‌سازی پروژه‌های پست
- اجرای پستها بصورت کلید در دست
- انجام پروژه‌های خاص در زمینه انتقال دانش فنی و ساخت داخل
- انجام مهندسی ارزش در کلیه موارد
- انجام وظیفه بصورت "MC مدیریت پیمان"

همراه و نماینده شما باشیم، مطمئناً رضایت خاطر شما فراهم خواهد گشت.

بسمه تعالی

نشریه فنی تخصصی قدس نیرو
شماره ۳۳- بهار ۱۳۸۹
مدیر مسئول: مهندس احمد شکوری‌راد
سـر دبیـر : مهندس فتانه دوستدار



با تشکر از همکاری آقایان:

- مهندس احمد اهرابی
- مهندس حسین بختیاری‌زاده
- مهندس احمد فریدون درافشان
- مهندس میر داود حسینی میلانی
- دکتر همایون صحیحی
- مهندس منصور قزوینی
- مسعود نجمی

از مدیر و همکاران محترم امور پشتیبانی سپاسگزاریم.

فهرست مطالب

معرفی ۱

- **انواع ژنراتورهای توربین بادی – محمدرضا بیگلری** ۲
- **پارامترهای مؤثر بر HAZ در جوشکاری سازه‌های فولادی و راه‌های کنترل این ناحیه – جعفر رضازاده** ۷
- **شناسایی و بررسی پدیده واگرایی (*Divergence*) – (مطالعه موردی هسته رسی سدهای خاکی) – رسول فرجنیا** ۱۳
- **انرژی هسته‌ای – مهدی دوستکام** ۱۸
- **سیستم راه‌انداز ژنراتور (SFC) – انوش مؤیدی کاشانی** ۲۲
- **انرژی سبز – حسین قاسمی** ۳۸

هیأت داوران:
مهندس پورنگ‌پاینده، مهندس مسعود حبیبا...زاده، مهندس فتانه دوستدار، مهندس رضا رضوی، مهندس‌داود زاور، مهندس‌محمدحسن زرگرشوشتری، مهندس فرهاد شاهمنصوریان، مهرداد صارمی، دکتر همایون صحیحی، دکتر جعفر عسگری، مهندس امیرهمایون فتحی، مهندس بهرام کرمانی، مهندس علی‌اصغر کسائیان، مهندس محسن کمالی‌زاده، مهندس وحید مرتضوی، مهندس مهرداد مستقیمی، مهندس الهام ملکی، مهندس محمدرضا نصرالهی، مهندس رسول نحوی زاده، مهندس‌بهروز هنری.

این نشریه از طریق اینترانت قدس‌نیرو در دسترس همکاران می‌باشد. ارتباط مستقیم با مقاله‌دهندگان از طریق Email یا فاکس آنان در انتهای هر مقاله و همچنین ارائه نظرات، پیشنهادات و سؤالات احتمالی خوانندگان گرامی از طریق اینترانت قدس‌نیرو و یا شماره تلفن نشریه ۸۸۴۴۲۴۸۲ امکان‌پذیر می‌باشد.

انواع ژنراتورهای توربین بادی

محمدرضا بیگلری

کارشناس برق-SBU انرژی

چکیده

با توجه به اینکه سوخت‌های فسیلی در آینده نه چندان دور به پایان می‌رسند، جهت تولید الکتریسیته استفاده از انرژی‌های تجدیدپذیر(از جمله باد)، به عنوان یک منبع بی‌پایان و رایگان مورد توجه خاص کشورهای توسعه یافته قرارگرفته است، بطوریکه شرکت‌های بزرگی در دنیا جهت ساخت توربین و ژنراتور مشغول به فعالیت در این زمینه هستند و با توجه به همه مشکلات و محدودیت‌هایی که این پدیدهٔ طبیعی دارد مثل طوفان و متغیر بودن سرعت باد حداکثر توان تکنولوژیکی بکارگرفته شده است تا انرژی باد مهار و به انرژی الکتریکی تبدیل گردد.

۱- مقدمه

ازآنجائیکه سرعت چرخش پره توربین‌های بادی بطور طبیعی پایین است تقریباً ۵ تا ۳۰ دور در دقیقه و سرعت چرخش پره نیز متغیر می‌باشد، انتخاب نوع ژنراتور جدا از نوع کنترل، بستگی به نحوهٔ اتصال به شبکه و اینکه آیا در توربین از گیربکس استفاده شده یا نه دارد. از ژنراتورهای آسنکرون و یا سنکرون بشکل تعریف‌های گوناگونی استفاده گردیده است. در اغلب توربین‌های بادی از ژنراتورهای آسنکرون استفاده شده است.

۲- یک ژنراتور القایی آسنکرون چیست؟

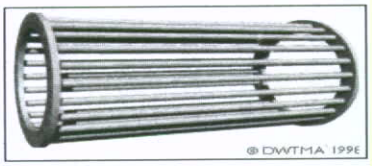
ژنراتور آسنکرون یک ژنراتور قابل اطمینان می‌باشد که اساساً برای موتورهای الکتریکی طراحی شده است. اما درحالت ژنراتور نیز به علت ارزان بودن استفاده می‌شود و به علت داشتن بعضی از خواص مکانیکی قابل استفاده درتوربین بادی است که این عناصر مهم باعث تفاوت با ژنراتور سنکرون شده‌اند. در حقیقت یک سوم مصرف‌کننده‌های برقی برای حرکت از موتورالقایی در کارخانه استفاده می‌کنند (پمپ‌ها، فن‌ها، کمپرسورها، آسانسورها و سایر لوازمات ...)، جائیکه احتیاج به تبدیل انرژی الکتریکی به انرژی مکانیکی می‌باشد.

ژنراتور القایی یک ساختار ساده مکانیکی دارد و قسمت‌هایی که برای چرخش روتور می‌باشد بدون رینگ‌های فرسایشی است. در نتیجه نیاز به تعمیرات کمی دارد و دوام دورهٔ سرویس آن با یک طراحی قوی بسیار زیاداست و با یک سیستم تکفاز و سه فاز به خوبی کار می‌کند و احتیاج به گاورنر ندارد.

۲-۱- قفس روتور

روتور شامل میله‌های مسی و یا آلومینیومی است که از لحاظ الکتریکی به هم اتصال دارند و توسط یک رینگ آلومینیومی انتهای آنها بهم متصل است (شکل ۱).

روتور آهنی یک هسته آهنی داردکه لایه‌های نازک ورقه ورقه آن را تشکیل داده است که به میله‌های آلومنیومی هادی پانچ شده‌اند. روتور در وسط استاتور قرارگرفته است و استاتور خود مستقیماً به شبکه سه فاز متصل می‌گردد.

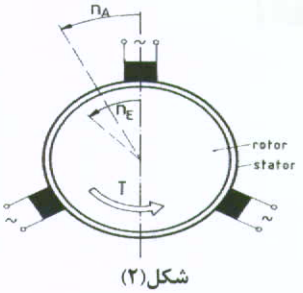


شکل(۱)

روتور بطور اتوماتیک متناسب با تعداد قطب‌های استاتور بگردش در می‌آید. استاتور نیز در یک محدوده گوناگون قطب استفاده می‌گردد.

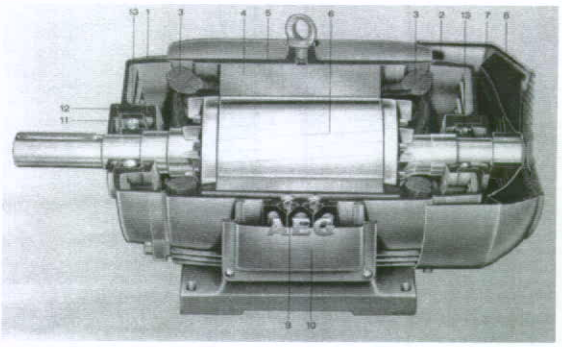
۲-۲- عملکرد ژنراتوری

در حالت چهار قطب بودن استاتور اگر روتور از ۱۵۰۰ دوربر دقیقه سریعتر بچرخد جریانی قوی در روتور ایجاد می‌شود و اگر ژنراتور بخواهد ماکزیمم توان را تولید کند باید با بیشتر از ۱۵۰۰ دور در دقیقه (مثلاً ۱۵۱۵ دور بر دقیقه) بچرخدکه توان بوجود آمده از طریق نیروی الکترومغناطیسی به شبکه منتقل می‌شود (شکل‌های ۲ و ۳).



شکل(۲)

(سرعت میدان دوار استاتور) nE >nA (سرعت



شکل (۳)

برای استارت ژنراتور القایی، ماشین می‌بایست جریان مغناطیس‌کنندگی و میدان مغناطیسی خود را برای ژنراتور بودن تأمین کندکه توان راکتیو نامیده می‌شود و اندازه‌اش بستگی به توان اکتیو دارد. درحالت اتصال به شبکه توان راکتیو از شبکه گرفته می‌شودکه جبرانگرهای خازنی نیز برای اصلاح ضریب قدرت می‌بایست تهیه شوند. سرعت سنکرون یک ژنراتور القایی بستگی به فرکانس شبکه و تعداد قطب‌های ژنراتور دارد.

تفاوت سرعت سنکرون استاتور و سرعت مکانیکی روتور نسبت به سرعت سنکرون لغزش را به ما می‌دهد که درحالت ژنراتوری سرعت روتور مقدار کمی بیشتر می‌باشد در نتیجه لغزش، منفی است.

$n_{sys} = (120*f)/P$ (۱)

f = فرکانس شبکه

P = تعداد جفت قطب‌ها

$S = (n_{syc}-n_{mech})/n_{syc}$ = لغزش (۲)

$n_{mech} = n_{syc}*(1-s)$ = سرعت روتور (۳)

۳-توربین‌های بادی به دودسته تقسیم می‌شوند:

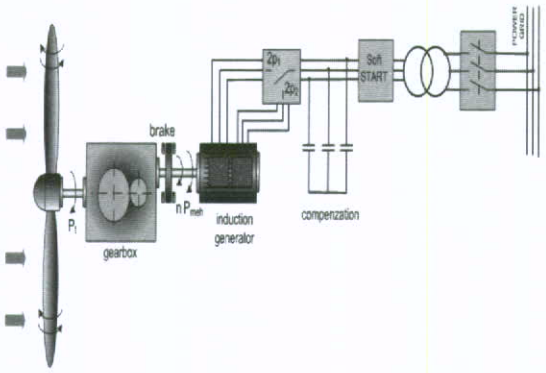
- توربین با سرعت ثابت: توربین‌هایی هستند که سعی شده است از طرق مختلف سرعت در آنها ثابت باشد و مستقیماً به شبکه برق اتصال دارند.
- توربین با سرعت متغیر: توربین‌هایی هستند که سرعت در آنها متغیر است و از طریق مبدل‌ها به شبکه اتصال دارند.

۳-۱- توربین‌های بادی با سرعت ثابت و ژنراتورهای القایی قفس سنجابی

Fixed Speed Wind Turbine With Squirrel Cage Induction Generator

در این نوع توربین‌ها معمولاً بین روتور توربین و ژنراتور القایی یک عدد گیربکس با نسبت ۱:۱۰۰ قرار گرفته است که یک ژنراتور چهار قطب یا شش قطب القایی قفس سنجابی در آن استفاده شده است (شکل ۴). ژنراتور با فرکانس ۵۰ یا ۶۰ هرتز از طریق Soft Starter به شبکه متصل است (در واقع Soft Starter برای کاهش جریان راه‌اندازی توربین در حالت موتوری است) و بار این نوع ژنراتور محدود به ساختمان آیرودینامیکی پره‌ها واصول Stall آنها دارد که مجموع سری سرعت توربین + گیربکس + ژنراتور تفاوت اندکی با سرعت ژنراتور دارند (سرعتشان تقریباً با هم یکی می‌باشد) لغزش ژنراتور ٪ (۲-۱) می‌باشد.

این نوع توربین بدون اتصال به شبکه نمی‌تواند فعالیت داشته باشد زیرا احتیاج به توان راکتیو برای راه‌اندازی دارد به همین دلیل برای تصحیح ولتاژ شبکه از خازن استفاده می‌کنند. اغلب ژنراتورهای Fix Speed به دلیل سرعت‌های مختلف توربین چندین قطبی ساخته می‌شوند.

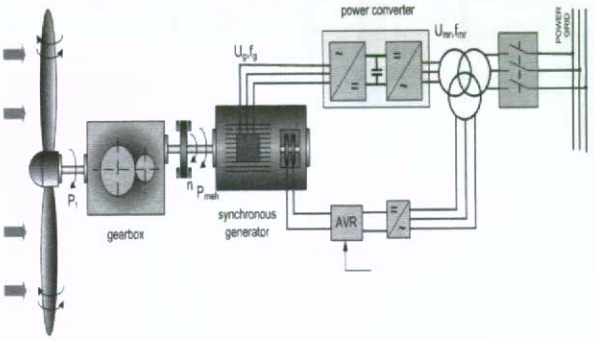


شکل(۴)

۳-۲- توربین‌های بادی سرعت متغیر سنکرون یا ژنراتور دابل فید

Variable-Speed Turbine With Synchronous or Double-Fed Induction Generator

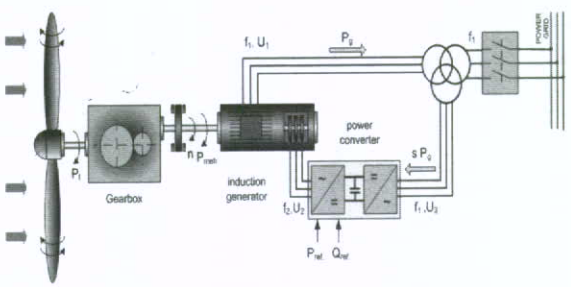
روتور ژنراتورهای سنکرون توسط جریان DC تغذیه می‌شود. این نوع ژنراتور تولیدکننده انرژی اصلی واحدهای نیروگاهی با فرکانس ۵۰ یا ۶۰ هرتز می‌باشد. همچنین یک Power Converter بین سیم‌پیچی آرمیچر و شبکه قرار گرفته است که فرکانس ثابت را برای شبکه تأمین می‌کند (شکل ۵).



شکل(۵)

۳-۳- توربین‌های بادی سرعت متغیر آسنکرون با دابل فدآسنکرون ژنراتور
Variable-Speed Turbine With Synchronous or Double-Fed Induction Generator

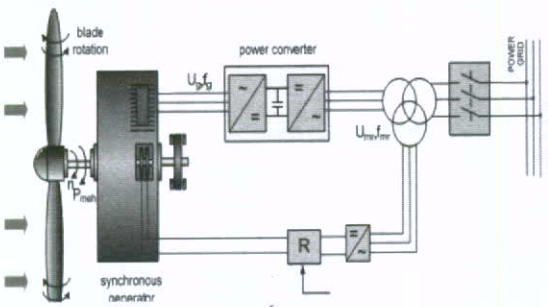
در این مدل که مطلوب‌تر از مدل قبلی به دلایل سایزکوچک‌تر Converter و هزینه کمتر و دارای هارمونیک پایین تحویلی به شبکه می‌باشد، با Converter آن کنترل بهتری می‌توان انجام داد و فضای کمتری نیز نیاز دارد. همچنین پایداری بهتری را برای شبکه قدرت داشته و امکان تولید توان راکتیو را دارد. (شکل ۶) دابل فد ژنراتورها، ژنراتورهایی هستند که قسمتی از توان لغزش هدر رفته در روتور به شبکه باز گردانده می‌شود و بازده کل سیستم خوب خواهدشد.



شکل(۶)

۳-۴- توربین‌های بادی سرعت متغیر با ژنراتور سنکرون
Variable-Speed Turbine and Aynchronous Generator

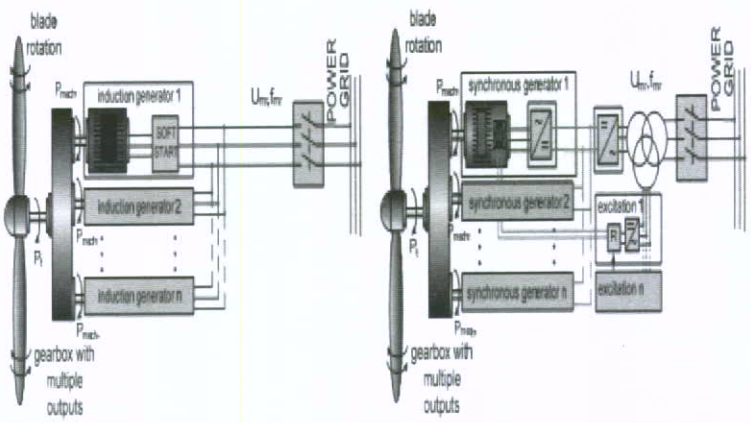
درکنار ژنراتور القایی یک ژنراتور سنکرون برای سرعت‌های چرخشی کم (۳۰-۵) دور بر دقیقه می‌توان استفاده کرد. ژنراتورهای سنکرون با تعداد قطب زیاد (۶۰ یا بیشتر) با محرک‌های کلاسیک یا آهن‌رباهای دائمی می‌توانند مستقیم به توربین بدون گیربکس متصل گردد و توان از طریق Power Converter به شبکه متصل گردد که توان Converter با توان ژنراتور یکسان می‌باشد. اصولاً تعداد زیاد قطب‌ها و سرعت کم چرخش ژنراتور موجب گشتاور بالا ژنراتور می‌شود که باعث افزایش وزن و ابعاد ژنراتور می‌گردد و به طبع آن ابعاد اتاق توربین بادی (ناسل) بزرگ می‌گردد (شکل ۷).



شکل(۷)

۳-۵- توربین‌های تک گیربکس و چندین ژنراتوری
Single Gearbox For Multi Generator

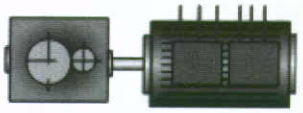
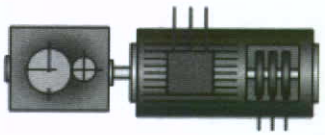
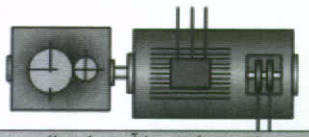
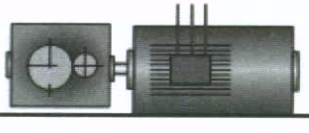
در این مدل چندین ژنراتورسنکرون و یا القایی به یک گیربکس اتصال دارند. با این مدل ساختار می‌توان از انرژی باد به بهترین طرز استفاده کرد. زیرا ژنراتورهای فعال متناسب با توان لحظه‌ای توربین هستند (شکل ۸).



شکل (۸)

۴- مقایسه تفاوت ساختمان انواع ژنراتورهای گوناگون توربین بادی

جدول (۱) : مقایسه تکنولوژی ژنراتورهای گوناگون توربین بادی

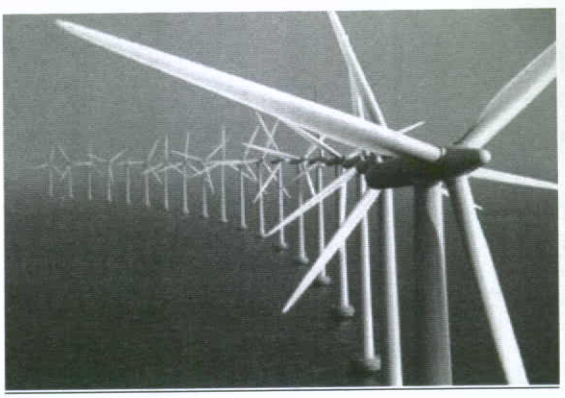
ژنراتور (Generator)	مزایا (Advantage)	معایب (Disadvantage)
قفس سنجابی- تک سرعت یا دو سرعت(2p=4&6) 	- ساختمان ساده - تعمیرات ساده - ضربان سبک گشتاور توربین - هزینه کم - اتصال مستقیم به شبکه	- نیاز به توان راکتیو دارد - نیاز به Soft Starter برای برپایی اتصال به شبکه دارد. - تنها برای سرعت‌های ثابت قابل اجرا می‌باشد. - نیاز به گیربکس دارد. - برای قطب‌های بالا (20>) قابل استفاده نمی‌باشد.
ژنراتوردابل فد 	- کاهش دادن قابل توجه سطح توان Converter و هزینه Converter. - امکان تنظیم سرعت برای استفاده بهینه (±20-25%) - توان راکتیو برای مغناطیس کردن ماشین از طریق Power Converter مهیا می‌شود. - امکان فعالیت زیر و بالای سنکرون را دارد.	- رینگ‌های لغزان و جاروبک آن فرسوده و نیاز به تعمیرات دارند. - کنترل پیچیده دارد - اتصال مستقیم به شبکه آن گاهی اوقات مشکل می‌باشد.
ژنراتور سنکرون با روتورسیم‌پیچی محرک	**- کنترل ساده توان راکتیو - پهنای رنج سرعت - کنترل ساده**	**- نیاز به Power Converter مشابه توان ژنراتور دارد. - نیاز به سیستم محرک دارد - رینگ‌های لغزان و جاروبک آن فرسوده و نیاز به تعمیرات دارند.**
محرک مستقیم	- بدون گیربکس - بازده بالا	- ابعاد بزرگ و وزن - مشکل حمل و نقل و نصب.
با گیربکس 	- ابعاد کوچک و وزن کم - ساختمان استانداردی می‌تواند داشته باشد.	- هزینه بالا و تلفات (٪ ۳- ٪ ۲) - تعمیرات گیربکس آن مشکل می‌باشد.
ژنراتور سنکرون با آهن‌ربای دائمی	**- روتور ساده که قسمت‌های قابل سایش ندارد - تلفات روتور آن کم است.**	**- هزینه بالای آهن‌رباهای دائمی - امکان از بین رفتن خاصیت آهن‌ربایی - تجربه کم درساخت و نصب**
محرک مستقیم	- بدون گیربکس - بازده بالا - تعمیرات ساده	- ابعاد بزرگ و وزن - مشکل حمل و نقل و نصب.
با گیربکس 	- ابعاد کوچک و وزن کم - ساختمان استانداردی می‌تواند داشته باشد.	- هزینه بالا و تلفات (2-3%) - تعمیرات مشکل گیربکس

۵- توان ژنراتورهای شرکت‌های بادی فعال در دنیا

شرکت‌های تولیدکنندهٔ توربین بادی، توربین با تـوان‌هـای گونـاگون در مـدل‌هـای مختلـف جهـت نصـب در خشـکی (Onshore) و در دریـا (Offshore) تولید نموده‌اند.که نمونه‌ای از مـدل‌هـای آنهـا بهمـراه تـوان درجدول(۲) آمده است.

جدول (۲)

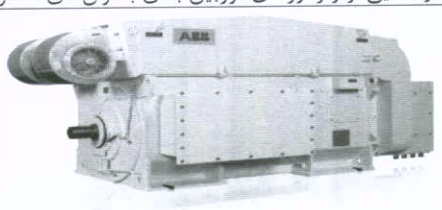
نام شرکت	مدل توربین	توان ژنراتور
VESTAS	V112	۳ مگاوات (onshore) & (offshore)
GE	GE3.6sl	۳/۶ مگاوات (offshore)
ENERCON	E70	۲/۳ مگاوات (onshore)
REPOWER	6M	۶/۱۵ مگاوات (offshore)
SIEMENS	SWT 3.6 107	۳/۶ مگاوات (offshore)
NORDEX	N100	۲/۵ مگاوات (onshore)



شکل (۹) : Offshore Wind Farm

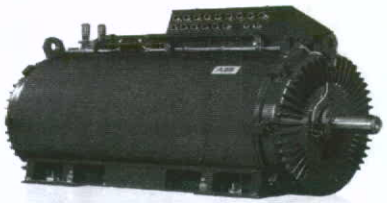
شکل (۱۰) : Onshore Wind Farm

۵-۱- نمونه‌هایی از ژنراتورهای توربین بادی با توان‌های متفاوت



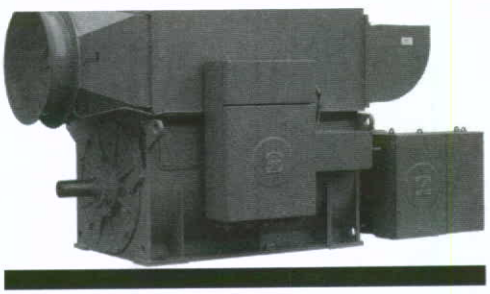
شکل (۱۱)

Doubly-Fed Generator- Normally Powers From 1.5 MW to 5 MW-(ABB)



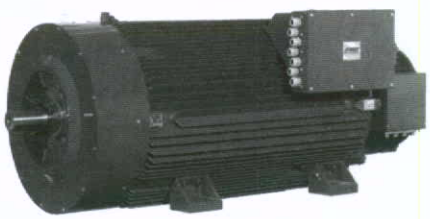
شکل (۱۲)

Fixed Speed Generator- Normally Powers From 1 MW to 2 MW- (ABB)



شکل (۱۳)

Double-Fed Induction Generator With 1.5 MW Rated Power (Loher)



شکل (۱۴)

6 pole - Speed Range: 630-1,330 rpm 600 kW – (Weier)

مراجع

1- Wind Turbines book
2- Generator technology for wind
3- ABB, WEIER, LOHER websites
۴- ماشین‌های الکتریکی پ س سن

بیوگرافی

*آقای محمدرضا بیگلری دارای لیسانس مهندسـی بـرق(قـدرت) و ۷ سال سابقه داشته و از سال ۸۸ با قدس نیرو همکاری می‌نماید. زمینـه کـاری آقـای بیگلـری راه‌انـدازی و تعمیـرات و نگهـداری ترانسفورماتورها، موتورها، درایوها، **UPS** و علاقمندی ایشـان عـلاوه بـر موارد فوق‌الذکر، به انرژی‌های تجدیدپذیر می‌باشد.*

Email:
mh_big @ yahoo.com

پارامترهای مؤثر بر HAZ در جوشکاری سازه‌های فولادی و راه‌های کنترل این ناحیه

جعفر رضازاده

کارشناس مکانیک (فناوری مواد) - SBU نیروگاه

چکیده

*کنترل ناحیه **HAZ** در جوشکاری سازه‌های فولادی توسط روش کنترل سختی و کنترل میزان نهایی هیدروژن در جوش انجام می‌شود. پارامترهایی مانند حرارت ورودی، تعداد پاس‌های جوش، انتخاب نوع الکترود مصرفی، میزان آماده‌سازی و نوع طرح اتصال و شرایط محیطی بر روی کیفیت جوش، سختی و عرض ناحیه HAZ تأثیر می‌گذارند. در صورتی که تغییرات خواص متالورژیکی جوش و ناحیه **HAZ** در سازه‌های فولادی از معیارهای قابل پذیرش استاندارد تجاوز نماید سبب پایین آمدن دوام و استحکام سازه می‌شود.*

تعریف HAZ [1]*: به ناحیه مجاور جوش اطلاق می‌شود که تحت تأثیر حرارت ناشی از جوشکاری، دچار تغییر فاز و ساختار میکروسکپی در حالت جامد می‌شود.*

۱- مقدمه

جوشکاری به عنوان روش اتصال دایم در ساخت و مونتاژ سازه‌های فولادی کاربرد فراوانی دارد. گستردگی و تنوع کاربرد استراکچرهای فلزی در نیروگاه‌ها، پتروشیمی‌ها و سایر صنایع سبب می‌شود که نگاهی دقیق‌تر به آنها در مراحل طراحی و اجرا داشته باشیم. پایداری این سازه‌ها علاوه بر در نظرگرفتن الزامات طراحی و انتخاب مواد، به نحوه جوشکاری و اجرای صحیح آن بستگی دارد. تفسیر و انتقال دانش تئوری علم جوشکاری با زبانی ساده به جوشکاران و گروه نصاب استراکچرهای فلزی از سوی مهندسین جهت حصول اطمینان از کیفیت نهایی کار هدف اصلی این مقاله می‌باشد.

۲- جوش گوشه‌ای (Fillet Weld)

در بررسی انواع جوش‌های بکار رفته در ساختمان‌های فولادی، جوش گوشه‌ای بیشترین کاربرد را دارد. اتصال تیر به ستون و ستون به صفحه ستون نمونه‌های مشخصی از این نوع طرح اتصال می‌باشد صرفنظر از ضخامت پلیت‌ها انتقال حرارت در جوش گوشه‌ای اکثراً در سه جهت انجام می‌گیرد. لذا سرعت سردشدن می‌تواند نسبت به جوش شیاری [2] در همان ضخامت فلز پایه و شرایط جوشکاری یکسان بیشتر باشد. براساس تحقیقات انجام شده حرارت ورودی ناشی از جوشکاری به قطعه کار **(H)** از رابطه (۱) قابل محاسبه است.

$$H(\frac{kj}{in} \text{ or } \frac{kj}{mm}) = \frac{60 \times I \times V}{1000 \times S} \qquad (۱)$$

S = سرعت جوشکاری (in/min یا mm/min)

V = ولتاژ ، I = آمپر

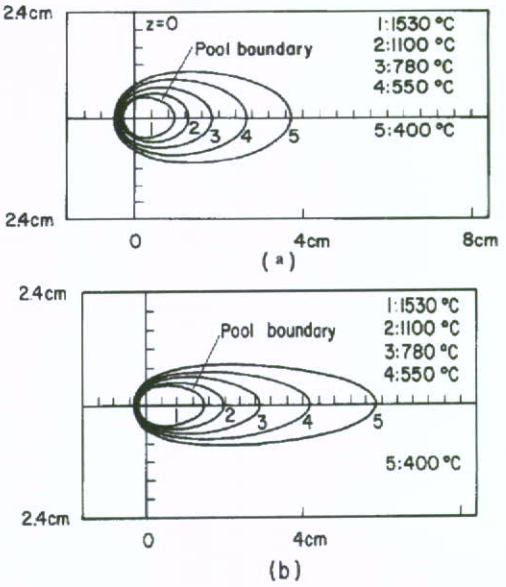
در رابطه با جوش گوشه‌ای بر اساس حرارت ورودی و با استفاده ازفرمول تجربی (۲) می‌توان اندازه ساق جوش را محاسبه نمود.

$$L_{(in)} = \sqrt{\frac{H_{(\frac{kj}{in})}}{500}} \qquad (۲)$$

L = اندازه ساق جوش

نکته اساسی در این رابطه تخمین تعداد پاس‌های مورد نیاز و نحوه جوشکاری است به طوریکه الزامات تولید یک جوش با کیفیت رعایت شود. مطابق نمودار (۱) در شرایط یکسان ضخامت فلز پایه، نوع الکترود و روش جوشکاری، هرچه گرمای ورودی و سرعت جوشکاری بیشتر باشد، حوضچه جوش کشیده‌تر، مقطع عرضی جوش بزرگتر و نرخ سردشدن افزایش پیدا می‌کند.

1- Heat Affected Zone
2- Groove



نمودار (۱) : نتایج بدست‌آمده از حل معادله روزنتال برای انتقال حرارت سه بعدی در جوشکاری

a) جوشکاری ایزوترمال با سرعت 2.4mm/s و حرارت ورودی 3200w ، فلز پایه 1018 .

b) جوشکاری ایزوترمال با سرعت 6.2mm/s و حرارت ورودی 5000w ، فلز پایه 1018

براساس استاندارد **AWS. D-1.1** اندازه جوش گوشه‌ای و حرارت ورودی مورد نیاز جوشکاری را می‌توان از روی نمودار (۲) محاسبه نمود. لذا از مقایسه و جمع‌بندی نتایج فرمول (۲) و نمودار (۲) می‌توان تخمین درستی از حرارت ورودی و عرض جوش بدست آورد بطوریکه ناحیه HAZ با سرعت مناسبی سرد شده و اندازه آن گسترش نامتعارفی نداشته باشد. بسته به شرایط جوشکاری و حالت آن از طریق فرمول (۳) می‌توان با دقت تعداد پاس‌های مورد نیاز برای تولید یک جوش گوشه‌ای را محاسبه نمود.

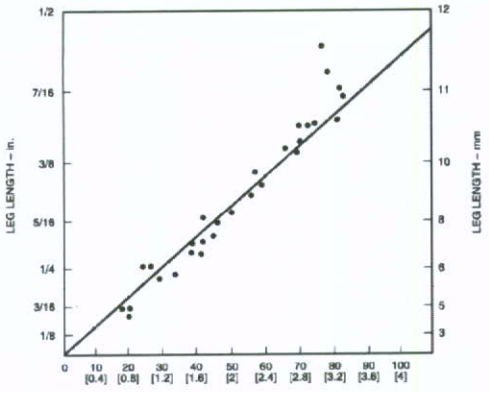
$$N = 300 \times {WT}/{H} \qquad (۳)$$

WT= lb/ft وزن فلز جوش در طول جوش

H= kj/in حرارت ورودی

N= تعداد پاس جوش

برای روشن شدن اهمیت موضوع رعایت تعداد پاس‌های مورد نیاز برای تولید یک جوش و به تبع آن کنترل حرارت ورودی و ناحیه **HAZ** به طرح یک نمونه مثال عملی می‌پردازیم.



نمودار (۲) : رابطه بین حرارت ورودی و اندازه ساق جوش در Fillet Weld

مثال: جوش گوشه‌ای به طول ساق 15 mm را می‌خواهیم در حالت افقی و شرایط ذیل تولید نماییم مطلوب است محاسبه حرارت ورودی و تعداد پاس‌های مورد نیاز و مطابقت نتایج با استاندارد AWS.D-1.1

نوع الکترود: E 6013
قطر الکترود: 3.2 mm
جریان: 110 - 150 V
ولتاژ: 22 – 25 V (DC با قطبیت مستقیم)
سرعت جوشکاری: 8 cm/min

حالت اول:

در این حالت جوشکاری دقیقاً مطابق محاسبات توسط جوشکار انجام می‌گیرد.

$$H = \frac{60 \times 130 \times 23}{1000 \times 80} = 2.2425 \ {kj}/{mm} = 56.9595 \ {kj}/{in}$$

حرارت ورودی به ازای هر پاس

$$H({kj}/{in}) = L^2_{(in)} \times 500 \Rightarrow H = 0.3488 \times 500 = 174.38 \ {kj}/{in}$$

حرارت ورودی به ازای طول ساق نهایی جوش

$$N = 300 \times {WT}/{H} \qquad \Rightarrow N \frac{300 \times 0.6125}{56.9595} \approx 3$$

تعداد پاس جوش مورد نیاز

$$L = \sqrt{{H}/{500}} \qquad \Rightarrow L = \sqrt{{56.9595}/{500}} = 0.34 \text{ in}$$

طول ساق هر پاس

محاسبات انجام گرفته با نمودار (۲) مطابقت داشته لذا جوش تولید شده دارای خواص متالورژیکی و مکانیکی مناسبی خواهد بود و ناحیه **HAZ** در آن گسترش نامتعارف و خواص نامطلوب ندارد.

حالت دوم :

در این حالت جوشکاری مطابق سلیقه اکثر جوشکاران ساختمانی، بدون WPS و در دو پاس جوشکاری می‌شود.

$$H(^{kj}/_{in}) = L^2_{(in)} \times 500 \Rightarrow H = 0.3488 \times 500 = 174.38\ ^{kj}/_{in}$$

حرارت ورودی به ازای طول ساق نهایی جوش

$$N = 300 \times {}^{WT}/_{H} \qquad \Rightarrow 2 = \frac{300 \times 0.6125}{H} \Rightarrow H = 91.875\ ^{kj}/_{in}$$

حرارت ورودی به ازای هر پاس

$$L = \sqrt{{}^{H}/_{500}} \qquad \Rightarrow L = \sqrt{{}^{91.875}/_{500}} = 0.43\ in$$

طول ساق هر پاس

مشاهده می‌شود که حرارت ورودی در حالت دوم تقریباً در هر پاس $^{kj}/_{in}$ 35 بیشتر از حالت اولی (سه پاسه) می‌باشد و در واقع این میزان حرارت ورودی برای تولید جوشی با طول ساق **11mm** مناسب است (مطابق محاسبات و نمودار شماره۲). موضوع فوق تازه در صورتی است که هر دو پاس یکسان ایجاد شوند در صورتی که اکثر جوشکاران پاس اول را در هر دو حالت اول و دوم مشابه هم جوشکاری می‌کنند و پاس دوم در حالت دوم را به جای پاس‌های دوم و سوم در حالت اول در یک پاس می‌زنند در این صورت با فرض ثابت بودن ولتاژ و آمپر الزامی است سرعت جوشکاری نصف گردد.

$$H = \frac{60 \times 130 \times 23}{1000 \times 40} = 4.485\ {}^{kj}/_{mm} = 113.919\ {}^{kj}/_{in}$$

حرارت ورودی به ازای پاس دوم در حالت دوم:

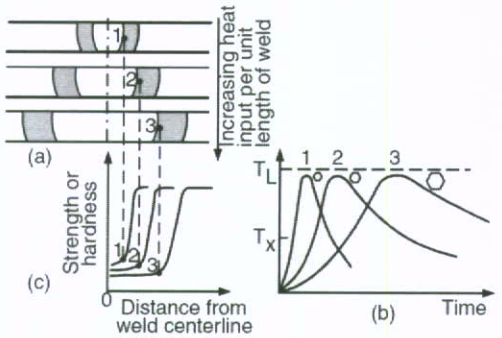
نتیجه محاسبه نشان می‌دهد حرارت ورودی بسیار زیاد بوده که این امری نامطلوب و مخرب است. تأثیر افزایش حرارت ورودی سبب افزایش اعوجاج قطعه، افزایش تنش‌های پسماند، افزایش استعداد جوش به خوردگی و در نهایت تولید جوش با خواص متالورژیکی و مکانیکی نامناسب است.

تأثیر حرارت ورودی[1] بر روی هندسه جوش، ناحیه HAZ و سختی این ناحیه در نمودار (۳) نشان داده‌شده است. با افزایش حرارت ورودی درواحد طول جوش، عرض ناحیه HAZ و نیز زمان نگهداری این ناحیه در دمای بالاتر دمای موثر تبلور مجدد (T_x) افزایش پیدا می‌کند (a-۳). لذا با افزایش زمان نگهداری استحکام جوش و سختی ناحیه HAZ کاهش پیدا می‌کند. دلیل این موضوع آنست که در حرارت ورودی بالا، شیب گرم و سرد شدن ناحیه HAZ ملایم‌تر بوده (c -۳) و زمان کافی برای دیفیوژن کامل کربن (آنیلینگ) فراهم می‌شود. با افزایش میزان آنیلینگ سختی جوش کاهش پیدا می‌کند (b -۳).

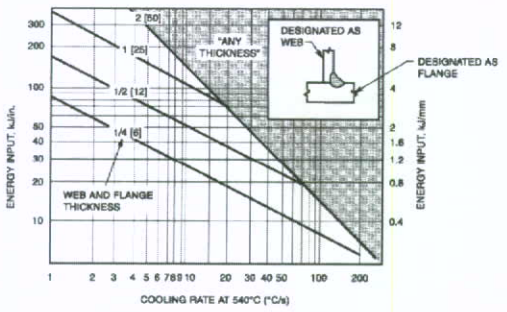
تغییرات سختی ناحیه **HAZ** مستقیماً از کربن معادل فلز پایه و حرارت ورودی تأثیر می‌پذیرد. تغییرات زیاد سختی از فلز جوش به فلز پایه می‌تواند بسیار زیانبار باشد زیرا فلزات با مشخصه سختی متفاوت در برابر نیروهای وارده دینامیکی یکسان، خواص مکانیکی متفاوتی از خود بروز می‌دهند. در نمودار شماره (۴) رابطه بین نرخ سرد شدن با حرارت ورودی برای یک ضخامت مشخص داده شده است این نمودار براساس جوشکاری زیرپودری ترسیم شده که برای سایر روش‌های دیگر جوشکاری با درنظر گرفتن ضرایب جدول (۱) قابل استفاده است.

جدول (۱)

Welding Process	Multiplication Factor
SAW	1
SMAW	1.5
GMAW,FCAW	1.25



نمودار (۳) : رابطه بین حرارت ورودی با عرض ناحیه جوش و HAZ ، تغییرات سختی و سیکل‌های حرارتی به قطعه‌کار



نمودار (۴) : دیاگرام نرخ سرد شدن – حرارت ورودی برای جوش تک‌پاسه در جوشکاری زیر پودری

1- Heat Input

خواص مکانیکی فلز جوش از پارامترهایی همچون میزان تنش‌های حرارتی وارده، تعداد لایه‌های جوش، خواص مکانیکی فلز پایه و الکترود تأثیر می‌پذیرد. استحکام کششی فلز جوش را می‌توان از رابطه (۴) محاسبه نمود.

$$\sigma_C = K_1 [\alpha \sigma_w + (1-\alpha)\sigma_p] \qquad (۴)$$

σ_C = استحکام کششی فلز جوش

σ_p = استحکام کششی فلز پایه

σ_w = استحکام کششی الکترود

α = فاکتور امتزاج فلز پایه و الکترود

K_1 = فاکتور اثرات حرارتی ناشی از جوشکاری

رابطه بالا نشان می‌دهد که دو پارامتر، میزان امتزاج[1] و تنش‌های حرارتی ناشی از جوشکاری بر روی استحکام کششی جوش تاثیر مهمی دارند. این دو پارامتر خود از تعداد پاس‌های جوشکاری تاثیر می‌پذیرند. در جوش‌های گوشه‌ای به دلیل هندسه جوش در پاس ریشه تمرکز تنش بیشتر بوده و این مسئله هنگامی که میزان Dilution نامناسب باشد سبب می‌شود که توانایی جوش در تحمل نیروهای وارده کمتر شود.

جوش گوشه‌ای در صورتی که دارای عیب ذوب ناقص باشد هنگامی که در معرض بارهای دینامیکی قرار گیرد بسیار حساس به شروع ترک از ریشه جوش می‌باشد. گوشه‌های جوش[2] بدلیل تمرکز تنش نیز از جمله نقاط حساس به ترک در اثر نیروهای وارده به جوش می‌باشد. در جوش‌های Fillet چند پاسه در صورتی که میزان Overlapping خصوصا در محل‌های شروع و خاتمه پاس‌های جوش مناسب نباشد می‌تواند باعث تمرکز تنش و شروع ترک از گلویی جوش شود. افزایش طول ساق جوش سبب کاهش تنش روی Toe weld و افزایش استحکام جوش و طول عمر بیشتر سازه (از نقطه‌نظر مقاومت به خستگی جوش) می‌شود.

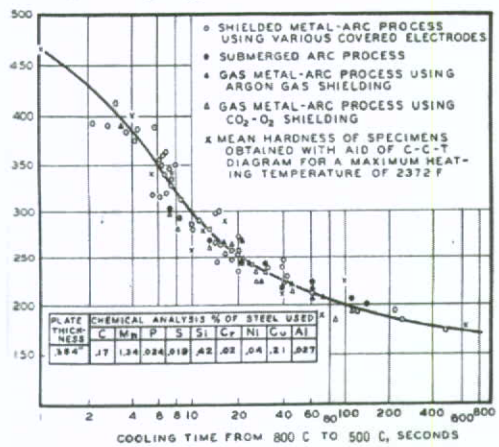
۳- روش‌های کنترل ناحیه HAZ

در استاندارد **AWS-D1.1** دو روش برای کنترل و جلوگیری از ترک خوردن ناحیه **HAZ** بیان شده است که عبارتند از:

۳-۱- کنترل سختی ناحیه HAZ

کنترل سختی ناحیه متأثر از حرارت مجاور جوش بر مبنای این واقعیت پایه‌گذاری شده است که اگر سختی ناحیه **HAZ** پایین‌تر از میزان بحرانی نگه داشته شود، ترک رخ نخواهد داد. این مهم توسط نگه داشتن نرخ سردشدن فلز جوش زیر مقادیر بحرانی که بستگی به قابلیت سخت‌شوندگی فلز پایه دارد بدست می‌آید. توانایی سختی‌پذیری فلز در جوشکاری وابسته به خاصیت ذاتی فلز در سختی پذیری ناحیه **HAZ** و نرخ سرد کردن می‌باشد که می‌تواند طیف متنوعی از عدد سختی را تولید نماید. فولادهای با سختی پذیری بالا می‌توانند حتی در سرعت‌های سرد شدن آهسته تولید **HAZ** با سختی بالا نسبت به فولادهای با سختی‌پذیری پایین با سرعت سرد شدن بالا نمایند. در نمودار شماره (۵) رابطه سختی با زمان سرد شدن ترسیم گردیده است.

تعیین سختی بحرانی وابسته به فاکتورهایی از جمله نوع فلز، میزان هیدروژن موجود در فلز جوش، درجه مهار و وضعیت در سرویس قرار گرفتن سازه دارد. مطابق نتایج آزمایشگاهی که روی جوش **Fillet** انجام گرفته‌است مشخص شده در جوشکاری بوسیله الکترودهای پر هیدروژن موقعی که سختی بر مبنای روش ویکرز در ناحیه **HAZ** پایینتر از **350V** باشد ترک روی نخواهد داد و برای جوشکاری با الکترودهای کم هیدروژن در سختی‌های پایین‌تر از **400V** ایجاد ترک در ناحیه **HAZ** محتمل نمی‌باشد. لازم به ذکر است سختی‌های ذکر شده در مواردی که امکان ایجاد ترک ناشی از خوردگی تنشی یا شکست ترد و یا سایر مواردی که سازه درحین کار تحت تنش‌های نامشخص و پیچیده قرار گیرد ریسک بوده و بایستی تدابیر لازم اتخاذ شود تا ایمنی سازه به خطر نیفتد.



نمودار (۵) : نمودار تجربی تخمین میزان حداکثر سختی ناحیه HAZ متناسب با نرخ سرد شدن در جوشکاری فولادها

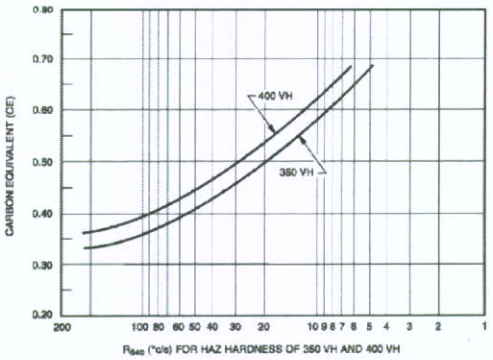
مطابق نمودار (۶) نرخ بحرانی سرد شدن برای تولید سختی مورد نظر بستگی به میزان کربن معادل فلز پایه دارد. با توجه به سرعت سرد شدن بحرانی می‌توان دمای

1- Dilution
2- Toe Weld

پیشگرم را محاسبه نمود ولی کاربرد مهم‌تر نرخ سرد شدن در تعیین حداقل حرارت ورودی و حداقل اندازه جوش است تا از گسترش و بروز ترک جلوگیری شود برای محاسبه کربن معادل از رابطه (۵) استفاده می‌شود.

$$C_E = C + \frac{Mn + Si}{6} + \frac{Cr + Mo + V}{5} + \frac{Ni + Cu}{15} \qquad (۵)$$

در فرمول فوق مقادیر بصورت درصد وزنی عناصر براساس آنالیز شیمیایی فلز مندرج در کلید فولاد می‌باشد.



نمودار (۶) : نرخ بحرانی سرد شدن برای سختی 350VH و 400 VH

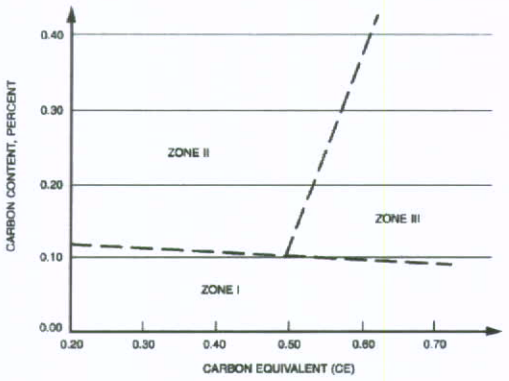
۳-۲- روش کنترل هیدروژن

پایه‌های روش کنترل هیدروژن بر این اصل بنا نهاده شده‌است که اگر میزان میانگین هیدروژن باقی مانده در فلز جوش پس از سرد شدن تا دمای 50 C° از حد بحرانی تجاوز ننماید ترک ایجاد نخواهد شد. میزان هیدروژن باقی مانده به عواملی نظیر ترکیب شیمیایی، درجه مهار سازه و میزان پیش گرمایش بستگی دارد. در واقع توسط این روش می‌توان میزان پیش‌گرمایش لازم را برای کاهش نرخ سرد شدن و داشتن زمان کافی برای خروج هیدروژن موجود در مذاب محاسبه نمود.

۴- انتخاب روش کنترل

بر اساس نمودار (۷) می‌توان روش مناسب جهت کنترل سختی و یا مقدار هیدروژن باقی مانده را انتخاب نمود خصوصیات هر ناحیه و پیشنهاد فعالیت مربوط به آن به شرح ذیل است.

ناحیه یک: ترک خوردن در این ناحیه معمولاً بعید است. ولی در مواقعی که میزان هیدروژن زیاد یا درجه مهار بالا باشد ممکن است که اتفاق بیفتد بنابراین بهتر است از روش کنترل هیدروژن برای تعیین دمای پیشگرم استفاده شود.



نمودار (۷) : دیاگرام تقسیم‌بندی نواحی برای فولاد در روش کنترل هیدروژن

ناحیه دوم: در این ناحیه بایستی از روش کنترل سختی جهت تعیین میزان حداقل انرژی حرارتی ورودی به فلز جهت تعیین میزان سختی مجاز جوش تک پاسه **Fillet** بدون پیشگرم استفاده کرد. در جوش‌های شیاری از روش کنترل هیدروژن برای تعیین دمای پیشگرم استفاده می‌شود. در فولادهای با کربن بالا یک حداقل انرژی برای کنترل سختی و پیش‌گرمایش برای کنترل هیدروژن در هر دو نوع جوش شیاری و گوشه‌ای ممکن است بکار برده شود.

ناحیه سوم: در این ناحیه بایستی از روش کنترل هیدروژن استفاده نمود در مواقعی که میزان حرارت ورودی فقط به حفظ خصوصیات ناحیه **HAZ** محدود شده باشد از روش کنترل هیدروژن استفاده می‌شود.

۵- نتیجه‌گیری

- سه مؤلفه حرارت ورودی مناسب، اندازه ساق جوش متناسب با حرارت ورودی و تعداد پاس‌های جوش مورد نیاز برای تولید ساق مورد نظر مواردی هستند که در هنگام طراحی **WPS** و در حین اجرای جوشکاری بایستی مدنظر باشند. عدم رعایت موارد فوق سبب تغییرات ناخواسته متالورژیکی در ناحیه جوش و رشد نامتعارف دانه‌ها در ناحیه HAZ می‌شود همچنین تغییرات سختی در این نواحی هنگامی که سازه تحت تأثیر بارهای دینامیکی (خستگی جوش) قرار گیرد بسیار خطرناک است.

- اکثر جوشکاران ساختمانی برای یک جوش با ابعاد مشخص که در سه پاس باید جوشکاری شود پاس دوم را به جای پاس‌های دوم و سوم جوشکاری می‌کنند در این صورت با فرض ثابت بودن ولتاژ و آمپر الزامی است سرعت جوشکاری نصف گردد.
- برای کنترل و جلوگیری از ترک خوردن ناحیه HAZ ، می‌بایستی سختی این ناحیه و هیدروژن باقیمانده در فلز جوش با توجه به کربن معادل فلز پایه کنترل شود. لازم به ذکر است تعین دمای پیشگرم مناسب تأثیر قابل توجهی در کاهش ترک در ناحیه HAZ دارد.

مراجع

1- T. Iwashita, K. Azuma and Y. Makino and Y. Kurobane. "Fracture from Fatigue Cracks Installed at Weld Toes of Plate to Plate T-Joints"- 1999

2- J.E. Partridge, P.E.and S.R. Paterson, M.S. CWI and R.M. Richard, Ph.D, P.E." Low Cycle Fatigue Tests and Fracture Analyses of Bolted-Welded Seismic Moment Frame Connections – July 3, 2000

3- Binnur G¨OREN KIRAL, Se¸cil ER¸IM" Fracture Assessment of Welded Steel Structures Using the SINTAP"-2004

4- Iman Hadipour, and Javad Marzbanrad" Stabilizer Fillet Weld Strength under Multiaxial Loading (Effect of Force, Size and Residual Stress)"-2007

5- Binnur Gören Kıral" EFFECTS OF THE WELD ELECTRODE ON THE FRACTURE BEHAVIOR OF WELDED STEEL BEAM-TO-COLUMN JOINTS"-2004

6- Kam Deng , Gilbert Y.Grondin and Robert G.Driver" Effect of Loading Angle on the Behavior of Fillet Welds"-2003

7- WELDINGMETALLURGY –SINDOKOU

8- AWS-D1.1 – 2002

9- AWS WELDING JOURNAL JUL 2001

بیوگرافی

آقای جعفر رضازاده دارای کارشناسی ارشد تکنولوژی مواد از انستیتوی ملی فناوری هندوستان (NITW) بوده و جمعاً ۹ سال سابقه کار دارد که حدود ۵ سال آن در قدس نیرو و پروژه‌های نیروگاهی می‌باشد. زمینه کاری و علاقمندی آقای مهندس رضازاده جوشکاری سوپر آلیاژها، نانو مواد و انتخاب مواد مهندسی است.

Email:
Jafar_049 @ yahoo.com

شناسایی و بررسی پدیده واگرایی (Divergence)

(مطالعه موردی هسته رسی سدهای خاکی)

رسول فرج‌نیا

کارشناس ارشد مهندسی ژئوتکنیک (عمران _خاک و پی) - SBU آب

واژه‌های کلیدی: واگرایی، فرسایش، هسته رسی، آبشستگی، سد سنگریزه‌ای

چکیده

خاک رس واگرا خاکی است که به علت رفتار خاص فیزیکی- شیمیایی دانه‌های آن در تماس با آب نسبتاً خالص، ذرات منفرد رس، پراکنده واز یکدیگر جدا می‌گردد. در این حالت، خاک رس به شدت فرسایش‌پذیر می‌شود، به صورتی که حتی تحت تأثیر تنش‌های بسیار کوچک روان می‌گردد. مسأله آبشستگی داخلی یا رگاب و مشکلات ناشی از آن، عمده‌ترین مسأله در خاک‌های واگراست که به ویژه در سازه‌های آبی مطرح می‌باشد. این پدیده در بسیاری از سدهای خاکی، خاکریزها، بستر کانال‌ها و سازه‌های آبی دیگر دیده شده است. در این تحقیق ضمن بررسی پدیده واگرایی و معرفی آزمایش‌های مربوطه برای شناسائی خاک‌های واگرا، بعنوان مطالعه موردی، مطالعات انجام شده روی مصالح ریزدانه خاک رس برای استفاده در هسته رسی سد سنگریزه‌ای بعنوان المان نفوذناپذیر پرداخته شده است.

۱- مقدمه

خاک رس واگرا، به خاکی اطلاق می‌گردد که حالت فیزیکی- شیمیایی دانه‌های آن به گونه‌ای است که در تماس با آب نسبتاً خالص، ذرات منفرد رس، پراکنده واز یکدیگر جدا می‌گردد. در این حالت، خاک رس به شدت فرسایش‌پذیر می‌شود، به صورتی که حتی تحت تأثیر تنش‌های بسیار کوچک (همچون جریان آب با گرادیان هیدرولیکی کم) روان می‌گردد. همچنین برخی از خاک‌های غیرچسبنده مانند لای‌ها یا ماسه‌های بسیار ریزدانه نیز قابلیت فرسایش بسیار زیادی دارند، لیکن روند فرسایش این خاک‌ها در اثر جریان آب صرفاً مکانیکی بوده و ارتباطی به پدیده واگرایی که مختص رس‌های ریزدانه است نمی‌باشد. وجود خاصیت واگرایی در یک خاک رس وابسته به متغیرهای مختلفی از جمله کانی‌شناسی و ترکیبات شیمیایی ذرات رس، املاح محلول در آب حفره‌ای و آب جاری از میان ذرات خاک دارد. رس‌های واگرا حتی در مقایسه با خاک‌های لای و ماسه ریزدانه، از فرسایش‌پذیری بیشتری در مقابل جریان آب برخوردارند. به طور کلی، آبشستگی با حرکت و مهاجرت ذرات رس واگرا در پایین‌دست سازه خاکی یا در محل اتصال توده رس واگرا به لایه‌های دارای نفوذپذیری زیاد آغاز می‌شود و فرآیند فرسایش در داخل یا زیر سازه به نواحی با بار آبی بیشتر در بالادست پیشروی می‌کند و سرانجام مسیر فرسایش یافته به صورت یک مجرا به منبع آب متصل می‌شود. در این مرحله، در صورت وجود آب کافی در منبع، آب با شدتی بسیار بیشتر جریان می‌یابد و روند فرسایش ادامه می‌یابد که ممکن است در مدت کوتاهی به تخریب سازه منجر شود.

۲- شناسایی خاک‌های واگرا

شناسائی کامل ودقیق خاک‌های واگرا در محل و بدون انجام آزمایش‌های آزمایشگاهی مخصوص عملاً مشکل و غیرممکن می‌باشد. با این وجود در بررسی‌های صحرائی وجود

شکاف‌ها، اثرات آب شستگی در خاک محل و همچنین کدر و گل آلود بودن آب‌های ناحیه پتانسیل واگرایی مصالح را نشان می‌دهد. در شکل (۱) نمونه‌ای از پتانسیل واگرایی خاک منطقه‌ای بر اساس شیارهای حاصل از آب شستگی در سطوح شیب دار نشان داده شده است.

شکل (۱) : شیارهای حاصل از پدیده واگرایی در سطوح شیب‌دار

به علت عدم شناخت کامل ماهیت فیزیکی- شیمیایی پدیده واگرایی و مکانیسم پیچیده آبشستگی، تا به حال آزمایش یگانه‌ای که بتوان به کمک آن میزان واگرایی خاک‌های رسی را تشخیص داد، ابداع نشده است. بنابراین جهت شناسایی خاک‌های واگرا آزمایش‌های خاصی پیشنهاد گردیده است. خاک‌های واگرا به کمک آزمایش‌هایی نظیر دانه‌بندی و حدود اتربرگ که به طور معمول در آزمایش‌های مکانیک خاک برای طبقه‌بندی خاک‌ها از آنها استفاده می‌شود، تشخیص داده نمی‌شود لذا بدین‌منظور از آزمایش‌های ویژه‌ای برای تعیین واگرایی خاک استفاده می‌گردد.

روش‌های آزمایشگاهی ارائه شده متداول برای تعیین واگرایی خاک عبارتند از:

۱- آزمایش سوراخ سوزنی یا پین‌هول
۲- آزمایش کرامپ
۳- آزمایش‌های شیمیایی (تعیین درصد نمک‌های محلول در آب منفذی).
۴- آزمایش هیدرومتری دوگانه
۵- آزمایش هیدرومتری سه گانه
۶- آزمایش کاهش غلظت[1]
۷- آزمایش شاخص واگرایی
۸- آزمایش استوانه چرخان

آزمایش‌های آزمایشگاهی متداول عبارتند از: آزمایش سوراخ سوزنی یا پین‌هول، آزمایش کرامپ، آزمایش‌های شیمیایی و آزمایش هیدرومتری دوگانه، نکته مهم در انجام این آزمایش‌ها آن است که آزمایش‌های تشخیص خاک‌های واگرا بایستی برروی تعداد زیادی نمونه انجام شود زیرا در بسیاری از مناطق خاک‌های واگرا بصورت موضعی هستند و بنابراین انجام تعداد کم آزمایش‌ها نمی‌تواند معرف کامل واگرایی آن منطقه باشد. همچنین بایستی کلیه نمونه‌های خاک در شرایط رطوبت طبیعی نگهداری و آزمایش گردند. در ادامه شرح مختصری از آزمایش‌های متداول ارائه شده است.

۲-۱- آزمایش سوراخ سوزنی یا پین‌هول

این آزمایش توسط شرارد و همکارانش ابداع گردید و در چند سال اخیر معتبرترین آزمایش فیزیکی بوده که به طور گسترده مورد استفاده قرار گرفته است. در طی تحقیقات انجام شده توسط *USBR* در سال ۱۹۸۲، اصلاحاتی در روش آزمایش اولیه داده شد. روش انجام این آزمایش به طور کامل در استاندارد *ASTM D 4647* شرح داده است. این آزمایش به طور مستقیم معرف میزان فرسایش‌پذیری خاک ریزدانه متراکم یا دست نخورده، در شرایط نشت متمرکز آب از داخل ترک‌های خاکی می‌باشد. آزمایش با جریان دادن آب مقطر، از میان یک سوراخ افقی در نمونه خاکی به قطر ۳۸ میلیمتر آغاز می‌گردد. در ابتدا بار آبی[2] جریان، کم و بتدریج بار آبی افزایش می‌یابد. در این شرایط چگونگی محلول خارج شده از سوراخ و دبی آن، بیانگر تفاوت بین خاک رس واگرا و غیرواگرا می‌باشد. آب جریان یافته در خاک‌های رس واگرا، گل‌آلود بوده و علاوه بر آن اندازه سوراخ میان خاک سریعاً بزرگتر و جریان آب خروجی از خاک بیشتر می‌گردد. در خاک‌های رسی با واگرایی متوسط، آب خروجی تا حدی کدر، اندازه قطر سوراخ و شدت جریان خروجی ثابت است. در صورت عدم وجود خاصیت واگرایی در خاک، آب خروجی کاملاً شفاف بوده و هیچگونه افزایش در قطر سوراخ مشاهده نمی‌گردد. بایستی نمونه خاک در شرایط رطوبت طبیعی آزمایش شود، زیرا خشک شدن خاک ممکن است بر روی نتایج آزمایش بسیاری از خاک‌ها تأثیر بگذارد. پس از هر آزمایش، خارج ساختن نمونه و بررسی نحوه و میزان فرسایش سوراخ از طریق مشاهده، اطلاعات بدست آمده را کامل‌تر می‌نماید.

1- Dilution Turbidity Test
2- Head

۲-۲- آزمایش کرامپ

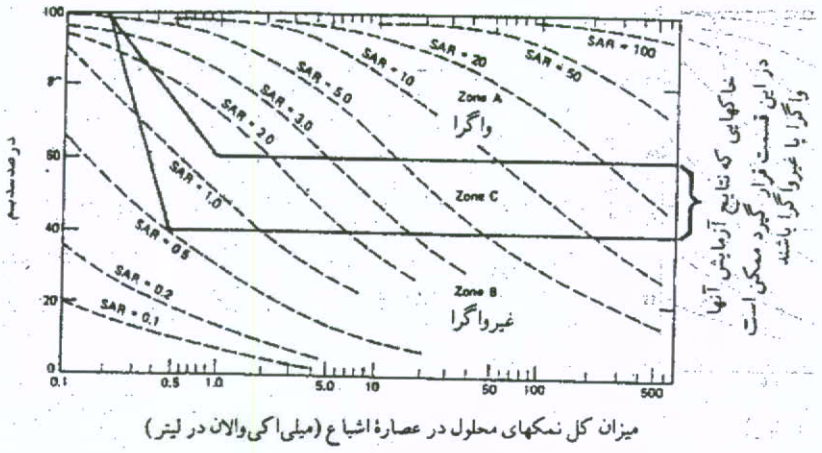
این آزمایش به آزمایش امرسون نیزمعروف می‌باشد. در این آزمایش ابتدا تکه کوچکی از خاک (به قطر ۶ تا ۹ میلیمتر) در داخل ظرفی که حاوی۱۵۰ سانتیمتر مکعب آب مقطر است می‌اندازیم. پس از گذشت مدت زمان اندکی میزان جدا شدن ذرات رس از نمونه و تشکیل محلول کلوئیدی مورد بررسی و ارزیابی قرار می‌گیرد که واکنش ذرات خاک رس در مقابل آب، یکی از حالت‌های، بدون واکنش- واکنش خفیف- واکنش متوسط و واکنش شدید را نتیجه می‌دهد. از این آزمایش برای تخمین تقریبی وسریع درصد واگرایی در آزمایش هیدرومتری دوگانه نیز استفاده می‌گردد. در مجموع اگر خاکی در آزمایش کرامپ از خود واکنشی نشان دهد به احتمال زیاد واگرا می‌باشد.

۲-۳- آزمایش‌های شیمیایی (تعیین درصد نمک‌های محلول در آب منفذی)

این آزمایش برای تعیین درصد نمک‌های محلول بر روی آب منفذی خاک انجام می‌گردد. در این آزمایش نمونه‌ای از خاک رس با رطوبت طبیعی تهیه شده و میزان رطوبت آن با افزودن آب مقطر به حد روانی رسانده می‌شود. حال مقداری از آب منفذی خاک را جدا می‌نمائیم، این آب منفذی خارج شده از نمونه به شیره اشباع یا عصاره اشباع خاک موسوم می‌باشد که این عمل معمولاً با ایجاد خلاء و استفاده از صافی در آزمایشگاه انجام می‌گیرد. در ادامه کاتیون‌های فلزی (کلسیم، منیزیم، سدیم و پتاسیم) موجود درآب منفذی برحسب میلی‌اکی‌والان در لیتر تعیین می‌گردد. بر اساس درصد کاتیون‌های موجود، درصد سدیم موجود نسبت به کل کاتیون‌های فلزی در عصاره اشباع تعیین می‌گردد. در شکل (۲)، براساس درصد سدیم واگرایی و غیر واگرایی خاک تعیین می‌گردد.

۲-۴- آزمایش هیدرومتری دوگانه

این آزمایش از اولین روش‌های شناسایی واگرایی خاک‌های رس می‌باشد. در این روش، توزیع دانه‌بندی ذرات ریزدانه خاک ابتدا در آزمایش هیدرومتری استاندارد با آب مقطر و همزن مکانیکی قوی و با ماده پراکنده‌ساز، تعیین می‌گردد. سپس روی نمونه‌ای دیگر از همین خاک آزمایش هیدرومتری، بدون استفاده از ماده پراکنده‌ساز و همزن مکانیکی صورت می‌گیرد. سپس نسبت وزن ذرات به قطر کمتر از ۰/۰۰۵ میلیمتر در آزمایش دوم به همین مقدار در آزمایش اول، محاسبه شده و به عنوان «درصد واگرایی» گزارش می‌شود. برای رسیدن به نتیجه مطلوب انجام تعداد زیادی از این آزمایش لازم است. روش هیدرومتری روشی متداول در تعیین دانه‌بندی خاک‌های ریزدانه می‌باشد. نتایج تحقیقات انجام گرفته حاکی از آن است که احتمال فرسایش و آبشستگی رس‌ها با درصد واگرایی بیش از ۴۰ بسیار زیاد می‌باشد. همچنین علاوه بر این آزمایش، آزمایش هیدرومتری سه گانه نیز برای تعیین واگرایی خاک‌ها ارائه شده است. روش انجام آزمایش هیدرومتری سه‌گانه شبیه آزمایش هیدرومتری دوگانه می‌باشد با این تفاوت که آزمایش هیدرومتری سومی با آب مخزن سد و بدون استفاده از همزن مکانیکی بر روی نمونه خاک انجام می‌گردد. در این آزمایش اثر آب مخزن در تماس با خاک در میزان واگرایی بررسی می‌شود.



شکل (۲) : نمودار ارزیابی واگرایی خاک رس

۳- بررسی واگرایی مصالح رسی (مطالعه موردی)

عمده‌ترین مسأله خاک‌های واگرا، مسأله آب شستگی‌های داخلی و مشکلات ناشی از آن می‌باشد که بویژه در سازه‌های آبی مطرح می‌باشد. این پدیده در بسیاری از سدهای خاکی، خاکریزها، بستر کانال‌ها و سازه‌های آبی دیگر که با این خاک‌ها ساخته شده‌اند دیده شده است. در این تحقیق به بررسی پتانسیل واگرایی مصالح ریزدانه برای استفاده در هسته رسی بعنوان المان نفوذ ناپذیر سد سنگریزه‌ای پرداخته شده است. سدهای سنگریزه‌ای با المان آب‌بند هسته رسی ساخته می‌شوند در این مورد مطالعاتی سد سنگریزه‌ای با ارتفاع ۹۳ متری، به علت حجم بالای مورد نیاز مصالح ریز دانه برای هسته نفوذ ناپذیر وبه علت تغییرات منبع قرضه و شناسائی منابع قرضه جدید تغییرهایی در پارامترهای مقاومتی مصالح ریزدانه مشاهده می‌گردد. بدین‌منظور لیستی از آزمایشات آزمایشگاهی برای تعیین پارامترهای مقاومتی، نفوذپذیری و تشخیص واگرایی برای کنترل مشخصات فنی مصالح ریزدانه قرضه جدید درحین ساخت ارائه گردیده است. منبع قرضه پیشنهاد شده بدلیل فاصله حمل کم نسبت به محورسد، دسترسی وحمل آسان مورد توجه قرار گرفته شده است. در شکل (۳) پلان بدنه سد سنگریزه‌ای و نواحی مختلف تشکیل‌دهنده نشان داده شده است.

شکل(۳) : پلان بدنه سد سنگریزه‌ای و نواحی مختلف

به منظور کنترل مشخصات فنی لازم مصالح ریزدانه برای استفاده در هسته رسی علاوه بر آزمایش‌های دانه‌بندی، طبقه‌بندی و تعیین پارامترهای مقاومتی و نفوذپذیری، وضعیت واگرایی مصالح مورد توجه قرار گرفته است. بعد از انجام آزمایش‌های دانه‌بندی و طبقه‌بندی که غالب آن نشان‌دهنده مصالح مناسب از نظر دانه‌بندی و حد خمیری برای استفاده در هسته رسی می‌باشد، در پروژه مذکور به منظور ارزیابی وضعیت واگرایی خاک رس منبع قرضه جدید برای استفاده در هسته رسی، آزمایش‌های کرامپ، سوراخ سوزنی یا پین‌هول و آزمایش شیمیائی (به علت خطای ذاتی و احتمالی در انجام این آزمایشات) بر روی حداقل ۱۰ نمونه (بر اساس حداقل توصیه استانداردهای موجود) گرفته شده از نقاط و عمق‌های مختلف منبع قرضه جدید درخواست گردیده که ضمن بررسی نتایج حاصله، وضعیت پتانسیل واگرایی خاک مورد بررسی قرار گرفته است. نتایج آزمایش‌های واگرایی انجام گرفته درجدول (۱) ارائه شده است.

جدول (۱) : نتایج آزمایشات واگرایی منبع قرضه جدید

شماره نمونه آزمایش	آزمایش پین هول	آزمایش کرامپ	آزمایش شیمیایی
۱	غیر واگرا	واگرا	واگرا
۲	واگرا	واگرا	واگرا
۳	غیر واگرا	واگرا	واگرا
۴	غیر واگرا	واگرا	واگرا
۵	غیر واگرا	واگرا	واگرا
۶	غیر واگرا	واگرا	واگرا
۷	واگرا	واگرا	واگرا
۸	غیر واگرا	واگرا	واگرا
۹	غیر واگرا	واگرا	واگرا
۱۰	واگرا	واگرا	واگرا

براساس نتایج انجام آزمایشات واگرایی مشخص می‌گردد که از هر ده نمونه آزمایش واگرایی کرامپ و شیمیایی هر ده نمونه واگرا بوده و سه نمونه از ده نمونه آزمایش واگرایی پین‌هول نیز واگرایی را نشان می‌دهد بنابراین مسأله واگرایی در خاک رس موجود در منبع قرضه ریزدانه جدید مشهود می‌باشد. در این مطالعه موردی ۱۰ متر از ارتفاع بدنه سد باقی مانده است و به علت تغییرات متناوب تراز آب مخزن سد، در تراز بالایی مخزن، در این نواحی هسته رسی درسیکل خشک شدن و تر شدن متوالی قرار خواهد گرفت که احتمال فرسایش وآب شستگی مصالح ریز دانه هسته رسی در تماس با آب مخزن با مرور زمان وجودخواهد داشت. بنابراین استفاده از این مصالح ریزدانه با خاصیت واگرایی در ادامه هسته سد منتفی اعلام گردید.

۴- جمع‌بندی و نتیجه‌گیری

شناسائی کامل و دقیق خاک‌های واگرا در محل و بدون انجام آزمایش‌های آزمایشگاهی عملاً مشکل و تقریبا غیر ممکن می‌باشد بنابراین روش‌های مختلف آزمایشگاهی برای این منظور ارائه شده که در متن به توضیح روش‌ها پرداخته شده است. برای تشخیص واگرایی خاک منطقه‌ای بایستی آزمایش‌های واگرایی برروی تعداد زیادی نمونه (حداقل ۱۰ نمونه) که از نقاط و عمق‌های مختلف منطقه برداشت گردیده و معرف وضعیت کل منطقه باشد انجام گردد. براساس روش‌های مطرح برای تعیین واگرایی خاک‌های ریزدانه در صورتیکه در دو آزمایش هیدرومتری مضاعف و کرامپ نمونه‌ای واگرا تشخیص داده شود خاک مورد نظر حتماً واگرا می‌باشد. همچنین آزمایش پین‌هول بهترین روش شناسائی خاک‌های واگرا بوده و آزمایش شیمیایی جزء آزمایش‌های تکمیلی برای تأیید واگرایی خاک‌ها مورد استفاده قرار می‌گیرد. دربیشتر موارد نتایج حاصل از روش‌های مختلف یکسان هستند اما موارد استثنائی نیز وجود دارد که به همین دلیل بهتر است از هر چهار آزمایش مذکور استفاده گردد. همچنین در مناطقی که تهیه مصالح غیر واگرا امکان‌پذیر نباشد بایستی با افزودن مواد شیمیایی نظیر آهک، سولفات آلومنیوم به خاک واگرا وضعیت خاک را بهبود بخشیده و خاک غیر واگرای لازم را جهت استفاده در محل‌های بحرانی که امکان آب شستگی و فرسایش دارند را فراهم نمود.

۵- مراجع

۱- بررسی پدیده واگرایی خاک‌های رسی در سازهای هیدرولیکی، دانشگاه علم و صنعت، پرویز سرشار ۱۳۷۰

2- ASTM D 4221 : Standard Test Method For Dispersive Characteristics of Clay Soil by Double Hydrometer.

3- ASTM D 4647 : Standard Test Method For Identification and Classification of Dispersive Clay Soil by the Pinhohe Test

بیوگرافی

آقای رسول فرج نیا دارای مدرک کارشناسی ارشد مهندسی عمران - ژئوتکنیک می‌باشد. ایشان دارای ۶ سال سابقه بوده که ۴ سال آن در قدس نیرو است. زمینه علاقمندی آقای فرجنیا پایداری فضاهای زیر زمینی، شیروانی‌ها، طراحی سدهای خاکی و سنگریزه‌ای و تعیین ظرفیت باربری پی‌های سطحی می‌باشد.

Email:
sfarajnia@ghods-niroo.com

انرژی هسته‌ای

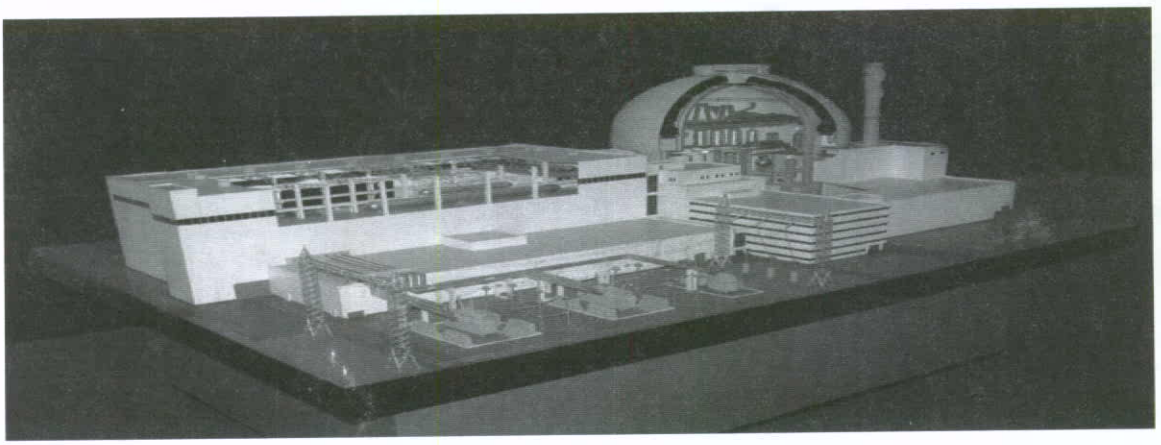
مهدی دوستکام

مدیریت مهندسی - SBU نفت و گاز

واژه‌های کلیدی: شکافت (واپاشی) هسته‌ای، همجوشی هسته‌ای، اورانیوم U^{235} ، پوزیترون، نوترینو، رآکتور

چکیده

انرژی حاصل از شکافت هسته‌ای در رآکتورهای اتمی در حال حاضر تنها انرژی است که می‌تواند (در ظرفیت بالا) عملاً جانشین انرژی سوخت‌های فسیلی شود. تنها ماده قابل شکافت موجود در طبیعت اورانیوم ۲۳۵ است که حدود ۱/۱۴۰ اورانیوم طبیعی را تشکیل می‌دهد و بقیه یعنی اورانیوم ۲۳۸ در رآکتورهای معمولی آب سبک قابل شکافت نمی‌باشد. مقدار ذخایر اورانیوم معادن کره زمین حدود $۲/۵ \times ۱۰^{۱۰}$ کیلوگرم برآورد شده است. با پایان گرفتن معادن اورانیوم تنها راه بشر استفاده از انرژی همجوشی هسته‌ای می‌باشد.



۱- مقدمه

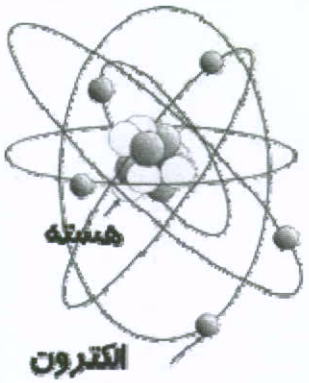
برآورد کارشناسان آژانس بین‌المللی انرژی اتمی نشان می‌دهدکه با تکنولوژی جدید رآکتورهای سریع زاینده می‌توان تا حدود ۳۰۰۰Q (ژول $Q= ۱/۰۵ \times ۱۰^{۲۱}$) از کل اورانیوم قابل استحصال در طبیعت انرژی بدست آورد که می‌تواند جوابگوی نیاز بشر برای چند صد سال آینده باشد. در سه دهه اخیر، تحقیقات گداخت هسته‌ای توجه بسیاری را بخود جلب کرده است. عمل گداخت هسته‌ای عکس شکافت است و همان فرآیندی است که در خورشید رخ می‌دهد. در این فرآیند از ترکیب هسته‌ای اتم سبک‌تر (هیدروژن) به هسته‌های سنگین‌تر (هلیوم) انرژی تولید می‌گردد.

۲- انرژی هسته‌ای

در سال ۱۹۰۵ «اینشتین» نتیجه‌گیری کرد که جرم هر ماده با سرعت آن افزایش پیدا می‌کند و فرمول مشهور خود $E = mc^2$ را که بیانگر هم‌ارزی جرم و انرژی است بیان نمود.

در زمان اینشتین بررسی تجربی مقدور نبود و اینشتین نتوانست مفاهیم معادله خود را پیش‌بینی کند.

در اوایل قرن بیستم یک سری آزمایش با ذرات مختلف حاصل از مواد پرتوزا به فهم ساختار اتم و هسته منجر شد.



شکل (۱)

۳- تاریخچه انرژی هسته‌ای

در سال ۱۸۹۳ زمانیکه دو شیمیدان آلمانی اتوهان و فریتز استرسمن و فیزیکدانان اتریشی لایز متیز و اتورابرت فریش در حال آزمایش بر روی اورانیوم بمباران شده بودند متوجه شدند که نوترون شلیک شده می‌تواند نتیجه‌ای باورنکردنی داشته باشد و هسته اورانیوم را به دو یا چند قسمت تقسیم کند. بعدها دانشمندان زیادی (و در صدر آنها لیوزیلارد) دریافتند که پخش تعدادی نوترون در فضا هنگام یک شکافت هسته‌ای می‌تواند واکنشی زنجیره‌ای به وجود آورد.

این کشف، دانشمندان را در برخی کشورها (از جمله ایالات متحده، انگلستان، فرانسه، آلمان و اتحاد جماهیر شوروی) بر آن داشت تا از دولت‌های خود برای ادامه تحقیقات در این زمینه درخواست پشتیبانی مالی کنند.

انرژی هسته‌ای نخستین بار به وسیله انریکوفرمی در سال ۱۹۳۴ در یکی از آزمایشگاه‌های دانشگاه شیکاگو تولید شد. این اتفاق زمانی رخ داد که تیم او مشغول بمباران کردن هسته اورانیوم با نوترون بودند. این پروژه (که به نام Chicago Pile-1 شناخته شد) با فوریت تمام در ۲ دسامبر ۱۹۴۲ به بهره‌برداری رسید و بعدها به بخشی از پروژه منهتن تبدیل شد. طی این پروژه راکتورهای بزرگی را برای دستیابی به پلوتونیوم و استفاده از آن در سلاح هسته‌ای در هانفورد واشینگتن راه‌اندازی کردند.

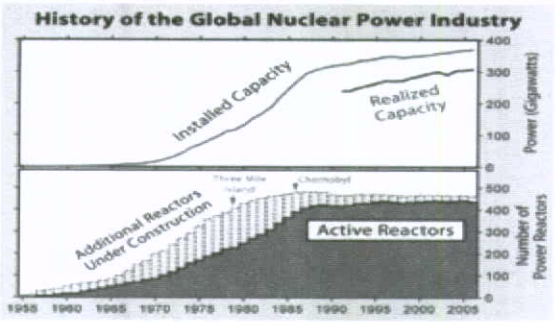
در ۲۰ دسامبر ۱۹۵۱ برای اولین بار در یک پایگاه آزمایشگاهی به نام EBR-1 از راکتور هسته‌ای برای تولید انرژی الکتریکی و در حدود ۱۰۰ کیلووات، استفاده شد.

۴- سال‌های آغازین

در سال ۱۹۵۴ لوییس اشتراوس و پس از آن چیرمن رئیس کمیسیون انرژی اتمی ایالات متحده آمریکا درباره تولید انرژی الکتریکی به وسیله انرژی هسته‌ای و تولید انرژی الکتریکی ارزان نظریه خود را اعلام نمودند.

سرانجام در ۲۷ ژوئن ۱۹۵۴ اولین نیروگاه هسته‌ای جهان که به شبکه برق متصل گردید در اتحاد جماهیر شوروی، در شهر اُبنیسک به بهره‌برداری رسید. این نیروگاه توانی در حدود ۵ مگا وات داشت. در سال ۱۹۵۶ اولین نیروگاه تجاری هسته‌ای در انگلستان به بهره‌برداری رسید که توانی در حدود ۵۰ مگا وات تولید می‌کرد.

!Error



شکل (۲) : نمودار تاریخچه استفاده از انرژی هسته‌ای

Years Of Nuclear Energy

همانطور که در نمودار شکل (۲) مشخص است رشد استفاده از انرژی هسته‌ای در اواسط دهه ۱۹۸۰ به شدت کاهش یافته است.

۵- شکافت هسته‌ای

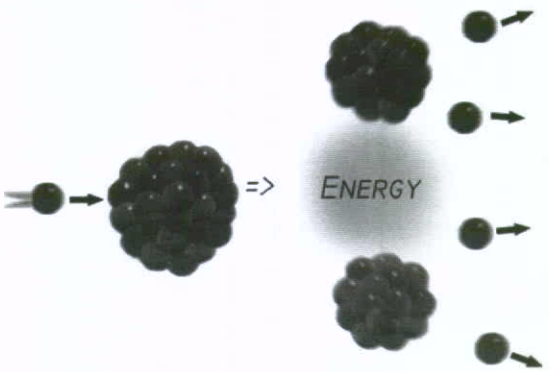
شکل (۳)

اگر نوترون منفردی به ایزوتوپ U^{235} نفوذ کند ، در اثر برخورد به هسته اتم U^{235} ، اورانیوم به دو قسمت شکسته می‌شود که اصطلاحاً شکافت هسته‌ای نامیده می‌شود. در

واکنش‌های شکافت هسته‌ای مقادیر زیادی نیز انرژی آزاد می‌گردد (در حدود 200Mev) اما مسأله مهم‌تر اینکه نتیجه شکستن هسته U^{235} آزادی دو نوترون است که می‌تواند دو هسته دیگر را شکسته و چهار نوترون را آزاد کند. این چهار نوترون نیز چهار هسته U^{235} را می‌شکنند. چهار هسته شکسته شده تولید هشت نوترون می‌کنند که قادر به شکستن همین تعداد هسته اورانیوم می‌باشند. سپس شکافت هسته‌ای و آزاد شدن نوترون‌ها بصورت زنجیروار به سرعت تکثیر و توسعه می‌یابد. در هر دوره تعداد نوترون‌ها دو برابر می‌شود و در یک لحظه واکنش زنجیری خودبخودی شکافت هسته‌ای شروع می‌گردد. در واکنش‌های کنترل شده هسته‌ای تعداد شکافت در واحد زمان و نیز مقدار انرژی بتدریج افزایش یافته و پس از رسیدن به مقداری دلخواه ثابت نگاه داشته می‌شود.

۵-۱- انرژی شکافت هسته‌ای

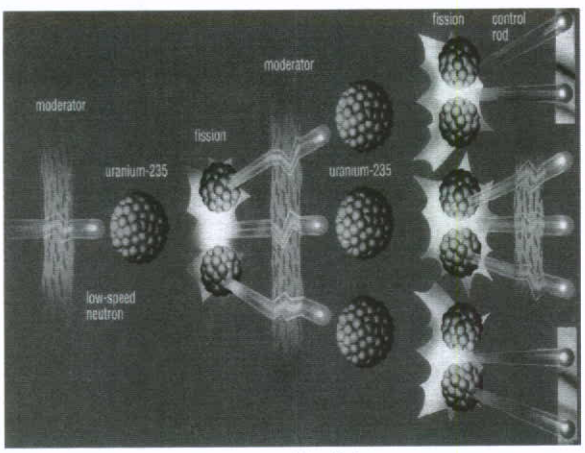
کشف انرژی هسته‌ای در جریان جنگ جهانی دوم صورت گرفت و اکنون برای شبکه برق بسیاری از کشورها، هزاران کیلو وات انرژی الکتریکی تولید می‌کند. بحران انرژی بر اثر بالارفتن قیمت نفت در سال ۱۹۷۳ استفاده از انرژی شکافت هسته‌ای را بیشتر وارد صحنه کرد. در حال حاضر ممالک اروپایی انرژی هسته‌ای را تنها انرژی می‌دانندکه می‌تواند در اکثر موارد جایگزین نفت شود.



شکل (۴)

۵-۲- شکافت اورانیوم U^{235}

در نیروگاه‌های هسته‌ای، اورانیوم U^{235} به عنوان سوخت محسوب می‌شود ولی به دلیل اینکه در طبیعت با عیار کم یافت می‌شود، بایستی غنی‌سازی اورانیوم انجام شود. در شکافت U^{235}، وقتی نوترون کُند به U^{235} برخورد می‌کند، به U^{236} تبدیل می‌شود. نهایتاً تبدیل به دو پارهٔ شکافت و ۲ نوترون با انرژی آزاد شده‌ای در حدود Mev ۲۰۰ می‌شود. در واکنش‌های شیمیایی مثل انفجار به ازای هر مولکول حدود ۳۰Mev انرژی آزاد می‌شود. لازم به ذکر است در رآکتورهای هسته‌ای که با نوترون کار می‌کنند، طبق واکنش‌های به عمل آمده ۲ الی ۳ نوترون سریع تولید می‌شود. برای ادامه کار حتماً این نوترون‌های سریع باید کند شوند.



شکل (۵)

۶- همجوشی هسته‌ای

از دیرباز بشر در آرزوی دستیابی به منبعی از انرژی بوده که علاوه بر آنکه بتواند مدت مدیدی از آن استفاده کند، تولید پسماندهای خطرناک نیز نداشته باشد. در هزاره سوم میلادی این آرزوی به ظاهر دست نیافتنی کم‌کم به واقعیت می‌پیوندد. بشر خود را آماده می‌کند تا با ساخت اولین رآکتور گرما هسته‌ای (همجوشی هسته‌ای) آرزوی نیاکان خود را تحقق بخشد. سوختی پاک و ارزان به نام هیدروژن با انرژی تولیدی سرشار و پسماندهای بسیار پاک به نام هلیوم. حال به طور خلاصه به واکنش‌های گرما هسته‌ای و راهکارهای استفاده از آن می‌پردازیم.

۷- خورشید و ستارگان

سالهاست که دانشمندان واکنشی را که در خورشید و ستارگان رخ داده و در آن انرژی تولید می‌کند کشف کرده‌اند. این واکنش عبارتست از ترکیب (برخورد) هسته‌های چهار اتم هیدروژن معمولی و تولید یک هسته اتم هلیوم. بالاترین دمایی که در خورشید وجود دارد مربوط به مرکز آن است که برابر ۱۵×۱۰^{۶} درجه سانتیگراد

می‌باشد. در دیگر ستارگان بزرگترین دما به ۲۰×۱۰^{۶} درجه سانتیگراد می‌رسد.

به همین خاطر تصور بر این است که واکنش معروف ترکیب هیدروژن معمولی و تولید یک اتم هلیوم در سایر ستارگان بزرگ باعث تولید انرژی نمی‌شود، بلکه احتمالاً چرخهٔ کربن به کمک آمده و کوره آنها را روشن نگه می‌دارد. منظور از چرخه کربن آن است که ابتدا یک اتم هیدروژن معمولی با یک اتم C^{12} ترکیب می‌شود (همجوشی) و یک اتم N^{13} به همراه یک پرتو گاما را آزاد می‌کند. سپس این اتم با یک واپاشی به یک اتم C^{13} به علاوه یک پوزیترون و یک نوترینو تبدیل می‌شود. C^{13} دوباره با یک اتم هیدروژن ترکیب می‌شود و N^{14} و یک گاما حاصل می‌شود.

دوباره در اثر ترکیب این نیتروژن با یک هیدروژن معمولی اتم O^{15} و یک گاما تولید می‌شود و C^{12} واپاشی شده و N^{15} به علاوه یک پوزیترون و یک نوترینو را بوجود می‌آورد و نهایتاً ترکیب N^{15} با یک هیدروژن معمولی، C^{12} به علاوه یک اتم هلیوم بدست می‌آید.

واضح است که در این چرخه C^{12} نه مصرف می‌شود و نه بوجود می‌آید، بلکه فقط نقش کاتالیزور را دارد. این واکنش‌ها به ترتیب و پشت سرهم انجام می‌شوند و واکنش اصلی همان تبدیل چهار اتم هیدروژن به یک اتم هلیوم است. مزیت چرخه کربن این است که سرعت کار را بسیار بالا می‌برد و اشکالی که دارد این است که فرآیند در دمای حداقل $۲۰*۱۰^{۶}$ درجه سانتیگراد شروع می‌شود. بنابراین احتمال زیاد می‌رود که در ستاره‌های بزرگ چرخه کربن به شرح ذیل باعث تولید انرژی می‌شود.

$C^{12} + H^{1} \rightarrow N^{13} + \gamma$ (گاما)

$N^{13} \rightarrow C^{13} + e^{+}$ + نوترینو

$C^{13} + H^{1} \rightarrow N^{14} + \gamma$

$N^{14} + H^{1} \rightarrow O^{15} + \gamma$

$O^{15} \rightarrow N^{15} + e^{+}$ + نوترینو

$N^{15} + H^{1} \rightarrow C^{12} + He^{4}$

۸- نتیجه‌گیری

نظر کارشناسان بر آنست که با روند کنونی استفاده از سوخت‌های فسیلی، ذخائر نفت تا حدود ۱۰۰ سال و ذخائر گاز طبیعی تا حدود ۲۰۰ سال آینده در روی کره زمین به پایان می‌رسد.

با توجه به اینکه انرژی‌های تجدیدپذیر به دلیل محدودیت تولید، پاسخگوی مصرف انرژی در جهان امروز نخواهد بود، بنابراین استفاده از انرژی هسته‌ای در قرون آتی برای جامعه بشری اجتناب‌ناپذیر است.

ذخائر اورانیوم ۲۳۵ که سوخت اولیه نیروگاه‌های آب سبک می‌باشد نیز حدود ۷۰ سال دیگر بر روی کره زمین به پایان می‌رسد. بنابراین امید جامعه متمدن بشری برای حل مسئله انرژی به استفاده از اورانیوم ۲۳۸ که سوخت اولیه رآکتورهای نوترون سریع زاینده[1] است، می‌باشد. ذخائر اورانیوم ۲۳۸ در روی زمین برای ۲۰۰۰ سال آینده کافی است و بدین ترتیب مشکل انرژی در درازمدت حل خواهد شد.

رآکتور نوترون سریع زاینده در غرب در حال آزمایش[2] می‌باشد ولی در روسیه از سال‌ها پیش در منطقه اورال یک واحد ۶۰۰ مگاواتی آن در حال بهره‌برداری است. البته اینگونه رآکتورها به دلیل تولید پلوتونیوم[3] مناسب، کاربرد نظامی (تولید بمب هسته‌ای) نیز دارد.

مراجع

جایگاه انرژی اتمی در ایران و جهان – مهدی دوستکام ۱۳۸۸

- World Nuclear Association (W.N.A)
- International Atomic Energy Agency (IAEA)
- Uranium Institute (2002)

بیوگرافی

آقای مهدی دوستکام دارای لیسانس مهندسی مکانیک از دانشکده فنی دانشگاه تهران و فوق لیسانس برق از دانشگاه لندن و دکترای مکانیک از دانشگاه مسکو می‌باشد.

نامبرده حدود ۳۵ سال سابقه کار در طراحی صنایع نیروگاهی و نفت و گاز دارد (۲۰ سال سابقه کار در طراحی نیروگاه‌های بخاری، آبی، گازی و اتمی و ۱۵ سال سابقه کار در طراحی صنایع نفت و گاز).

از نامبرده مقالات زیادی به زبان‌های روسی و انگلیسی و فارسی در مجلات و کنفرانس‌های علمی معتبر به چاپ رسیده است.

Email:
Doostkam2000@yahoo.com

1- Fast Nutron
2- Pilot
3- Plutonium

سیستم راه‌انداز ژنراتور (SFC)

انوش مؤیدی کاشانی

کارشناس برق- SBU نیروگاه

چکیده

در این مقاله در خصوص سیستم راه‌انداز ژنراتور که نقش اصلی را جهت به حرکت درآوردن ژنراتورهای نیروگاه‌های گازی ایفا می‌کند بحث شده و ارتباط تجهیزات اصلی و عملکردهای مختلف ایجاد شده در روندکاری به همراه معرفی حالات مختلف مدهای[1] موجود و ساختار اساسی آن مورد چالش قرار می‌گیرد.

۱- مقدمه

برای تولید توان الکتریکی از طریق ژنراتور، وسیله‌ای مورد نیاز است که ژنراتور را در سرعت نامی آن به حرکت درآورد و از این طریق انرژی مکانیکی به انرژی الکتریکی تبدیل شود. این وسیله که به آن محرک و یا توربین گفته می‌شود دارای انواع مختلفی است که با توجه به نوع نیروگاه و ژنراتور دسته‌بندی می‌شوند. سه نوع توربین به صورت اساسی برای راه‌اندازی ژنراتورها وجود دارد: توربین آبی، بخار و گاز. البته توربین‌های دیگری نیز وجود دارد که با توجه به استفادهٔ محدود آنها در دنیا برای تولید انرژی الکتریکی، کمتر است و از آن جمله می‌توان به توربین‌های بادی اشاره کرد.

توربین‌های آبی و بخار برای راه‌اندازی ژنراتورهای آبی و بخار استفاده می‌شوند. در نیروگاه‌های آبی نیروی اولیه برای به حرکت درآوردن مجموعهٔ توربین و ژنراتور فشار آب جمع شده در پشت سدها است. با توجه به ساختار این نیروگاه‌ها نیروی آب سدها این توانایی را دارد که از سرعت اولیهٔ صفر و در حالی که سیستم در حالت سکون است، مجموعهٔ توربین و ژنراتور را به حرکت درآورد. سیستم کنترل دریچه‌های ورودی آب، میزان آب ورودی به پره‌های توربین را مشخص می‌کند و توربین می‌تواند از همان لحظهٔ سکون شروع به حرکت کند. در ژنراتورهای بخار این مهم با نیروی بخار انجام می‌گیرد و در حقیقت سیستم راه‌انداز در این سیستم نیروی بخار است، اما در نیروگاه‌های گازی که توربین و ژنراتور آن گازی است برای چرخاندن مجموعه احتیاج به محرکی، جدا از موارد ذکر شده دارد، لذا راه‌انداز ژنراتورهای گازی مفهوم پیدا می‌کند.

با توجه به ساختار خاص توربین گاز و این که در این توربین جهت ایجاد احتراق در محفظهٔ توربین نیاز به هوای فشرده می‌باشد که از طریق کمپرسور توربین تأمین می‌شود و برای نیروی محرکهٔ توربین نیاز به نیروی راه‌انداز اولیه است، در مراحل اولیهٔ استارت لزوم در نظر گرفتن سیستمی که برای استارت اولیهٔ مجموعه ضروری است.

۲- اساس سیستم راه‌انداز ژنراتور

سیستم راه‌انداز در توربو ژنراتورها برای تأمین هوای فشرده جهت احتراق در اتاق‌های توربین و غلبه بر نیروی گشتاور اولیهٔ مجموعه است.

این روزها دو نوع سیستم اصلی برای غلبه بر این گشتاور اولیه در نیروگاه‌های گازی طراحی و ساخته شده است که هر کدام دارای مزایا و معایبی است که استفاده از آن را توجیه می‌کند.

- سیستم راه‌انداز با استفاده از مجموعهٔ موتوری
- سیستم راه‌انداز با استفاده از روش تبدیل فرکانس و استفاده از ژنراتور به صورت موتور سنکرون[2]

1- Modes
2- Starting Frequency Converter(SFC)

سیستم راه‌انداز موتوری به صورت یک موتور الکتریکی سه فاز است که به صورت مکانیکی و با استفاده از کلاچ به روتور ژنراتور کوپل می‌شود و ژنراتور را از حالت سکون و یا Turning Gear [1] تا موقعی که توربین به تنهایی بتواند نیروی لازم برای چرخش کمپرسور و ایجاد هوای فشردهٔ خود را تأمین کند مجموعه را به حرکت در می‌آورد و بعد از آن کلاچ تعبیه شده، آن را از ژنراتور جدا می‌کند. شکل (۱) نمونه‌ای از یک راه‌انداز موتوری برای ژنراتور گازی را نشان می‌دهد.

سیستم راه‌انداز کانورتری یا تبدیل ژنراتور به موتور سنکرون و با تبدیل فرکانس متناسب با سرعت گردش موتور نیروی لازم برای راه‌اندازی مجموعه را فراهم می‌کند. در این سیستم با استفاده از پل‌های تایریستوری به صورت رکیتفایری و اینورتری و کنترل زاویهٔ آتش تایریستورها انرژی الکتریکی لازم در هر زمان برای راه‌اندازی مهیا می‌شود. در این سیستم ژنراتور سنکرون تبدیل به یک موتور سنکرون می‌شود و ژنراتور به صورت موتوری راه‌اندازی می‌شود.

در سیستم زیمنس راه‌انداز به صورت یک مجموعه یا سیستم تحریک و به صورت Compact است و تجهیزات کنترل راه‌انداز در داخل تابلوی کنترل تحریک قرار دارند. شکل (۲) نمونه‌ای از یک سیستم راه‌انداز کانورتری که با سیستم تحریک تشکیل یا مجموعهٔ Compact را می‌دهد نشان می‌دهد.

در ادامه و برای مشخص کردن مزایا و معایب هر کدام از این دو سیستم جدول مقایسه‌ای ارائه می‌شود تا ما را در انتخاب هر کدام از این دو سیستم کمک کند (جدول ۱).

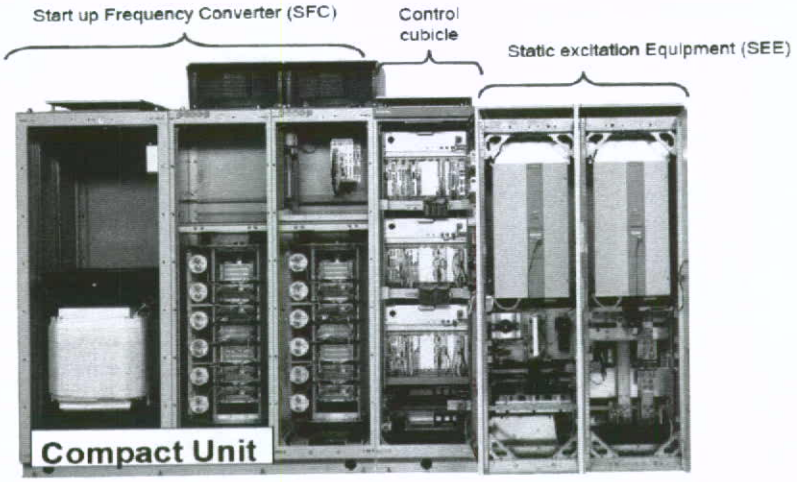
در جدول (۱) علامت "+" نشان‌دهندهٔ نقطهٔ قوت سیستم و علامت "-" نشان‌دهندهٔ نقاط ضعف سیستم است.

با مقایسهٔ موارد ذکر شده در این جدول به وضوح مشاهده می‌شود که سیستم راه‌انداز کانورتری کاملاً به‌صرفه می‌باشد و به همین دلیل هم در این مقاله فقط به بررسی این نوع از سیستم راه‌انداز می‌پردازیم.

در ادامه و برای فهم هر چه بیشتر مطلب ابتدا نگاهی گذرا به تجهیزات اصلی سیستم راه‌انداز داشته و سپس به بررسی اساس کار سیستم SFC و چگونگی عملکرد آن می‌پردازیم.

شکل (۱) : راه‌انداز موتوری توربین گاز

۱- چرخش مجموعه توربین و ژنراتور با سرعتی تقریباً معادل ۱۲۰ دور بر دقیقه برای جلوگیری از خم شدن شفت مجموعه در مواقعی که واحد در مدار نیست.



شکل (۲) : مجموعهٔ Compact سیستم راه‌انداز و تحریک

جدول (۱) : مقایسه بین دو نوع سیستم راه‌انداز موتوری و کانورتری

کیفیت استارتر		
	Motor Package	SFC
ضربه به توربین هنگام جدا شدن از مجموعه	=	=
زمان استارت	−	+
ضربه‌های الکتریکی (جریان) به سیستم‌های جانبی	−	+
پیچیدگی سیستم	=	=
امکان استفاده برای ژنراتورهای دیگر نیروگاه	−	+
قابلیت دسترسی ساده		
امکان تعمیرات در هنگام کار توربو ژنراتور	−	+
امکان افزونگی (Redundancy)	−	+
مدت زمان ما بین دو خطا	−	+
مدت زمان لازم برای تعمیر	−	+
احتیاجات ژنراتور		
احتیاج به سیستم تحریک	+	−
نفوذ فرکانس‌های بالا به سیستم‌های تغذیهٔ جانبی	+	−
احتیاج به طراحی خاص روتور ژنراتور	+	−
موارد مکانیکی		
تجهیزات مکانیکی در معرض سایش و پاره‌گی	−	+
تلفات در خلال عملکرد عادی توربین	−	+
مناسب بودن برای مجموعهٔ تک‌شفتی	−	+
سیستم روغن‌کاری	−	+
مهندسی سازه		
مخارج تهیهٔ فونداسیون	−	+
وزن	−	+
طول مجموعه	−	+
شروع ناگهانی در مد کندانسوری		
مخارج اضافی	−	+
امکان بازیافت انرژی	−	+

۳- تجهیزات اصلی سیستم راه‌انداز کانورتری زیمنس SFC

اساس کار سیستم راه‌انداز کانورتری بر پایهٔ استفاده از پل‌های یکسوساز است. سیستم راه‌انداز کانورتوری و یا به عبارتی SFC، به طور کلی از دو پل تایریستوری تشکیل شده که یک راکتور تک‌فاز با نام راکتور DC و به منظور فیلتر کردن خروجی پل رکتیفایری در بین آنها قرار دارد. برای تغذیهٔ این پل‌های رکتیفایری از یک ترانس سه فاز استفاده می‌شود. سیستم راه‌انداز همچنین دارای یک سیستم کنترل است که وظیفهٔ آن کنترل خروجی SFC برای حالت‌های مختلف است.

وظیفهٔ اصلی این سیستم کنترل تهیهٔ پالس‌های آتش مناسب برای تایریستورها است.

در سیستم‌های راه‌انداز و تحریک زیمنس که به اسم Compact System شناخته می‌شوند، از یک تابلوی کنترل برای هر دو سیستم استفاده می‌شود و در حقیقت ماژول‌های کنترلی سیستم راه‌انداز در داخل تابلوی کنترل تحریک قرار دارند.

شکل (۳) به صورت شماتیک سیستم SFC را نشان می‌دهد.

۳-۱- پل تایرستوری

پل تایریستوری سمت تغذیهٔ ورودی است که به اختصار به آن LSR (Line Side Rectifier) می‌گویند. این تجهیز همانطور که قبلاً هم اشاره شد یک پل تایریستوری است که به صورت یک رکتیفایر عمل کرده و ولتاژ AC ورودی را به ولتاژ DC تبدیل می‌کند.

این پل تایریستوری از ۶ عدد تایریستور تشکیل شده که بر روی یک سازهٔ فلزی سوار شده است. هر کدام از این تایریستورها دارای مدار حفاظت اضافه ولتاژ (Snubber) مخصوص خود است. کل این مجموعه در داخل یک تابلوی فلزی قرار دارد و بر روی تابلو یک عدد فن برای خنک‌کردن تایریستورها به هنگام کار تعبیه شده است.

پل تایریستوری سمت ژنراتور[1] نیز مشابه پل تایریستوری سمت تغذیه است، فقط با این تفاوت که مدار Sunbber آن دارای توان بیشتری است به این دلیل که در سمت ماشین تلفات توان در این مدار بیشتر است. این پل تایریستوری به عنوان یک اینورتر عمل می‌کند ولتاژ DC را به ولتاژ AC تبدیل می‌کند. این مجموعه هم مانند LSR در داخل یک تابلو قرار دارد و به وسیلهٔ یک عدد فن خنک می‌شود. شکل (۴) نمائی از این پل‌های تایریستوری را نشان می‌دهد.

در شکل (۴) تایریستورها، رادیاتور خنک‌کنندهٔ تایریستورها (Heastsink)، خازن‌های مدار حفاظت Snubber و مدارک الکترونیکی تبدیل پالس‌های آتش نوری به پالس‌های آتش الکتریکی که بر روی یک سازهٔ فلزی قرار گرفته‌اند مشاهده می‌شوند.

۳-۲- راکتور

راکتور تک‌فازی است که بین دو پل تایریستوری تعبیه شده و وظیفهٔ اصلی آن صاف و یکنواخت کردن ولتاژ DC خروجی از LSR است. این راکتور نقش فیلتر را در سیستم SFC بازی می‌کند و در داخل یک تابلوی فلزی در کنار بقیهٔ تابلوهای سیستم راه‌انداز قرار دارد. این راکتور به صورت طبیعی خنک می‌شود ولی بسته به توان استفاده شده در هنگام راه‌اندازی و تعداد راه‌اندازی‌های مکرر مورد نیاز ممکن است که برای خنک‌کاری آن استفاده از فن ضرورت داشته باشد.

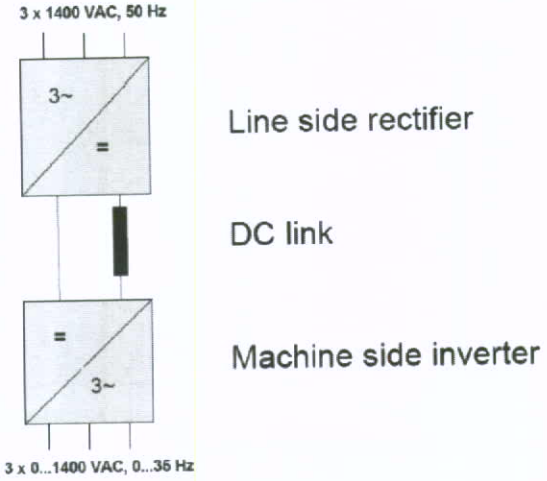
شکل (۵) نمائی کلی از راکتور DC استفاده شده در سیستم راه‌انداز زیمنس را نشان می‌دهد.

۳-۳- کنترل‌کنندهٔ SFC

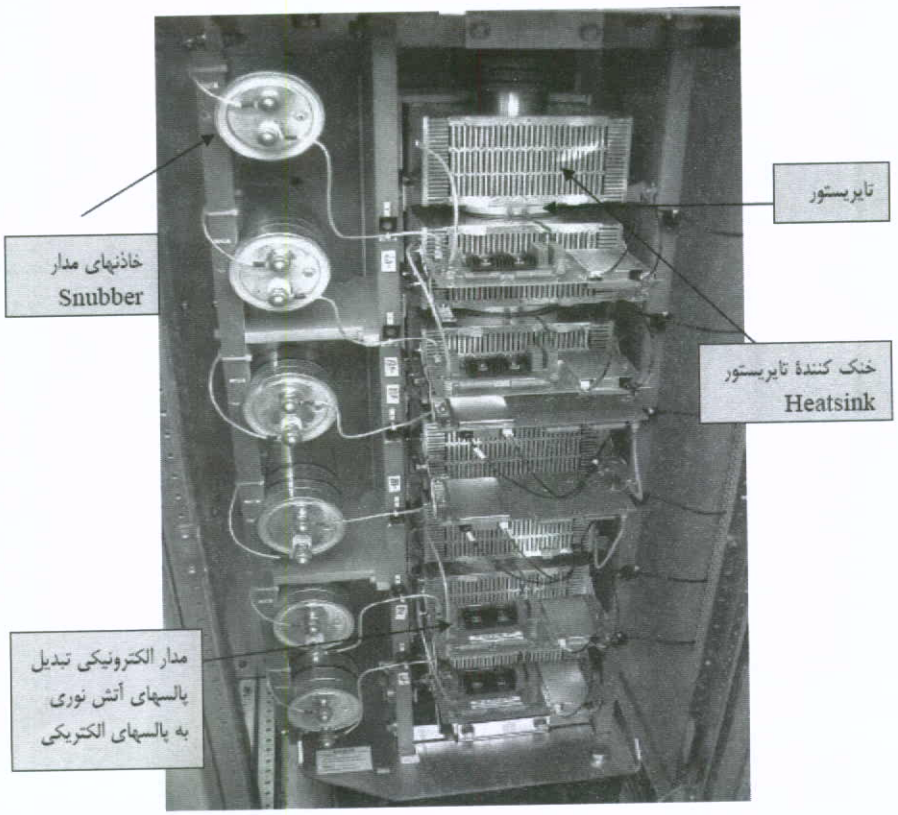
تجهیز دیگری که به آن پرداخته می‌شود و به نوعی مغز سیستم راه‌انداز محسوب می‌شود سیستم کنترل SFC است. کنترل کنندهٔ SFC نیز همانند کنترل‌کنندهٔ سیستم تحریک از نوع کنترلرهای SIMADYN زیمنس است. این کنترلر در داخل تابلوی کنترل تحریک و تحت عنوان A500 قرار دارد.

این کنترلر از یک Sub Rack 24 شیاره تشکیل شده که کارت‌های ورودی، خروجی، ارتباطی و میکروپروسسوری در داخل آن جا داده می‌شوند. این کنترلر شامل چهار کارت پروسسوری است که هر کدام کار خاصی را انجام می‌دهند.

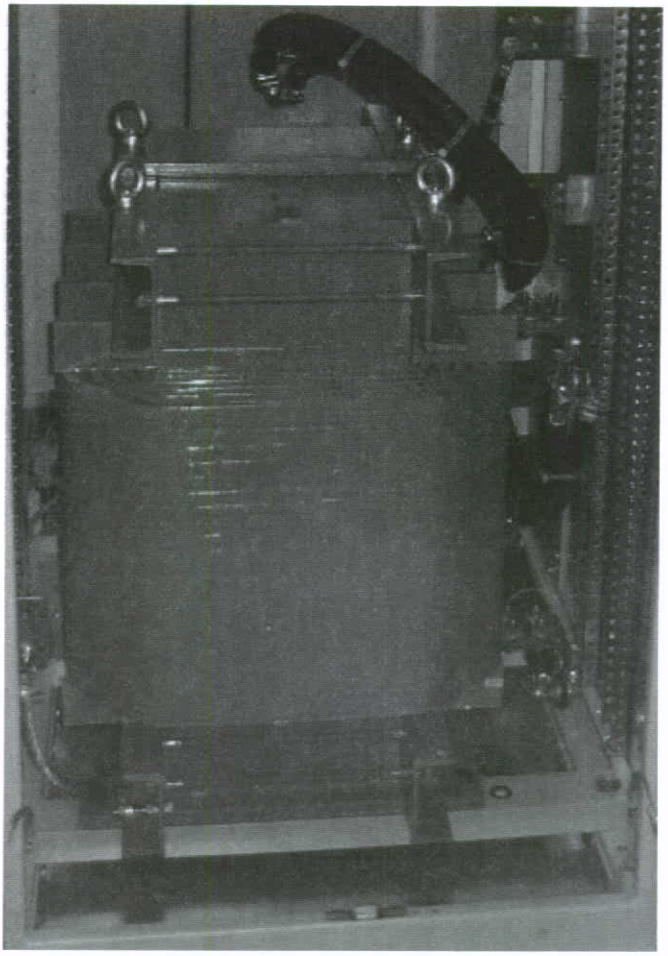
1- Machine Side Rectifier (MSR)



شکل (۳) : نمای شماتیک SFC و تجهیزات اصلی آن



شکل (۴) : پل‌های تایریستوری SFC و تجهیزات جانبی آن



شکل (۵) : راکتور DC سیستم راه‌انداز

۳-۴- ترانس SFC

ترانس SFC از دیگر تجهیزات اصلی سیستم راه‌انداز است که از نوع ترانس‌های خشک رزینی است و از آن به عنوان ترانس‌های کانورتری نام برده می‌شود و به دلیل تولید هارمونیک‌های ولتاژ و جریان توسط سیستم راه‌انداز در هنگام کار، باید این موارد نیز در هنگام ساخت ترانس رعایت شود.

به دلیل اینکه از سیستم SFC فقط در یک دورهٔ کوتاه زمانی و فقط برای راه‌اندازی سیستم استفاده می‌شود که زمانی حدود چهار دقیقه است، همچنین با توجه به این که ترانس‌های خشک قادر به تحمل توانایی بالاتر از توان نامی و برای مدت کوتاه هستند، توان ترانس SFC را پایین‌تر از توان نامی مورد نیاز برای راه‌اندازی سیستم در نظر می‌گیرند. به عنوان مثال توان مورد نیاز برای راه‌اندازی مجموعهٔ توربین (V94.2) و ژنراتور (TY10546) ۲/۹ مگاوات است و توان ترانس مورد نیاز ۳۷۰۰ کیلوولت آمپر، اما می‌توان از ترانس ۱۷۰۰ کیلو ولت آمپری برای حداکثر چهار بار استارت متوالی استفاده کرد.

در حقیقت با توجه به این نکته که ترانس‌های خشک معمولاً و برای یک مدت کوتاه قادر به تحمل اضافه بار تا حدود ۵۰٪ بیشتر نسبت به بار نامی می‌باشند و با در نظر گرفتن این واقعیت که سیستم راه‌انداز برای یک دورهٔ کوتاه (حدوداً ۱۸۰ ثانیه برای هر استارت) در مدار می‌باشد، می‌توان از ترانس‌های SFC با توان کمتر استفاده کرد.

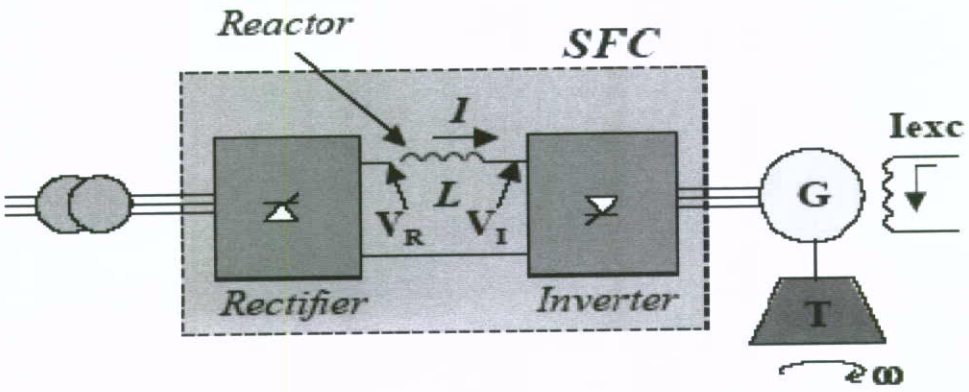
۴- اساس کار سیستم راه‌انداز SFC

همانطوری که قبلاً ذکر شد توربین گاز به تنهایی قادر به استارت مجموعه از حالت سکون اولیه نمی‌باشد و برای انجام این کار احتیاج به تجهیزات کمکی است. این تجهیز کمکی سیستم راه‌انداز است. این سیستم با تبدیل ژنراتور سنکرون به الکتروموتور سنکرون، مجموعهٔ توربین و ژنراتور به آرامی و از حالت سکون و با Turning Gear به حرکت در می‌آورد. مدت زمان این استارت بسیار کم و در حدود چهار دقیقه است یعنی SFC در این مدت سرعت مجموعه را به حدود ۲۱۰۰ دور در دقیقه می‌رساند و در این سرعت از سیستم جدا شده و بقیهٔ مراحل استارت را توربین به تنهایی انجام می‌دهد.

برای استارت ماشین، ژنراتور به صورت یک موتور سنکرون در می‌آید که از قوانین سادهٔ موتورهای القایی بهره برده و چرخش حاصل می‌شود. در هنگام استارت ژنراتور، روتور با استفاده از سیستم تحریک تغذیه شده و میدان مغناطیسی ثابت در سیم‌پیچ‌های روتور به وجود می‌آید و همزمان تغذیهٔ سیم پیچ‌های استاتور به وسیله سیستم راه‌انداز باعث به وجود آمدن میدان مغناطیسی دوار در سیم‌پیچ‌های استاتور می‌شود. زاویهٔ بین این دو میدان مغناطیسی، به زاویهٔ بار معروف است. سیستم کنترل با چک‌کردن این زاویه و تحریک تایریستورهایی که با توجه به این زاویه می‌توانند بیشترین گشتاور الکتریکی را ایجاد کنند و ارسال فرمان آتش به این تایریستورها مجموعه را به چرخش در می‌آورد. زیرا حداکثر گشتاور الکتریکی موقعی به دست می‌آید که زاویهٔ بار ۹۰ درجه باشد.

شکل (۶) به صورت ساده نشان‌دهندهٔ سیستم راه‌انداز و ارتباط آن با تحریک، ژنراتور و توربین می‌باشد.

کانورتر سمت خط، LSR، در سیستم SFC به وسیلهٔ ثانویهٔ ترانس راه‌انداز تغذیه شده، تحریک و شروع به هدایت می‌کند. اما کانورتر سمت ژنراتور براساس بار متصل به آن آتش می‌شود و با توجه به ولتاژ ترمینال‌های ژنراتور هدایت می‌کنند. این کانورتر جریان DC موجود در راکتور را از یک سیم‌پیچ استاتور به سیم‌پیچ دیگر سوئیچ می‌کند و به این طریق و با توجه به وجود میدان روتور باعث به وجود آمدن یک میدان گردان در ژنراتور می‌شود به گونه‌ای که روتور با میدان استاتور سنکرون می‌شود. جریان DC راکتور در این حالت بین فازهای مختلف و با استفاده از کلاک ولتاژ (Voltage Clocking) جابجا می‌شود. یعنی با استفاده از ولتاژ القا شده در استاتور، سیستم کنترل پی می‌برد که کدام جفت تایریستور باید آتش شوند و با توجه به این قضیه که در هر ۶۰ درجه الکتریکی فقط دو تایریستور مشخص آتش می‌شوند.



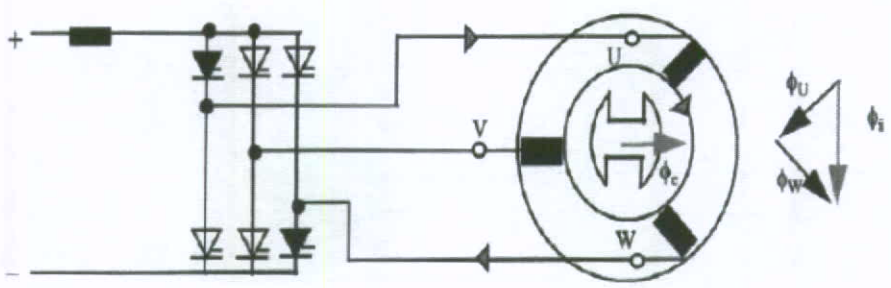
شکل (۶) : نمای شماتیک سیستم SFC

۴-۱- چگونگی تولید گشتاور

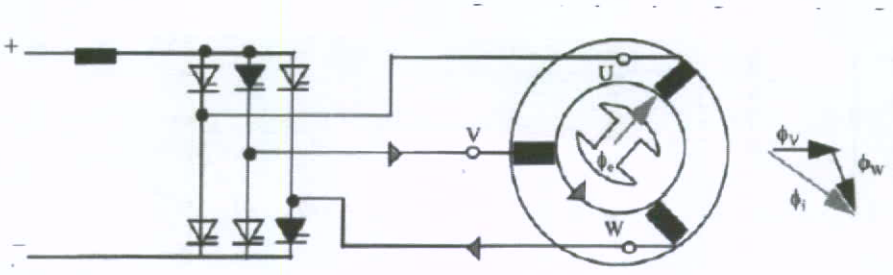
همانطور که قبلاً هم اشاره شد در ابتدای راه‌اندازی مجموعه توربین و ژنراتور، سیستم کنترل SFC باید حداکثر گشتاور را برای راه‌اندازی ایجاد کند زیرا گشتاور مقاوم مجموعه در حالت سکون بیشترین مقدار خود را دارد. برای ایجاد این گشتاور سیستم کنترل با چک‌کردن ولتاژ ترمینال‌های ماشین موقعیت مکانی روتور و استاتور را تشخیص می‌دهد و تایریستورهای مشخصی را آتش می‌کند.

به عنوان مثال اگر شکل (۷) را در نظر بگیریم با توجه به جهت میدان روتور که در این تصویر با φ_e نشان داده شده، موقعیت سیم‌پیچ‌های استاتور (U,V,W)، مشخص می‌شود که برای داشتن حداکثر گشتاور باید سیم‌پیچ‌های U و W استاتور تغذیه شوند. برای این منظور تایریستورها مربوطه که در این تصویر با رنگ سیاه مشخص شده‌اند، باید آتش شوند. در نتیجه در سیم‌پیچ U استاتور میدان φ_u و در سیم‌پیچ W استاتور میدان $\varnothing_w$ به وجود می‌آید.

برآیند این دو میدان φ_t خواهد بود که با توجه به زاویهٔ به وجود آمده بین این دو میدان یعنی φ_t و φ_e، سیستم راه‌انداز ماکزیمم گشتاور را به روتور اعمال می‌کند و باعث چرخیدن روتور به اندازهٔ ۶۰ درجه خواهد شد. با چرخش روتور به اندازهٔ ۶۰ درجه جهت میدان آن نیز تغییر می‌کند و ۶۰ درجه جابجا می‌شود. این جابجایی روتور باعث می‌شود تا کنترل SFC برای اعمال فرمان آتش به تایریستورهای مناسب برای به وجود آوردن گشتاور ماکزیمم دوبارهٔ زاویهٔ روتور را تشخیص دهد و با توجه به این زاویه، تایریستورها را آتش کند. در این حالت می‌توان شکل (۸) را در نظر گرفت. با توجه به این شکل این بار سیم‌پیچ‌های V و W تغذیه شده و میدان‌های در این دو سیم‌پیچ به وجود می‌آیند که برآیند آنها φ_t، با میدان الکتریکی روتور φ_e، حداکثر زاویه را ایجاد می‌کند و متعاقب آن گشتاور ماکزیمم ایجاد می‌کند.



شکل (۷) : یکی از مراحل استارت ژنراتور توسط SFC



شکل (۸) : مرحلهٔ بعدی از روند استارت ژنراتور

با اعمال این گشتاور روتور ژنراتور دوباره و به اندازهٔ ۶۰ درجه می‌چرخد و به موقعیت دیگری در داخل استاتور می‌رسد. این روند در طی مراحل اولیهٔ استارت ادامه پیدا می‌کند و به آرامی سرعت این چرخش زیاد می‌شود تا جائی که توربین به تنهایی قادر به ادامهٔ روند استارت می‌باشد. برای اینکه در هنگام راه‌اندازی هیچگونه لغزشی در روتور ایجاد نشود مراحل اولیهٔ استارت به آرامی انجام می‌گیرد تا روتور بتواند چرخش خود را با چرخش میدان مغناطیسی استاتور سنکرون کند.

۴-۲- چگونگی عملکرد سیستم کنترل

در مقایسه با یک موتور الکتریکی که مستقیماً به ولتاژ تغذیه وصل شده است، ژنراتور متصل به SFC نیز دارای همان خصوصیات است که به صورت جدا تحریک شده و ولتاژ تحریک آن برابر با ۲۵ تا ۳۰ درصد از ولتاژ نامی تحریک در هنگام کار ژنراتور در سرعت نامی تغذیه می‌شود. با این تفاسیر می‌توان نتیجه گرفت که کنترل حلقه بستهٔ کانورتر سمت خط به صورت یک کنترل‌کنندهٔ سرعت حلقه بسته و یک کنترل‌کنندهٔ جریان حلقه بسته، در مرحلهٔ بعد از آن، طراحی شده است که مدار کنترل و تولید پالس‌های آتش در ادامهٔ آن قرار دارد و پالس‌های مورد نیاز برای کانورتر را فراهم می‌کند که مشابه تکنیکی است که در موتورهای DC تغذیه شده توسط کانورتر استفاده می‌شود.

نکته‌ای که در اینجا باید به آن اشاره کرد، موضوع همزمانی بین زمان تولید پالس‌های آتش و تغذیهٔ رکتیفایر است. همانطوری که می‌دانیم ترانس SFC دارای یک سری مشخصات است که یکی از آنها زاویه‌ای است (الکتریکی) که بین سیم‌پیچ‌های اولیه و ثانویهٔ ترانس وجود دارد. وجود این زاویه باعث به وجود آمدن یک شیفت فازی بین ورودی و خروجی ترانس می‌شود. این شیفت زاویه‌ای برای سیستم رکتیفایر SFC باید صفر باشد به همین منظور کنترلر و تولید کنندهٔ پالس‌های رکتیفایر سمت خط LSR، با گرفتن ولتاژ ورودی به ترانس راه‌انداز با استفاده از یک ترانس ولتاژ (PT)، که بر روی باس تغذیهٔ ترانس راه‌انداز قرار دارد زاویهٔ آتش تایریستورها را تنظیم می‌کند تا این شیفت زاویه‌ای را جبران کند. از این سیگنال به ولتاژ سنکرون کردن نام برده می‌شود.

به عنوان مثال در ترانس راه‌انداز در پروژه‌ای این زاویه به صورت Dy 5 معرفی شده است که D نشان‌دهندهٔ نحوهٔ بستن سیم‌پیچ‌های اولیه است، یعنی به صورت دلتا (Δ) و y نشان‌دهندهٔ نحوهٔ بستن سیم‌پیچ‌های ثانویه است، یعنی به صورت ستاره (Y) و عدد 5 نشان‌دهندهٔ اختلاف زاویهٔ به وجود آمده بین اولیه و ثانویه است که در عدد ۳۰ ضرب می‌شود. یعنی بین این دو سیم‌پیچ ۱۵۰ درجه اختلاف زاویه وجود دارد و سیستم تولید زاویهٔ آتش باید این اختلاف زاویه را در نظر بگیرد. برای کنترل کانورتر سمت ژنراتور MSR، پالس‌های آتش تایریستورها با تأثیر از ولتاژ ترمینال‌های ژنراتور تهیه می‌شوند. با توجه به افت ولتاژ سیستم در هنگام کار راه‌انداز که به علت وجود بارهای اهمی و القائی مسیر است، جریان ماشین هم به عنوان ورودی کمکی در نظر گرفته می‌شود و یک ولتاژ سنکرون تقریباً سینوسی و مستقل از فرکانس ماشین به وسیلهٔ مدار جبران‌کننده ساخته می‌شود.

۴-۳- DC Link Pulsing

در هنگام استارت ژنراتور و در سرعت‌های پایین و در محدودهٔ صفر تا ۱۰٪ سرعت نامی ولتاژ ژنراتور به دلیل افت ولتاژ مقاومتی، برای کموتاسیون کانورتر سمت ژنراتور کافی نیست و به همین دلیل کموتاسیون (خاموش شدن اجباری) تایریستورها در کانورتر سمت ماشین که به وسیلهٔ ولتاژ ژنراتور انجام می‌گرفت، انجام نمی‌شود. به همین دلیل برای حل این مشکل از تابعی به نام DC Link Pulsing در سیستم کنترل استفاده می‌شود و خروجی آن به صورت ورودی برای مدار کنترلر جریان کانورتر سمت خط LSR استفاده می‌شود.

از DC Link Pulsing برای سوئیچ کردن جریان از یک شاخهٔ تایریستوری به شاخهٔ دیگر استفاده می‌شود به این صورت که با کنترل LSR به صورت یک اینورتر، جریان DC به آرامی به صفر کشانده می‌شود. در خلال این وقفه‌ای که به وجود می‌آید و جریان به صفر می‌رسد،

تایریستوری که قبلاً حامل جریان بود به حالت قطع می‌رود سپس متعاقباً شاخهٔ بعدی با کنترل مناسب LSR فعال شده و جریان DC در مسیر برقرار می‌شود فرکانس تکرار این مراحل ۶ برابر فرکانس ژنراتور است.

۵- چگونگی عملکرد SFC

در سیستم زیمنس اجزاء کنترلی سیستم راه‌انداز در داخل تابلوی کنترل سیستم تحریک قرار دارد به همین دلیل تمام سیگنال‌هایی که بین سیستم راه‌انداز و سیستم کنترل نیروگاه DCS، انتقال می‌یابند از طریق سیستم تحریک است. اما هنگام راه‌اندازی ژنراتور سیستم SEE توسط SFC کنترل می‌شود و SFC با توجه به سرعت ژنراتور نقاط کنترلی برای سیستم تحریک تعریف می‌کند. سیستم راه‌انداز فقط به صورت کنترل از راه دور[1] توسط DCS کنترل می‌شود شکل (۹) به صورت دیاگرام بلوکی ارتباط سیگنالی SFC با SEE و DCS را نشان می‌دهد.
ارتباط سیگنالی بین سیستم‌های تحریک و راه‌انداز با استفاده از پروتکل Profibuss و بین این دو سیستم و I&C با استفاده از سیم[2] است.

۵-۱- مدهای کاری سیستم راه‌انداز

با توجه به نوع نیروگاهی که SFC در آن نصب شده است، ممکن است از SFC علاوه بر راه‌اندازی عادی ژنراتور برای موارد دیگری هم استفاده شود. در ادامهٔ این گزارش مروری اجمالی به این مدهای کاری سیستم راه‌انداز خواهیم داشت.

با توجه به اینکه اکثر نیروگاه‌های گازی در آینده امکان تبدیل به نیروگاه سیکل ترکیبی را دارند می‌توان بر این اساس مدهای کاری SFC را به صورت زیر به دو دستهٔ اصلی تقسیم کرد.

• مدهای کاری استاندارد شامل:

- Normal Start Mode
- Purging Mode
- Washing Mode

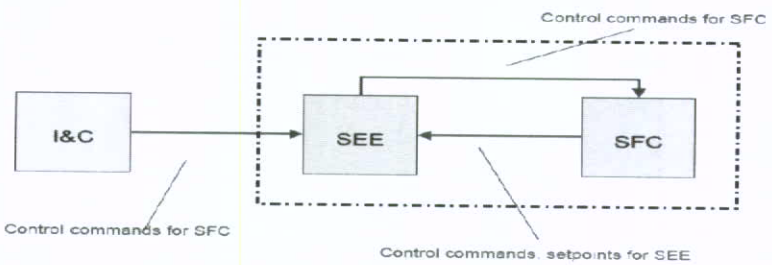
مدهای کاری اختیاری شامل:

- Black Start Mode
- Phase Shift Mode
- Breaking Mode

برای آشنا شدن بیشتر با این روش‌های کاری به ترتیب و به طور مختصر هر کدام توضیح داده می‌شوند.

۵-۱-۱- Normal Start Mode

مدکاری نرمال برای سیستم راه‌انداز به عنوان مد استاندارد شناخته می‌شود به گونه‌ای که در این مد SFC مجموعهٔ توربین و ژنراتور را از حالت سکون و یا Turning Gear به حرکت درآورده و تا سرعت مورد نظر می‌رساند و سپس از مدار خارج می‌شود.
سیستم راه‌انداز مجموعه را تا حدود سرعت ۲۱۰۰ دور در دقیقه که تقریباً معادل فرکانس ۳۵ هرتز است می‌رساند و بعد از آن از سیستم جدا می‌شود و بقیهٔ کار افزایش سرعت را توربین به تنهایی انجام می‌دهد. مشعل‌های توربین در این مد عملاً در فرکانس ۱۰ هرتز که معادل ۲۰ درصد سرعت نامی است روشن می‌شوند و SFC را در افزایش شتاب مجموعه یاری می‌دهد.



شکل (۹) : ارتباطات سیگنالی SFC

1- Remote
2- Wire

کل پروسهٔ استارت توربین در مدت تقریبی چهار دقیقه انجام می‌گیرد و در این مدت SFC باید توربین و ژنراتور را به سرعت مورد نظر برساند و این به دلیل این است که توربین دارای فرکانس‌های بحرانی است که در طی انجام پروسهٔ راه‌اندازی باید به سرعت از این نقاط گذر کند. شکل (۱۰) گشتاور توربین گاز و سیستم کمپرسور آن را هنگام استارت نسبت به محور فرکانس نشان می‌دهد. همانطور که از نمودار مشخص است مشعل‌های توربین در فرکانسی تقریبی ۱۰ هرتز روشن می‌شوند و به SFC در راه‌اندازی مجموعه کمک می‌کند.

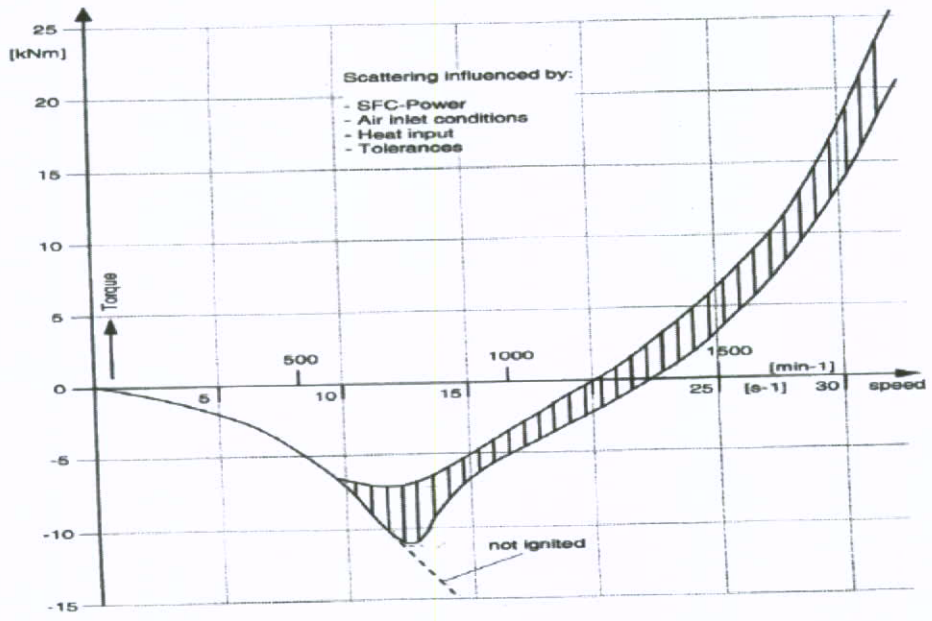
همچنین در فرکانس تقریبی ۲۳ هرتز مشاهده می‌شود که گشتاور توربین به حدی رسیده است که به تنهایی بتواند ژنراتور را راه‌اندازی کند اما با توجه به اینکه توربین باید نقاط بحرانی را سریع پشت سر بگذارد، همچنان به کمک SFC احتیاج دارد.

۵-۱-۲- Purging Mode

در نیروگاه‌های سیکل ترکیبی که شامل بویلر نیز هست اگر در طی مرحلهٔ استارت به هر دلیلی پروسهٔ استارت با موفقیت انجام نشود و سیستم متوقف شود، گازهای حاصل از احتراق در بویلر جمع می‌شوند. این گازها قبل از شروع استارت بعدی باید از مسیر خارج شوند به همین دلیل در این قبیل نیروگاه‌ها، سیستم SFC دارای یک مدکاری اضافه نسبت به استارت نرمال است.

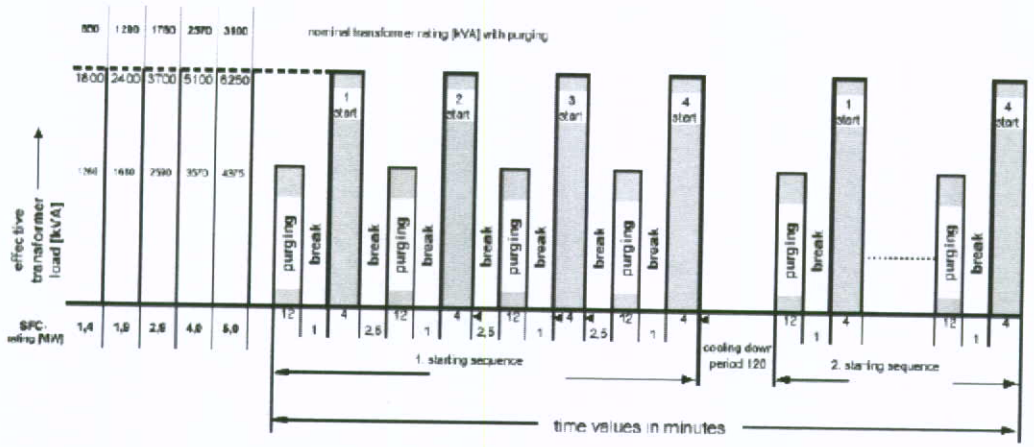
در این مد مشعل‌های توربین گاز روشن نمی‌شوند و توربین همانند یک فن عمل می‌کند و با دمیدن هوا در داخل بویلر گازهای اضافی را خارج می‌کند. برای این کار SFC سیستم را با فرکانس ۱۰ هرتز که معادل ۲۰ درصد سرعت نامی است برای مدت ۸ تا ۱۲ دقیقه می‌چرخاند و بعد از سپری‌شدن این مدت به صورت اتوماتیک از مدار خارج می‌شود.

در نمودار (۱۱) که به نمودار دورهٔ بار[1] سیستم راه‌انداز معروف است، مراحل استارت نرمال و Purge در مورد SFC طراحی شده برای یکی از پروژه‌های توربین گاز را نشان می‌دهد. این نمودار برای سیستم راه‌اندازی است که توانایی انجام چهار استارت پیاپی را دارد و بعد از چهار استارت باید به مدت دو ساعت خاموش باشد تا بتواند چهار استارت بعدی انجام بدهد. لازم به ذکر است که اگر زمان خنک‌کاری کمتر از دو ساعت باشد سیستم راه‌انداز تعداد استارت کمتر از چهار بار را می‌تواند انجام بدهد.



شکل (۱۰) : منحنی گشتاور توربین در هنگام استارت

1- Load Cycle



شکل (۱۱) : SFC Load Cycle

۵-۱-۳- Washing Mode

هر از چند گاهی و به علت جمع‌شدن مواد حاصل از سوختن بر روی پره‌های توربین لازم می‌شود که این پره‌ها تمیز و پاک شوند. برای این منظور از مد Washing سیستم راه‌انداز استفاده می‌شود، به این ترتیب که بدون روشن‌کردن مشعل‌های توربین، مجموعهٔ توربین و ژنراتور را توسط SFC تا سرعتی معادل ۲۰ درصد سرعت نامی یعنی تا حدود فرکانس ۱۰ هرتز می‌چرخانیم و در این سرعت حفظ شده و سپس مواد تمیزکننده مانند شوینده‌های قوی[1] که با آب مخلوط شده را وارد توربین می‌کنیم تا پره‌های توربین تمیز شوند. این پروسه تقریباً به مدت ۱/۵ دقیقه طول خواهد کشید و بعد از تمیز شدن پره‌ها برای خاموش کردن SFC باید فرمان لازم به سیستم کنترل آن ارسال شود.

۵-۱-۴- Black Start Mode

خاصیت Black Start که از مدهای استارت سیستم راه‌انداز است، در مواقعی استفاده می‌شود که شبکه دچار قطعی به قولی Black شده باشد. برای این منظور معمولاً در بعضی از نیروگاه‌ها و با توجه به بعضی شرایط خاص امکان Black Start را برای سیستم راه‌انداز در نظر می‌گیرند. برای این منظور از یک ژنراتور دیزل که قادر به تأمین توان مورد نیاز SFC باشد در نیروگاه استفاده می‌کنند که در موقع لزوم تأمین کنندهٔ تغذیهٔ SFC باشد.

در هنگام انتخاب مد Black Start در سیستم راه‌انداز، SFC با توجه به توانی که دیزل ژنراتور می‌تواند بدهد از توان پایین‌تری نسبت به توان نامی شروع به انجام پروسهٔ استارت ژنراتور می‌کند.

معمولاً ژنراتور دیزل باید قادر باشد که حدود ۷۰ درصد از توان نامی سیستم راه‌انداز را برای مدکاری Black Start تأمین کند. در این مد توربین در ۲۰ درصد سرعت نامی ژنراتور استارت می‌شود پروسهٔ استارت ژنراتور در این مد مدت زمان بیشتری طول می‌کشد.

۵-۱-۵- Phase Shift Mode

در بعضی از مواقع و برای اصلاح ضریب قدرت[2] شبکه، از ژنراتور به عنوان یک خازن و با یک سلف استفاده می‌کنیم. برای این منظور ژنراتور را از توربین و شبکه جدا می‌کنیم و سپس با استفاده از سیستم راه‌انداز،ژنراتور را تا فرکانس ۵۲.۵ هرتز یعنی سرعتی معادل ۱۰۵ درصد سرعت نامی می‌چرخانیم بعد از آن SFC را از ژنراتور جدا می‌کنیم و همزمان سیستم تحریک را در حالت عملکرد نرمال روشن می‌کنیم هنگامی که سرعت به حد نامی پایین آمد ژنراتور را با شبکه سنکرون می‌کنیم.

1- Detergent
2- Power Factor

۵-۱-۶- Breaking Mode

بعد از استفاده از مدکاری Phase Shift به دلیل این که توربین به ژنراتور وصل نیست زمان لازم برای کاهش سرعت ژنراتور بسیار زیاد می‌شود. برای کاهش این زمان از یکی دیگر از خواص استارت توسط ژنراتور SFC استفاده می‌کنیم که به آن Breaking Mode می‌گویند. برای این منظور بعد از جدا کردن ژنراتور از شبکه، ولتاژ ژنراتور تا حد ولتاژ استارت SFC پایین می‌آید سپس SFC دوباره به ژنراتور وصل می‌شود و سرعت آنرا تا حد سرعت از قبل تنظیم شده پایین می‌آورد. در خلال این عملیات انرژی تولید شده، به شبکه تزریق می‌شود.

۶- مختصری در مورد ترانس SFC

ترانس تغذیهٔ سیستم راه‌انداز از نوع ترانس‌های خشک رزینی است که خاص سیستم‌های رکتیفایری ساخته می‌شود یعنی مسائل مربوط به هارمونیک‌ها را در طراحی آن در نظر می‌گیرند. این ترانس از اجزاء ساده‌ای تشکیل شده که در این بخش هر کدام را به اختصار توضیح می‌دهیم. این ترانس براساس استاندارد IEC 60726 طراحی و ساخته می‌شود.

۶-۱- هستهٔ سه قسمتی

هسته‌ای مغناطیسی است که از سه ستون تشکیل شده است. جنس این هسته از ورقه‌های مغناطیسی استیل است که با تکنولوژی Step- Lap و به صورت لایه لایه و با زاویهٔ ۴۵ درجه روی هم قرار می‌گیرند.

۶-۲- سیم‌پیچ‌های سمت ولتاژ بالا

برای سیم‌پیچ‌های سمت ولتاژ بالا از ورقه‌های آلومینیومی استفاده می‌کنند که در بین آنها از ورقه‌های عایق پلی‌پروپیلن استفاده می‌شود. به دلیل این که در سمت ولتاژ بالا، جریان کمتر است سیم‌پیچ‌های یا فویل‌ها این سمت را به صورت حلقه‌حلقه با سطح مقطع کم اما با تعداد دور بالا می‌سازند. سپس رطوبت این سیم‌پیچ‌ها را می‌گیرند و بعد آن را در داخل محفظهٔ خلاء قرار داده و رزین تزریق می‌کنند و سپس آن را در داخل کورهٔ پخت تا مدت زمان مشخص با دمای تقریبی ۱۲۰ درجه قرار می‌دهند.

۶-۳- سیم‌پیچ‌های سمت ولتاژ پایین

سیم‌پیچ‌های سمت ولتاژ پایین را از فویل‌های آلومینیومی یکپارچه که یک لایه عایق نیز بین آنها قرار دارد می‌سازند. این سیم‌پیچ‌ها برخلاف سمت ولتاژ بالا و به دلیل این که در این سمت جریان بالا است به صورت یکپارچه، یعنی با سطح مقطع بالا و تعداد دور پایین می‌سازند. سپس این سیم‌پیچ‌ها را در داخل کوره، به مدت مشخص و تا دمای معینی قرار می‌دهند.

ترانس‌های خشک دارای اجزاء دیگری نیز هستند که از درجهٔ اهمیت کمتری نسبت به مواردی که ذکر شد برخوردارند که عبارتند از:

- سیلندر یا استوانهٔ عایقی
- ترمینال‌های ولتاژ بالا و ولتاژ پایین
- چارچوب نگهدارنده و شاسی حمل‌کنندهٔ آن و قسمت‌های ارتجاعی و ضربه‌گیر.

در شکل (۱۲) تقریباً تمام اجزاء ترانس SFC مشاهده می‌شود.

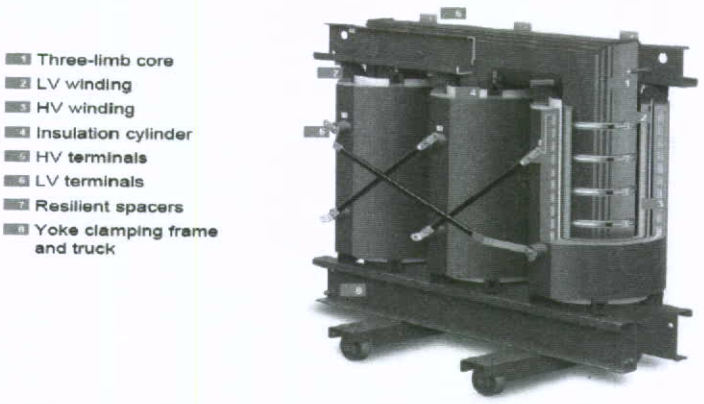
برای مشخص شدن توانائی و کیفیت ترانس‌های خشک یک سری تست‌های استاندارد را باید روی این ترانس‌ها انجام دهیم. این تست‌ها به طور کلی به سه دستهٔ اصلی تقسیم می‌شوند. وارد شدن به جزئیات این تست‌ها از حوصلهٔ این گزارش خارج است بنابراین فقط این تست‌ها را به صورت لیست معرفی می‌کنیم:

- **تست‌های روتین**
  - اندازه‌گیری مقاومت سیم پیچ‌ها
  - اندازه‌گیری نسبت ترانس و چک‌کردن گروه‌برداری آن
  - اندازه‌گیری درصد ولتاژ مقاومت (Impedance Voltage)
  - اندازه‌گیری تلفات بی‌باری و جریان بی‌باری
  - اندازه‌گیری تلفات زیر بار
  - تست عایقی با ولتاژ واقعی
  - تست عایقی با ولتاژ پایین آمده.
- **تست‌های نوع (Type Test)**
  - تست ضربه (Impulse Test)
  - تست بالا بردن دما
  - اندازه‌گیری مقدار Partial Discharge

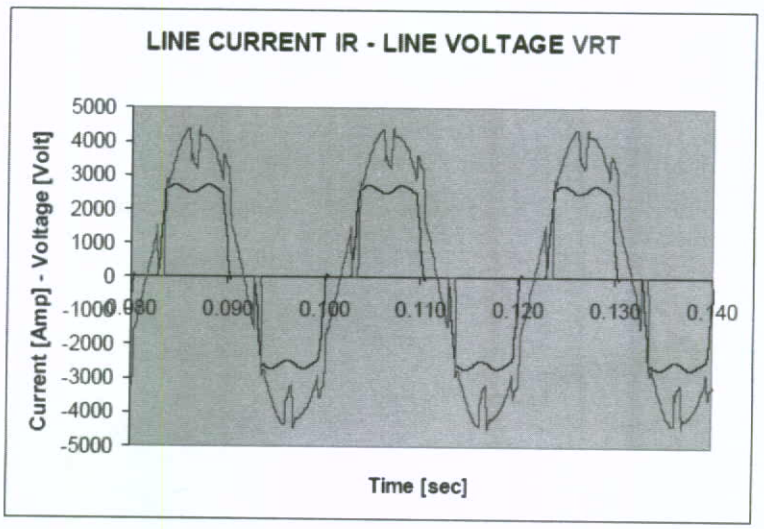
• **تست‌های خاص(Special Test)**

- اندازه‌گیری سطح نویز صدائی
- تست مقاومت در برابر اتصال کوتاه

از موارد مهمی که در طراحی ترانس‌های SFC باید در نظر گرفت، اثرات وجود هارمونیک‌های جریان ولتاژ تولید شده رکتیفایر بر روی توان ترانس، ابعاد و سایر مشخصات ترانس‌های خشک است. برای درک بیشتر این موضوع ابتدا خلاصه‌ای از علت به وجود آمدن هارمونیک‌ها ارائه می‌گردد:
اصولاً به عنوان یک اصل کلی، بارهای غیر خطی باعث به وجود آمدن هارمونیک می‌شوند. در سیستم‌های رکتیفایری به وجود آمدن هارمونیک به علت عملکرد سوئیچینگ تایریستورها که به عنوان بارهای کاملاً غیر خطی محسوب می‌شوند با شدت بیشتری انجام می‌شود.
همانطوری که می‌دانیم در سیستم راه‌انداز برای تبدیل ورودی ac به خروجی ac متغیر، باید با آتش‌کردن تایریستورها این کار انجام شود اما در نهایت خروجی حاصله به صورت یک موج کاملاً سینوسی نیست و در شکل موج حاصله اثرات سوئیچینگ تایریستورها به صورت هارمونیک‌های جریان و ولتاژ نمایان می‌شود.
در نمودار شکل (۱۳) اثرات هارمونیکی را بر روی شکل موج‌های ولتاژ و جریان مشاهده می‌کنید.



شکل (۱۲) : نمای برش داده شده از ترانس SFC و اجزاء آن



شکل (۱۳) : اثرات هارمونیک بر شکل موج‌های ولتاژ و جریان

تجهیزات الکتریکی به هارمونیک‌ها حساس هستند و باید تا حد امکان توان این هارمونیک‌ها کم باشد. برای این منظور فاکتوری را برای این قبیل سیستم‌ها در نظر می‌گیرند که به THD معروف است. این فاکتور باید تا حد امکان کوچک باشد. برای محاسبهٔ این فاکتور برای جریان و ولتاژ از فرمول‌های زیر استفاده می‌کنیم.

$$THD_U=\frac{\sqrt{\sum_{v=2}^{40}U_v^2}}{U_1} \quad و \quad THD_i=\frac{\sqrt{\sum_{v=2}^{40}I_v^2}}{I_1}$$

لازم به ذکر است که هارمونیک‌های شمارهٔ ۲، ۳ و ضرایب ۳ ولتاژ و جریان در این فرمول‌ها در نظر گرفته نمی‌شود. در این فرمول‌ها U ولتاژ I جریان و U_1 و I_1 ولتاژ و جریان در فرکانس ۵۰ هرتز می‌باشد. مقدار این هامورنیک‌ها در سیستم راه‌انداز بستگی به توان SFC، امپدانس شبکهٔ متصله، سرعت ماشین و مجموعهٔ بارهای دیگر و کانورترهای دیگر دارد.

برای طراحی و ساخت ترانس SFC و با توجه به هارمونیک‌های تولید شده باید ترانس Unit که تغذیه‌کننده ترانس SFC است نیز با توجه به توان هارمونیک‌ها سایز شود. برای این منظور نسبت توان اتصال کوتاه ترانس یونیت به توان سیستم راه‌انداز باید حداقل برابر ۱۰ باشد که هر چه این نسبت بزرگتر باشد اثرات هارمونیک‌ها بر سیستم‌های اطراف کمتر می‌شود. به عنوان مثال در پروژهٔ چهار واحدی ارومیه این مقدار به صورت زیر محاسبه می‌شود.

برای ترانس یونیت داریم:

$$S(unit)=8MVA, U_K=80\% \Rightarrow S_K=\frac{S}{U_K}=\frac{8MVA}{8\%}$$

$$\Rightarrow S_K=100MVA$$

این مقدار به عنوان ظرفیت اتصال کوتاه ترانس یونیت شناخته می‌شود. در نتیجه داریم:

$$\frac{S_K}{S_{SFC}}=\frac{100MVA}{3.7MVA}=27$$

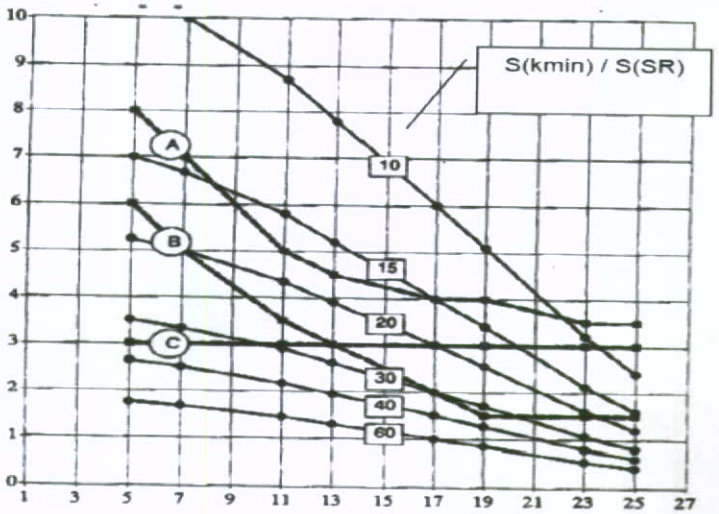
این مقدار به عنوان، نسبت بتوان اتصال کوتاه ترانس یونیت به توان سیستم راه‌انداز شناخته می‌شود و برای مشخص کردن اثرات هارمونیک سیستم راه‌انداز بر سیستم‌های مجاور استفاده می‌شود.

نمودار شکل (۱۴) مقادیر مختلف این نسبت را برای محیط‌های مختلف کاری سیستم راه‌انداز نشان می‌دهد. در این نمودارها، A، سیستم راه‌انداز اختصاصی در محیط‌های صنعتی براساس استاندارد IEC، B، در شبکه‌های عمومی و براساس استاندارد IEC و C، براساس استاندارد IEEE است.

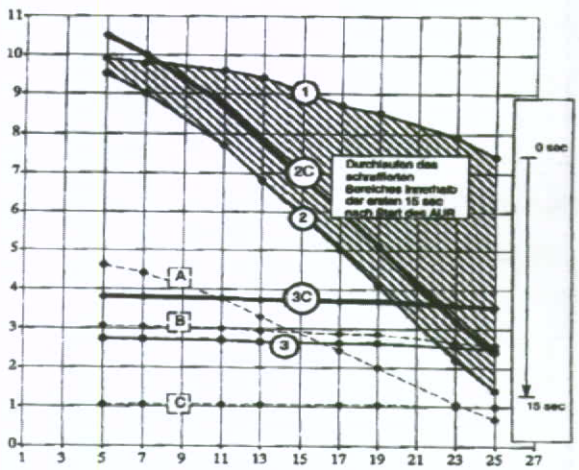
همچنین محور عمودی نشان دهندهٔ درصد هارمونیک‌ها و محور افقی نشان‌دهندهٔ درصد هارمونیک‌ها و محور افقی نشان دهندهٔ هارمونیک‌ها است.

برای محاسبهٔ مقدار THD در یک سیستم باید ابتدا داده‌های ورودی که بر مقدار هارمونیک‌ها تأثیر می‌گذارند مشخص شوند و سپس با استفاده از برنامه‌های نمونه‌سازی و شبیه‌سازی این مقدار را محاسبه کرد اما معمولاً در نهایت عددی که به دست می‌آید نهائی نیست و باید با روش سعی و خطا مقدار بهینه را به دست آورد. در یک نیروگاه برای محاسبه مقدار THD باید مواردی را از قبیل، طرح کلی (Lay Out) پست و تغذیه‌های کمکی، امپدانس ترانس‌ها و شبکه، ترکیب باس ولتاژ متوسط و توان سیستم راه‌انداز مشخص باشند. در شکل (۱۵) نمودار هارمونیک‌های سیستم راه‌انداز و تحریک به عنوان نمونه نشان داده شده‌اند. در این مثال فرض شده است که نسبت توان اتصال کوتاه ترانس یونیت به توان راه‌انداز برابر مقدار حداقل قابل قبول یعنی ۱۰ است و امپدانس درصد ترانس SFC برابر ۱۰ است و امپدانس شبکه کاملاً سلفی است.

در شکل (۱۵) محور افقی نشان‌دهندهٔ شمارهٔ هارمونیک‌ها و محور عمودی نشان‌دهندهٔ درصد هارمونیک‌ها است. همچنین نمودار شمارهٔ (۱) نشان‌دهندهٔ هارمونیک SFC در هنگام استارت و نمودار شمارهٔ (۲) بعد از ۱۵ ثانیه است. نمودار A، نشان‌دهندهٔ هارمونیک‌های تولید شده توسط SEE در ماکزیمم خروجی آن (Ceiling) است، نمودار B، در عملکرد نرمال و C، به هنگام عملکرد SFC در هنگام راه‌اندازی ژنراتور است.



شکل (۱۴) : نمودار هارمونیک‌ها براساس توان ترانس یونیتو توان SFC



شکل (۱۵) : نمودار هارمونیک‌های SFC و SEE

مراجع

۱- جزوهٔ آموزشی سیستم تحریک و راه‌انداز زیمنس

۲- سیستم‌های تحریک و راه‌اندازی ماژول ۲، آقای زیمونایت

بیوگرافی

آقای انوش مؤیدی کاشانی دارای مدرک لیسانس برق (گرایش قدرت) بوده و دارای ۱۰ سال سابقه کار در زمینه تست و راه‌اندازی و نصب در بخش‌های تأسیسات برقی و نیروگاهی می‌باشد و از سال ۱۳۸۴ فعالیت خود را در قدس‌نیرو آغاز نموده‌اند.

زمینه کاری مورد علاقه ایشان ترانس‌ها و ژنراتور در بخش نیروگاهی می‌باشد.

Email:
amoaidykashani@ghods-niroo.com

انرژی سبز

حسین قاسمی

کارشناس ارشد برق- SBU نیروگاه

۱- مقدمه

امروزه انرژی های تجدید پذیر یکی از منابع تولید انرژی می باشند. منابعی نظیر انرژی‌های باد، زمین گرمایی، خورشید، امواج و ... را منابع انرژی تجدیدپذیر و برق تولیدی ناشی از این منابع را برق سبز می‌نامند.

علت اصلی این نامگذاری نیز به آلاینده نبودن این منابع انرژی بر می‌گردد. تجدیدپذیر بودن این منابع در مقایسه با سوخت‌های فسیلی در کنار آلاینده نبودن آنها باعث مقبولیت و توجه بیشتر بسیاری از کشورهای جهان به توسعه برق سبز شده است. در ایران نیز مطالعات نشان می‌دهد که هزینه‌های زیست‌محیطی برق تولید شده، از منابع فسیلی برای سال ۱۳۷۹ ، را معادل ۱۸۸ ریال برای هر کیلووات ساعت برآورد کرده‌اند.

البته این رقم به طور دقیق مورد تأیید همه کارشناسان نبوده و برخی اعتقاد دارند تنها باید هزینه‌های جلوگیری از آلودگی در واحدهای با سوخت فسیلی را به عنوان هزینه زیست‌محیطی تولید برق، لحاظ کرد.

با توجه به محدودیت سوخت‌های فسیلی و این موضوع که کشورهای توسعه یافته و برخوردار از امکانات فنی پیشرفته برای کنترل آلاینده‌های نیروگاهی نیز سیاست توسعه منابع تجدیدپذیر را در پیش گرفته‌اند لذا ایجاد شرایط مناسب برای توسعه برق سبز، مثبت ارزیابی شده و تلاش گردیده تا روشی پیشنهاد شود که بدون خدشه واردکردن به سیستم موجود و فارغ از اولویت تخصیص منابع محدود مالی صنعت برق، امکان بیشتری برای توسعه برق سبز فراهم شود.

پروژه‌های تولید برق از انرژی‌های تجدیدپذیر در کشورهای صنعتی پس از بحران‌های نفتی، در جهت کاهش وابستگی آن کشورها به منابع انرژی فسیلی، مورد استقبال قرار گرفت.

به دنبال طرح مسائل زیست‌محیطی و توسعه پایدار و قدرت گرفتن گروه‌های طرفدار حفظ محیط‌زیست همچنین مطرح شدن طرح‌های امنیت انرژی، این پروژه‌ها رشد روزافزونی یافتند، به گونه‌ای که در برخی کشورهای در حال توسعه (و محروم از انرژی‌های فسیلی نظیر هند و آفریقای جنوبی و تعدادی کشورهای در حال توسعه دیگر) نیز طرح‌های انرژی تجدیدپذیر با اهداف دیگری از جمله توسعه روستایی و کمک به مناطق محروم، مورد توجه قرار گرفت.

در اوایل توسعه تولید برق از انرژی‌های تجدیدپذیر که هنوز مکانیزم بازار بر خدمات برق حاکم نشده بود و تولید برق به وسیله بنگاه‌های عمومی انجام می‌شد، مکانیزم تخصیص منابع برای احداث ظرفیت‌های تولید از منابع تجدیدپذیر تقریبا" به طور کلی مکانیزم تخصیص بودجه از سوی دولت‌ها بود. به دنبال خصوصی‌سازی در بازارهای برق لزوم خودگردانی طرح‌های فوق، سیاستگذاران را به فکر معرفی تعرفه‌هایی تحت نام تعرفه سبز انداخت. طبق این تعرفه‌ها مشترکان در صورت اطمینان از اینکه انرژی مورد مصرفشان از منابع تجدیدپذیر است یا اینکه اضافه پرداخت‌های آنها برای ایجاد ظرفیت جدید در منابع تجدیدپذیر صرف می‌شود و یا پرداخت‌های آنها در صندوقی برای کمک به طرح‌های انرژی تجدیدپذیر انباشته می‌شود، مبالغی را به خرده‌فروشان برق به عنوان تعرفه سبز، پرداخت می‌کنند.

۲- توسعه برق سبز و مشکل تأمین مالی

تجربه نشان می‌دهد سیاستگذاران معمولاً بین انتخاب یکی از دو سناریوی توسعه تأمین برق از طریق منابع تجدیدپذیر، یا فسیلی، دومی را به اولی ترجیح می‌دهند. جدای از این که مطالعات دقیق اقتصادی کدام یک از این دو را پیشنهاد می‌کند، عواملی که در ادامه به آنها خواهیم پرداخت در این زمینه تأثیر زیادی دارند:

۲-۱- پنهان بودن برخی از هزینه‌ها

در این زمینه به طور مشخص و به طور مثال هزینه‌های زیست محیطی ناشی از سوخت‌های فسیلی، هزینه‌ای پنهان بوده که در بسیاری از کشورها به طور مستقیم و در کوتاه مدت بابت این امر، پولی پرداخت نمی‌شود.

۲-۲- هزینه‌های فرصت

در بسیاری از کشورها به دلیل اعمال یارانه‌های پنهان به سوخت‌های فسیلی، قیمت تمام شده برق فسیلی بسیار پایین‌تر از رقم‌های واقعی محاسبه می‌شود و این امر به دنبال عدم ثبت هزینه‌های فرصت در دفاتر، مقادیر پولی که لازم است توسط بنگاه پرداخت شود را پایین‌تر جلوه می‌دهد.

۲-۳- آیا تولید انرژی‌های تجدیدپذیر واقعاً گران است؟

تأییدکنندگان این سوال به ویژه در ایران که دارای ذخایر نفت و گاز است استدلال می‌کنند تا زمانی که این منابع در اختیار باشد، سرمایه‌گذاری برای تولید برق سبز مقرون به صرفه نخواهد بود. البته این گروه کلیت ویژگی‌های مثبت برق سبز را رد نمی‌کنند بلکه تنها زمان مناسب برای سرمایه‌گذاری در این زمینه را زود می‌دانند. اما مخالفان این گروه، استدلال خود را بر محورهایی که در بالا نیز به آنها اشاره شد استوار کرده‌اند:

محور اول به هزینه‌های فرصت صادرات/ عدم واردات سوخت‌های فسیلی بر می‌گردد که در شرایط فعلی اختلاف قیمت‌های سوخت داخل و خارج تقریباً ۱۵۰ ریال برای هر کیلووات ساعت است.

محور دوم نیز به هزینه‌های پنهان آلودگی زیست‌محیطی ناشی از سوخت‌های فسیلی بر می‌گردد. این رقم در ایران نزدیک به ۱۸۸ ریال برای هر کیلوات ساعت تخمین زده شده است. بنابراین گروه فوق استدلال می‌کنند باید به هزینه‌های واقعی تولید برق در ایران، مجموع هزینه‌های فوق (یعنی ۳۰۸ ریال) را نیز اضافه و سپس در مورد گران بودن برق سبز قضاوت کرد. البته از آنجا که برق سبز ناشی از منابع انرژی تجدید پذیر مختلف، قیمت متفاوتی دارد، نمی‌توان به طور مطلق در این مورد اظهار نظر کرد. اما در این جا هدف از ارائه مسائل فوق، طرح دیدگاه‌های مختلف در مورد سرمایه‌گذاری یا عدم سرمایه‌گذاری در شرایط فعلی برای توسعه تولید برق سبز است.

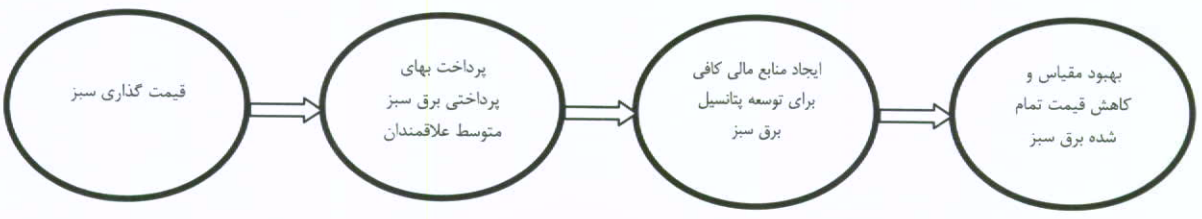
محور سومی که می‌توان به آن اشاره کرد بحث بازدهی به مقیاس است. ادعا می‌شود علت ارزان‌تر بودن تولید برق با سوخت‌های فسیلی نسبت به برق سبز، استفاده از بازدهی فزاینده به مقیاس در تولید برق حرارتی است. این در حالی است که نیروگاه‌های تجدیدپذیر از مقیاس کوچکی برخوردار هستند. به همین دلیل قیمت تمام شده بالاتری به آنها تحمیل می‌شود. حال اگر این واحدها امکان توسعه داشته باشند، می‌توان از محاسن بازده به مقیاس برای این واحدها نیز بهره گرفت.

از مطالب فوق نتیجه می‌شود که مخالفتی با توسعه برق سبز وجود ندارد اما در تخصیص اعتبار و اولویت بین این دو (توسعه برق سبز یا برق با سوخت‌های فسیلی) اختلاف نظر وجود دارد. در این حالت تجربه کشورهای توسعه یافته، تعرفه سبز را پیشنهاد می‌کند.

۳- قیمت‌گذاری سبز

در صورتی که در قیمت‌گذاری برق گزینه‌ای اختیاری برای علاقه مندان توسعه پتانسیل تولید انرژی‌های تجدیدپذیر تدارک دیده شود تا این گروه از مشترکان با پرداخت هزینه‌های واقعی انرژی‌های تجدیدپذیر بخشی از هزینه‌های توسعه این منابع را پوشش دهند، با قیمت‌گذاری سبز، مواجه خواهیم شد. هدف اصلی از طرح این مسأله این گونه بیان شده که با پرداخت بهای واقعی این انرژی‌ها و جلب علاقه‌مندان، منابع مالی کافی ایجاد شده و این منابع به توسعه ظرفیت انرژی‌های تجدیدپذیر منتهی می‌شود. در این صورت متناسب با اهمیت آلودگی نزد مشترکان از این طرح استقبال شده و درجه استقبال از تعرفه سبز به نوعی بیانگر درک هزینه‌های آلودگی سوخت‌های فسیلی از طرف مشترکان خواهد بود.

لذا با توسعه مقیاس، قیمت تمام شده برق سبز کاهش خواهد یافت گرچه این فرایند به توسعه ظرفیت برق سبز منتهی می‌شود اما عده‌ای از کارشناسان با تدوین اختیاری این تعرفه مخالفت کرده‌اند. در توجیه این مخالفت به این موضوع اشاره شده که چون تمام مشترکان از منافع ناشی از برق سبز بهره‌مند خواهند شد پس هزینه‌های توسعه برق سبز باید از طرف همه آنها پرداخته شود (شکل ۱).



شکل (۱) : فرایند اثر قیمت‌گذاری سبز بر توسعه تولید برق سبز

در پاسخ به این استدلال بحث تمایل به پرداخت مصرف‌کنندگان مطرح و بیان شده است. از آنجایی که بخشی از منافع ناشی از توسعه برق سبز، کاهش آلاینده و حفظ محیط زیست و ... است لذا برخی مشترکان تمایل به پرداخت بالاتری داشته و اختیاری بودن این تعرفه با این اصل تئوری اقتصادی، مطابقت دارد.

البته گرچه نظرسنجی‌های انجام شده توسط برخی از شرکت‌های برق ایالات متحده حاکی از آن است که بسیاری از پاسخ‌دهندگان علاقه‌مندی خود را برای پرداخت بخشی از هزینه‌های برق سبز اعلام کرده‌اند اما ثابت شده که بیشتر مشترکان علاقه‌مندند هزینه‌های توسعه برق سبز از طرف تمام مشترکان پرداخته شود نه از طرف یک گروه خاص، البته برخی از مشترکان که مورد نظرسنجی قرار گرفته و برای مشارکت در هزینه‌های برق سبز ابراز علاقه کرده بودند به نوعی با شک و تردید به انگیزه بنگاه‌ها نگاه کرده‌اند.

حال بد نیست به شیوه‌های اجرای برنامه قیمت‌گذاری سبز در کشورهای توسعه یافته اشاره شود. این برنامه‌ها به طور کلی در دو محور دنبال شده‌اند:

۱- افزایش درصدی عوارض، مالیات و ...، قیمت‌های برق و پرداخت اجباری آن از طریق تمام مشترکان

۲- ایجاد یک تعرفه خاص برق سبز که مشترکان بتوانند به طور اختیاری آن را انتخاب و بر اساس آن هزینه برق خود را پرداخت کنند.

اما در کنار موارد فوق گروهی نیز اعتقاد دارند تدارک یک زمینه مناسب برای انتخاب مشترکان در یک فضای خرده فروشی کاملاً رقابتی، بهترین گزینه برای بازار برق سبز است، زیرا بازارهای برق جدید، ورود انواع انرژی‌های تجدیدپذیر را تشویق کرده و در این بازار برخی عرضه‌کنندگان (فعالان) می‌توانند برچسب برق سبز را برای خود انتخاب کنند که به این ترتیب مشترکان در انتخاب عرضه کننده برق سبز، خود مختار خواهند بود.

بر اساس همین دیدگاه نیز در ایالات متحده با برق سبز رفتار می‌شود.البته عده‌ای نیز فارغ از این گزینه‌ها و اختیار مشترکان، اعتقاد دارند منافع ناشی از انرژی‌های تجدیدپذیر به گونه‌ای قابل ملاحظه است که کماکان باید مورد حمایت جدی برای توسعه قرار گیرند.

۳-۱- بررسی تأثیر اجرای برنامه قیمت‌گذاری سبز بر توسعه برق سبز در آمریکا

در حال حاضر ۲۹ ایالت از ایالات متحده آمریکا برنامه‌های قیمت‌گذاری سبز را اجرا می‌کنند. این برنامه به توسعه بیش از ۱۱۰ مگاوات از ظرفیت برق سبز در کنار ۱۷۲ مگاواتی که قبلاً ایجاد شده بود منتهی شده است. در این میان سهم انرژی باد بیشترین مقدار را دارد (جدول ۱).

جدول (۱)

واحد: کیلووات

منبع	اضافه شده	درصد	برنامه‌ریزی شده	درصد
باد	۷۷۶۷۵	۷۰/۵	۱۴۱۵۵۰	۸۲/۵
خورشید	۳۹۶۵	۳/۶	۲۳۳۸	۱/۴
زیست توده	۲۱۴۹۰	۱۹/۵	۲۵۶۶۰	۱۵
آبی کوچک	۷۰۰۰	۶/۴	۱۹۵۳	۱/۱
مجموع	**۱۱۰۱۳۰**	**۱۰۰**	**۱۷۱۵۰۱**	**۱۰۰**

۳-۲- روش‌های قیمت‌گذاری سبز

تجربه کشورهای توسعه یافته نشان می‌دهد تاکنون سه روش برای اجرای برنامه قیمت‌گذاری سبز مطرح شده است. این روش‌ها عبارتند از:

۱- برنامه‌های مشارکت

۲- برنامه‌های مبتنی بر ظرفیت

۳- برنامه‌های مبتنی بر انرژی

بر این اساس در ایالات متحده حدود ۷۶٪ از شرکت‌ها برنامه‌های مبتنی بر انرژی، ۲۰٪ برنامه مبتنی بر مشارکت و ۴٪ نیز برنامه مبتنی بر ظرفیت را ارائه کرده‌اند. در اینجا خلاصه‌ای از روش‌های فوق ارائه شده است:

۳-۲-۱- برنامه‌های مشارکت

در این برنامه با اجرای سیستم‌های تشویق و ترغیب، سعی می‌شود بخشی از هزینه‌های توسعه انرژی‌های تجدیدپذیر از طریق مشترکان، پرداخت شود. توسعه منابع تولید انرژی فتوولتاییک (انرژی خورشیدی) نمونه‌ای از این برنامه است که البته به طور غیر مستقیم در بسیاری از کشورها (از جمله در ایران با اجرای برنامه آب گرمکن‌های خورشیدی) یکی از برنامه‌های دنبال شده جدی در این زمینه نصب منابع تولید انرژی فتوولتاییک در کنار مدارس برای تأمین برق آنهاست. لازم به ذکر است برنامه‌های آموزشی متناسب با این موضوع نیز در مدارس، تدارک دیده شده که منافع خاصی نیز به دنبال داشته است. البته بخشی از هزینه‌های مشارکت از طریق کمک‌های اهدایی مشارکت از طریق کمک‌های اهدایی، مالیات‌ها یا ایجاد مؤسسات غیر انتفاعی (برای تبلیغ و جمع‌آوری کمک‌ها) حاصل شده است. گرچه برنامه‌های مشارکت، تنها سهم اندکی از هزینه‌های توسعه انرژی‌های تجدیدپذیر را فراهم کرده اما به هر حال در توسعه صنعت فتولتاییک نقش اساسی داشته است.

۳-۲-۲- برنامه‌های مبتنی بر ظرفیت

در قالب این برنامه، شرکت‌ها بر اساس قدرت (توان) مصرفی مشترک (با اختیار مشترک) بخشی از هزینه‌های توسعه برق سبز را از وی دریافت می‌کنند. در آمریکا این هزینه‌ها از ۶ تا ۶/۵۹ دلار برای هر ۱۰۰ وات ظرفیت در نظر گرفته شده است. البته در آغاز این برنامه به ازای هر کیلووات، سه دلار در نظر گرفته شده بود. بر اساس این برنامه بین هزینه‌های توسعه هر واحد ظرفیت برق سبز و هزینه اخذ شده از مشترک، یک ارتباط منطقی وجود دارد. مثلاً هزینه یک واحد ظرفیت برق سبز مدنظر قرار می‌گیرد.

۳-۲-۳- برنامه‌های مبتنی بر انرژی

در این برنامه، مشترکان علاقه‌مند می‌توانند بخشی از انرژی برق مصرفی خود (به طور مشخص در بلوک‌های ۱۰۰ تایی) را در قالب برق سبز لحاظ کنند. به عنوان مثال یک مشترک می‌تواند ۱۰۰ کیلووات ساعت از ۲۰۰ کیلووات ساعت برق مصرفی خود را به عنوان برق سبز در نظر گرفته و هزینه‌های تأمین برق سبز معادل آن را پرداخت کند.

البته در این گزینه، مشترک هیچ اجباری برای لحاظ‌نمودن تمام برق مصرفی خود در قالب برق سبز ندارد. همچنین بر اساس برنامه ارائه شده توسط شرکت‌های عرضه برق آمریکا هر مشترک مختار است از یک تا ۱۷/۶ سنت برای هر کیلووات ساعت بیشتر از هزینه معمول برق، بپردازد که این مبلغ به طور متوسط در برنامه اجرا شده ۲/۵ سنت برای هر کیلووات ساعت بوده است. بررسی‌های انجام شده نشان داده بر اساس برنامه مبتنی بر انرژی در بین تمام مناطق برق سبز، انرژی باد بیشترین سهم را به خود اختصاص داده زیرا از یک طرف اجرای این برنامه و توسعه برق بادی برای شرکت‌ها، مقرون‌به صرفه‌تر بوده و از طرف دیگر برق بادی در نظرسنجی انجام شده از مشترکان از محبوبیت بالاتری (شاید به لحاظ جذابیت‌های گردشگری آن) برخوردار بوده است.

برنامه‌های فوق معمولا شرکت‌ها را به سمت عرضه یک نوع انرژی تجدیدپذیر سوق داده است در حالی که برخی شرکت‌ها برنامه‌ای برای ارائه ترکیبی از انرژی‌های تجدیدپذیر اجرا کرده‌اند. در این حالت از آنجا که تعرفه‌های ارائه شده برای برق سبز اختیاری خواهد بود می‌توان نظر نهاد قانونگذار (مجلس) را نیز برای درج این تعرفه جلب کرد. از آنجا که این تعرفه اختیاری است نه تنها بر مشترکان آسیب‌پذیر فشاری وارد نمی‌آورد، بلکه آنانی که تمایل به پرداخت بالاتری (برای اجرای برنامه‌های کاهش آلاینده‌های زیست‌محیطی یا جلوگیری از افزایش آن) دارند، می‌توانند با انتخاب تعرفه سبز به تأمین مالی مورد نیاز برای این برنامه‌ها کمک کنند. برای آغاز راه می‌توان این برنامه را با همکاری شرکت‌های برق منطقه‌ای در کلان شهرها و با اعلام آمادگی مشترکان علاقه‌مند آغاز کرد. این امر هیچ مشکلی در تعرفه‌های معمول ایجاد نکرده و در صورتی که هیچ مشترکی هم استقبال نکند، تعرفه‌های معمول به روال خود اجرا خواهند شد. همچنین از آنجائیکه هر مشترک می‌تواند علاوه بر هزینه‌های فعلی خود مبلغی در قالب تعرفه سبز پرداخت کند، نظام یارانه متقاطع فعلی مشکلی در این امر ایجاد نخواهد کرد.

۴- استقبال مشتریان

در سطح جهانی نرخ نفوذ بازار در مورد تعرفه‌های سبز به طور کلی در حدود یک درصد است. استثنای قابل توجه در هلند است که حدود ۱۳ درصد از مشترکان خانگی، خریدار تولیدات برق سبز هستند.

موفقیت نسبی در بازار هلند را سه عامل می‌تواند توضیح دهد:

۱- معافیت مالیاتی برق سبز فروخته شده.

۲- فعالیت‌های بسیار شدید بازاریابی به وسیله بازاریابی و شرکت‌های خدمات برق.

۳- سیاست تجدید ساختار که به عرضه‌کنندگان برق سبز اجازه می‌دهد در شرایطی کاملا" رقابتی برق خود را به صورت خرده‌فروشی عرضه کنند. فروش برق سبز از مالیات فدرال که در حال حاضر در حدود ۵/۵ سنت یورو در هر کیلووات ساعت برای مشترکان کوچک محاسبه می‌شود، معاف است. این اعتبار، بازاریابان را قادر می‌کند برق سبز بسیار ارزانی را ارائه می‌دهند. (جدول ۲)

به علاوه شرکت‌ها و بازاریابان هلندی کارزار تبلیغاتی وسیعی را به راه انداخته‌اند که شامل آگهی‌های بسیار گرانقیمت تلویزیونی هم می‌شود. با درنظر گرفتن خرید برق غیرخانگی، سوئد با ۹ میلیون مگاوات ساعت از همه جلوتر است، موفقیت در این بازار به دلیل دسترسی به مقادیر وسیعی از برق آبی موجود است که با قیمت‌های نسبتا" پائین قابل فروش است. در گذشته برق سبز ارائه شده برای برآوردن "نیازهای انرژی" مشترکان طبق برنامه‌هایی که اصطلاحا" «تولیدات انرژی پایه» نامیده شده‌اند، فراهم می‌شد. برنامه دیگر "برنامه سهیم شدن" نام دارد که از طریق آن مشترکان کمک‌هایی را به صندوقی که برای حمایت از توسعه منابع جدید تجدیدپذیر ایجاد شده، انجام می‌دهند. برنامه‌های تسهیم، کمتر عمومیت دارند اما در کشورهای انگلستان، ژاپن و تا حدودی استرالیا ارائه می‌شود. معمولا" بازاریابان برق سبز، دامنه‌ای از تولیدات را برای جذب مشترکان که حساسیت‌های قیمتی و ترجیحات مختلفی در نوع منابع دارند ارائه کرده‌اند.

جدول (۲) : مقایسه استقبال مشتریان از برق سبز

نام کشور	تعداد بازاریابان/ شرکت‌ها (تخمین) #	تعداد مشترکین برق سبز (۱)	درصد از مشترکین خانگی (۲)	تخمین فروش برق سبز (میلیون کیووات ساعت در سال)	درصد از کل برق فروخته شده (۳)	تخمینی از ظرفیت جدیدپذیر توسعه‌یافته جدید (۴)
آمریکای شمالی						
ایالات متحده	>۱۰۰	۳،۷۵۰،۰۰۰	٪۱۲	۲،۰۰۰	۰،۱۰٪	۶۵۰MW
کانادا	>۱۰	۶،۵۰۰	۰،۵٪	<۱۵۰	۰،۰۳٪	>۷۰MW
اروپا						
فنلاند	>۳۰	۸،۰۰۰	۰،۴۰٪	۱۵۶	۰،۲۰٪	N/a
آلمان	>۱۰۰	۳۲۵،۰۰۰	۱٪	۹۰۰	۰،۲۰٪	۱۰MW
ایرلند	>۱۰	۱۲،۰۰۰	۱٪	N/a	N/a	N/a
هلند	>۱۵	۷۷۵،۰۰۰	۱۳٪	۲،۵۰۰	۳٪	N/a
سوئد	>۵۰	N/a	N/a	۹،۰۰۰	۶٪	N/a
سوئیس	>۱۰۰	۴۶،۰۰۰	۲٪	۱۵۰۳	۰،۳۰٪	N/a
انگلستان	>۱۰	۴۵،۰۰۰	۰،۲۰٪	۱۵۰۳	۰،۰۴٪	۱۰MW۴
سایر مناطق						
استرالیا	>۱۵	۶۸،۰۰۰	۱٪	۴۶۰	۰،۳۰٪	۲۰۰MW
ژاپن	>۱۰	۳۸،۰۰۰	۰،۱۰٪	۲۵	۰،۰۰٪	۱۲MW
کل	**>۴۵۰**	**~۱،۷۰۰،۰۰۰**	--	**~۱۸،۰۰۰**	--	**>۹۵۰MW**

۱- تخمین تعداد مشترکین بر مبنای ادعای عرضه‌کنندگان و اطلاعات تهیه شده از اسناد برنامه‌ها انجام شده است.
۲- نسبت برمبنای تعداد مشترکینی که امکان دسترسی به برق سبز را دارند محاسبه شده است.
۳- تنها شامل بیوماس بادی و خورشیدی است.
۴- تنها شامل ظرفیت نصب شده برای مشترکین خانگی است.

۵- قیمت‌گذاری

اکثر تولیدات برق سبز با اضافه قیمت‌های متعادلی در حدود ۰/۵ تا ۱/۵ سنت بر کیلووات ساعت ارائه می‌شوند. در برخی موارد مثلا" در آلمان، فنلاند و هلند برق سبز در قیمت‌های زیر قیمت خدمات استاندارد عرضه می‌شود. از طرف دیگر تعدادی از تولیدات، نظیر آنهایی که از منابع جدید خورشیدی یا بادی تهیه می‌شوند در دامنه نسبتا" بالاتری از اضافه قیمت‌ها یعنی بین ۲ تا ۶ سنت بر کیلووات ساعت و بیشتر ارائه می‌شوند. این تولیدات گرانقیمت تنها مورد توجه مشترکانی قرار گرفته که دارای توجهات شدید زیست‌محیطی هستند و مایلند تولیداتی را بخرند که سبب منفعت‌های زیست‌محیطی بالا می‌شود. در کل، بازاریابان شواهد متضادی از تأثیر قیمت بر تقاضا ارائه می‌کنند. در هلند که اضافه قیمت بسیار پائین بوده تقاضای مشترکان چنان رشد یافته که از عرضه در دسترس منابع تجدیدپذیر هم بالاتر رفته است. همین طور در آلمان بیشتر ۳۲۵ هزار مشترکی که برق سبز می‌خرند در قیمت‌های بسیار نزدیک یا حتی کمتر از قیمت‌های استاندارد، آنرا خریداری می‌نمایند. در سوئد، برق سبز در حدود ۶ درصد کل فروش برق را تشکیل می‌دهد، عمده این تقاضا از طرف مشترکان صنعتی و تجاری است که تولیدات را از پروژه‌های برق آبی موجود با اضافه قیمت‌های بسیار پائین یا حتی بدون اضافه قیمت می‌خرند.

از طرف دیگر، در بازار فنلاند شواهدی ارائه می‌شود که قیمت، تنها عامل مؤثر در تصمیم برای خرید برق نیست. تعدادی از تولیدات برق سبز در فنلاند با قیمتی کمتر از هزینه برق مرسوم ارائه می‌شود، تاکنون واکنش مشتریان بسیار جزئی بوده و کمتر از یک درصد مشترکان، برق سبز را انتخاب کرده‌اند.

برطبق یک مطالعه در بازار فنلاند، تقاضای پائین را می‌توان با عواملی نظیر بازاریابی نارسا و کمبود

اطلاع‌رسانی به مشتریان در مورد گزینه‌های برق پاکیزه‌تر و قیمت و گزینه‌های آنها توضیح داد.
همچنین مقایسه‌ای بین هلند و انگلستان نشان می‌دهد که سطوح مساوی اضافه قیمت‌ها در هر دو کشور واکنش‌های کاملاً مختلفی (بسته به چگونگی فعالیت بازاریاب‌ها) داشته است. در نهایت سوئیس و انگلستان تعداد مشابهی مشترک برق سبز دارند اما اضافه قیمت تولیدات برق خورشیدی در سوئیس به طور قابل توجهی بالاتر بوده است.

۶- ساختار بازار

بازاریابی برق سبز در مناطق و کشورهایی متمرکز بوده که رقابت در خرده‌فروشی استقرار داشته یا در مرحله انجام بوده است. ژاپن و سوئیس استثناهایی هستند که برنامه‌های قاطعی برای تجدید ساختار بازار برق در آنها نبوده است.

۶-۱- برنامه‌های ضمانت

در بیشتر کشورها برنامه‌های ضمانت برای اطمینان مشترکان به این که برق سبز خریداری شده آیا واقعاً از منابع با ترجیحات زیست‌محیطی تأمین می‌شود و نیز این که آیا سهم عرضه برق سبز به مشترکان در همان مقدار تعهد شده قرار دارد، ارائه می‌شود.
در اکثر بازارها، استانداردهایی برای برنامه‌های ضمانت تهیه شده است. برای مثال در استرالیا عرضه‌کنندگان، ملزم به فراهم کردن ۸۰ درصد برق سبز که از منابع جدید تجدیدپذیری که باید برای آن گواهی هم ارائه کنند، هستند. حق تحقیق هم تابع مهمی در بسیاری از برنامه‌های ضمانت است.
ساختار سازمان‌های ضمانت‌دهنده از کشوری به کشور دیگر فرق می‌کند. در انگلستان، کانادا و استرالیا سازمان‌های دولتی و در سوئیس، سوئد، آلمان و فنلاند، سازمان‌های غیردولتی این کار را انجام می‌دهند.

۶-۲- تأثیر سیاست‌های انرژی تجدیدپذیر بر بازار برق سبز

سیاست‌های انرژی تجدیدپذیر به طور مستقیم و غیرمستقیم بر بازار برق سبز تأثیر دارند. این سیاست‌ها شامل موارد ذیل است:

- معافیت مالیاتی (یارانه‌ها): این سیاست، هزینه‌های تولید برق سبز را کاهش می‌دهد و در برخی موارد سطوح قیمت را تا زیر قیمت‌های استاندارد برق، کم می‌کند.
- الزام خرید: تعدادی از کشورها عرضه‌کنندگان خرده‌فروش برق را ملزم به خرید برق تجدیدپذیر کرده‌اند.
- تعرفه‌های تضمین برای تجدیدپذیرها: آلمان و اسپانیا و اخیراً فرانسه بر حمایت‌های مستقیم و از تولید توسط منابع تجدیدپذیر به جای ساز و کار تشویش در بخش خرده‌فروشی بازار تأکید داشته‌اند. برای مثال تولیدکنندگان برق تجدیدپذیر در آلمان مبالغ ثابت تضمین شده‌ای را بابت هر کیلووات ساعت که به شبکه عرضه کنند، دریافت می‌کنند.
هزینه این پرداخت‌ها به طور یکنواخت بین همه مصرف‌کنندگان برق، توزیع می‌شود.
دولت آلمان در سال ۲۰۰۰ تعرفه‌های تضمینی خود را خصوصاً" برای برق خورشیدی (PV) افزایش داد، به طوری که اکنون این تعرفه به حدود ۴۸ سنت یورو رسیده در حالی که تولیدکنندگان برق بادی در حدود ۹ سنت یورو در هر کیلووات ساعت می‌گیرند.
با وجود الزام خرید، مشترکان ممکن است در صورتی که فکر کنند حمایت‌های ملی از قبل در مورد منابع تجدیدپذیر وجود دارد، علاقه‌ای به خرید برق سبز نداشته باشند. از دید بازاریابان هم عنوان می‌شود که با وجود حمایت‌های ناشی از تعرفه تضمینی که راجع به عرضه برق سبز اعمال می‌شود، قانع کردن افراد برای پرداخت یک مبلغ اضافه، دشوار است.
- برنامه‌های تجارت تضمینی سبز: تعدادی از کشورها برنامه‌های تجارت تضمینی سبز را اغلب به شکل اجرای الزامات خرید برق تجدیدپذیر توسعه داده یا در حال توسعه آن هستند. استرالیا و هلند سیستم‌های جاافتاده‌ای دارند و دانمارک، نروژ، سوئد و انگلستان برنامه‌هایی برای توسعه سیستم‌ها درنظر گرفته‌اند. همچنین سیستم ضمانت انرژی تجدیدپذیر در سطح اروپا (RECS) که درصدد یکپارچه کردن سیستم‌های منفرد است به طوری که تجارت بین ناحیه‌ای امکان‌پذیر شود، در حال شکل‌گیری است.

۶-۳- عوامل مؤثر در جلب مشترکان

در یک تحقیق میدانی که اخیراً در کانادا انجام شده و طی آن به طور جامع متغیرهای مؤثر بر "تمایل ابراز شده برای پرداخت" به برق سبز مورد سنجش قرار گرفته و فرضیه‌هایی مورد آزمون قرار گرفته‌اند.
طبق یافته‌های این تحقیق که نتایج آن در جدول (۳) ارائه شده، عمده‌ترین متغیر مؤثر بر تمایل مشترکان به خرید برق سبز، توجهات زیست‌محیطی آنهاست. به دنبال آن متغیرهای دیگری شامل آزادسازی، نوع‌دوستی، آموزش، نگاه مشترکان به اثربخش بودن تصمیماتشان، سن، درآمد، مشارکت، ارتباطات، دانش، جنسیت و عوامل دیگر به ترتیب بر تمایل ابراز شده مشترکان برای پرداخت بابت برق سبز، مؤثر بوده‌اند.

جدول (۳) : نتایج محاسبه همبستگی اسپیرمن بین "تمایل ابراز شده برای پرداخت" و متغیرهای نظیری مختلف

فرضیه	متغیر	نوع فرضیه	همبستگی اسپیرمن
H9	ملاحظات زیست‌محیطی	ایستاری	۰،۲۴۶
H7	آزادسازی	ایستاری	۰،۲۴۲
H8	نوع‌دوستی	ایستاری	۰،۲
H2	آموزش	جمعیت‌شناختی	۰،۱۹۳
H6	تصور اثربخش بودن مشترک	ایستاری	۰،۱۸۷
H3	سن	جمعیت‌شناختی	۰،۱۶۳
H1	درآمد	جمعیت‌شناختی	۰،۱۳۶
H10	مشارکت	اجتماعی	۰،۱۳۳
H12	ارتباطات	اجتماعی	۰،۱۰۱
H6	دانش	جمعیت‌شناختی	۰،۰۸۴
H5	جنسیت	جمعیت‌شناختی	۰،۰۴
H11	سایر	اجتماعی	۰،۰۳۶

$P < 0.05$;
$P < 0.01$.
Copyright © 2003, John Wiely & Sons, Ltd and ERP Environment.

نتیجه‌گیری

در صورتی‌که بخواهیم از گزینه برق سبز در سال‌های اولیه استقبال مناسبی توسط خریداران بعمل آید موارد به شرح ذیل می‌بایست رعایت گردد:

- عمده‌ترین عامل جذب مشترکان به تعرفه‌های سبز عامل توجهات زیست‌محیطی است.
- در بسیاری از کشورها، برق سبز یا ارزان‌تر از برق استاندارد است یا اضافه بهای بسیار کمی دارد.
- در صورتی که مشتریان نسبت به حمایت‌های دولت مطمئن باشند استقبال خوبی از تعرفه سبز می‌کنند. (معافیت مالیاتی دولت می‌تواند مشوق بسیار خوبی باشد).
- عامل تبلیغات و بازاریابی که قاعدتاً هزینه کلانی دارد یکی از شرایط ضروری معرفی تعرفه سبز است.
- در صورت اجرای تعرفه سبز باید ضمانت نهایی به مشترکان داد که مبالغ پرداختی توسط آنها حتماً صرف تولید انرژی از منابع تجدیدپذیر یا صرف ایجاد ظرفیت جدید در این حوزه می‌شود و ارائه این ضمانت‌ها دارای هزینه است.
- از آنجا که عمده مصرف‌کنندگان برق سبز مشترکان خانگی خواهند بود و از آنجا که طبق تعرفه‌های فعلی ما نرخ انرژی برق مشترکان خانگی نرخ ثابتی نیست و با بالا رفتن متوسط مصرف ماهانه مشترک این نرخ در اغلب موارد بالا می‌رود، از این رو رسیدن به توافقی با مشترکان بر سر این که مابه‌التفاوت هزینه‌های تولیدی با برق سبز را از مشترکان اخذ کنیم، کار دشواری است. چرا که پیش از پایانه هر دوره نمی‌توانیم متوسط نرخ برق مشترک را بدانیم تا مابه‌التفاوت آن را از هزینه تولیدی برق سبز حساب کنیم. از این رو برنامه‌ریزی مشترکان برای مبالغی که باید تحت این شرایط اضافه پرداخت کنند به طور منطقی تنها براساس حدس و گمان خواهد بود و به این دلیل دشوار است.
- در برخی از موارد الزام همه مشترکین به خریداری قسمتی از برق مصرفی خود با تعرفه برق سبز سبب صرفه‌جویی در مصرف برق یا فروش این نوع برق می‌شود.

-عملی‌ترین شیوه، کمک ثابت مشترکان داوطلب به صندوقی است که وظیفه انباشت کمک‌های مردمی به توسعه منابع تجدیدپذیر برق را دارد.

مراجع

-WWW. sustainable energy. Org

-WWW.eren.doe.gov

-New renewable energy resources WEC. (Word Energy Council)

بیوگرافی

آقای حسین قاسمی دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی برق از دانشگاه صنعتی امیرکبیر (پلی تکنیک تهران) بوده و جمعاً دارای ۱۲ سال سابقه کار در صنایع مختلف شامل خودرو سازی، شرکت نفت ایران و نیروگاه می‌باشد که ۱۰ سال آن در قدس نیرو بوده است. زمینه علاقمندی آقای قاسمی ماشین‌های الکتریکی شامل ژنراتور و ترانسفورماتور و موتورها می‌باشد.

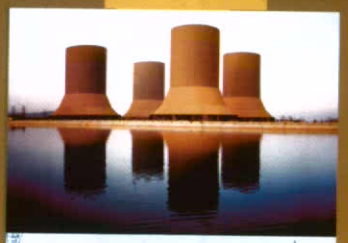
Email:
hghasemee @ yahoo.com

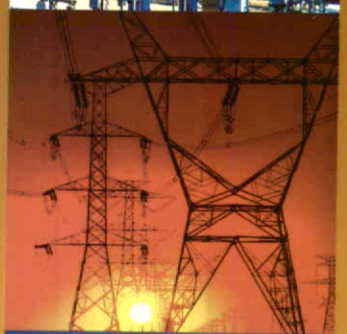
GHODS NIROO ENGINEERING COMPANY

GHODS NIROO ENGINEERING COMPANY (GNEC)

GNEC provides engineering & consultancy services, detail design, rendering technical specifications, project management and site & technical supervisory services in the following fields:

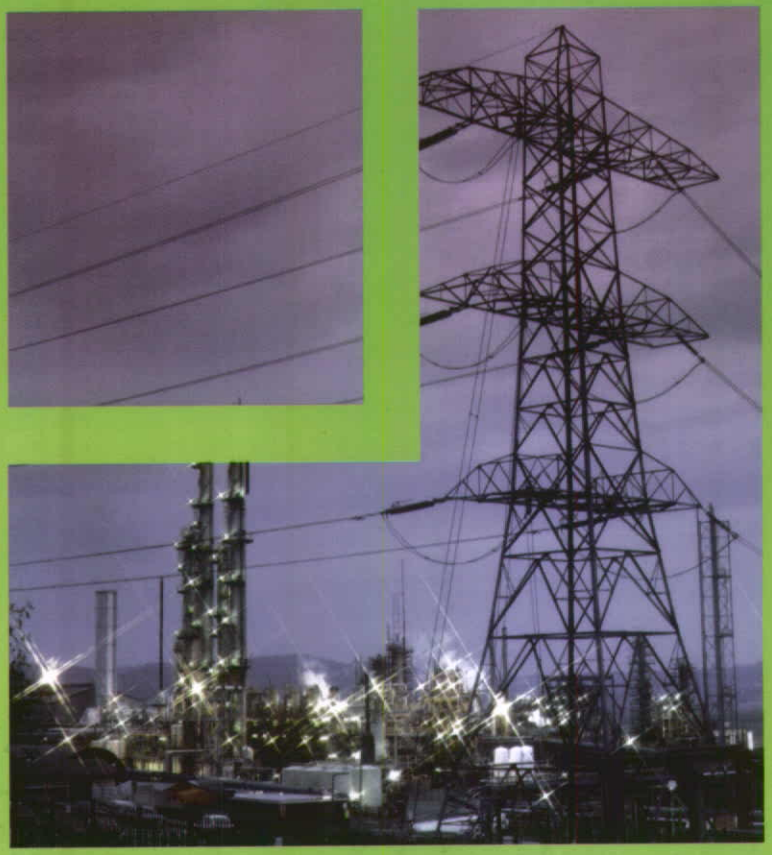
- Thermal Power Plants (Steam, Gas Turbine& Combined Cycle)
- Substation & Switch - Yards
- Transmission Lines & Distribution Networks
- Dams & Hydropower Plants, Water Transmission Lines, Irrigation& Drainage Networks
- Environmental Studies
- Cooperation with Clients in Management of Contracts.(MC)
- Participation in Major "EPC" and "MC" Contracts in Different industrial areas especially in the field of Oil and Gas.
- Renewable Energies Comprising Studies, Engineering and "EPC" Contracts





ISO 9001 DNV REGISTERED FIRM
ISO 14001 DNV REGISTERED FIRM
OHSAS 18001 DNV REGISTERED FIRM

Add: No.82, Ostad motahari Ave.
Tehran - 1566775711 - IRAN
Tel: (+9821) 82404000 - 88403613
Telfax: (+9821) 88411704
E-MAIL: INFO@GHODS-NIROO.COM
WWW.GHODS-NIROO.COM



تهران ، خیابان استاد مطهری ، چهارراه سهروردی ، شماره ۸۲
کدپستی : ۱۵۶۶۷۷۵۳۵۳
تلفن : ۸۸۴۰۳۶۱۳ - ۸۸۴۳۰۴۵۴
فکس : ۸۸۴۱۱۷۰۴

No.82 , Ostad Motahari Ave.
Tehran 1566775353- IRAN
Tel: 88403613 - 88430454
Fax: 88411704

info@ghods-niroo.com
www.ghods-niroo.com