

## کیفیت توان و جایگاه آن در کنترل مدرن دور موتورهای الکتریکی قدرتی

<sup>۱</sup> علی توانا، <sup>۲</sup> دکتر عبدالرضا توکلی و <sup>۳</sup> دکتر فرهاد فریدونی

<sup>۱</sup> پردیس تحصیلات تکمیلی علوم و تحقیقات گیلان، tavana.ali662@gmail.com

<sup>۲</sup> دانشگاه آزاد اسلامی واحد لاهیجان، tavakoli@liau.ac.ir

<sup>۳</sup> دانشگاه صنعت آب و برق، شهید عباسپور، تهران، ایران، ff16786@gmail.com

چکیده: الکتروموتورها به عنوان بزرگ ترین مصرف کننده انرژی در شبکه مصرف می باشند و لذا جهت بهینه سازی، باید از سیستم های کنترلی مدرن مبتنی بر فن آوری ادوات الکترونیک قدرت استفاده نمود. استفاده از موتورهای مجهز به درایو سرعت متغیر (VSD)، ضمن فراهم نمودن امکان تغییرات لازم در سرعت موتور بطور دایم، قادر به بازیابی انرژی مصرفی در ترمزهای مکانیکی به شبکه نیز می باشد. امروزه بهره گیری از این فن آوری نوین در جهت افزایش بازده نیروگاهها از اهمیت خاصی برخوردار می باشد. لذا بایستی در طراحی، خرید تجهیزات و ساخت پروسه های صنعتی و نیز جایگزینی فرایندهای صنعتی قدیمی مورد توجه قرار گیرد.

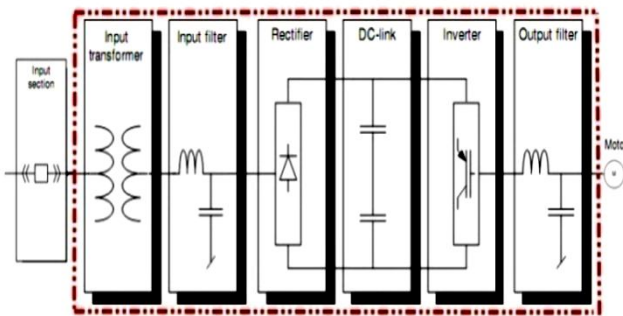
واژه های کلیدی: الکتروموتورهای نیروگاهی، بهینه سازی مصرف انرژی، درایو سرعت متغیر (VSD)، قوانین آفینیتی، کیفیت توان

### ۱- مقدمه

برنامه ریزی انرژی در سطح ملی مورد توجه می باشد. برای بهبود عملکرد الکترو موتورها لازم است، سیستم های مرتبط با موتور، از جمله: کیفیت توان شبکه برق، کنترل کننده های موتور، الکتروموتور و سیستم انتقال نیرو در نظر گرفته شود. مزیت عمده کنترل کننده های نوین دور موتور توانایی آنها در بازیابی انرژی مصرفی در ترمزهای مکانیکی به شبکه می باشد. از میان روشهای مختلف ارائه شده به منظور بهبود کارایی موتورهای الکتریکی، درایوهای سرعت متغیر (VSD) با مکانیزم مبتنی بر فن آوری ادوات الکترونیک قدرت، طی سالهای اخیر مورد توجه قرار گرفته است. بخش قابل توجهی از انرژی در صنایع با استفاده از

افزایش جمعیت و نیاز روز افزون بشر به منابع انرژی از یک سو، و مسائل زیست محیطی و بازار رقابتی از سوی دیگر، موضوع افزایش بازده و صرفه جویی در مصرف برق را از اهمیت ویژه ای برخوردار نموده است. موتورهای الکتریکی سهم عمده ای در مصرف برق تولیدی جهان را دارند و روش های مختلفی به منظور افزایش بهره وری این تجهیزات ارائه شده است. از جمله این اقدامات می توان به نصب سیستم های اصلاح توان راکتیو، طراحی و ساخت الکتروموتورهای راندمان بالا، و انواع روشهای راه اندازی نرم موتورهای الکتریکی بر شمرده [۱]. بدیهی است که افزایش بازدهی محرک های صنعتی از نظر اقتصادی و

استفاده از اینورتر مجدد آبه ولتاژ AC با فرکانس و ولتاژ متغیر مورد نیاز تبدیل می گردد. درایو یا کنترل کننده دور موتور برای تنظیم دور الکترو موتورهای AC (موتورهای تکفاز یا سه فاز) استفاده می شود. درایوها قادرند دور موتور را از صفر تا چندین برابر دور نامی موتور و بطور پیوسته تغییر دهند.



شکل ۱- ساختار کلی مدار قدرت درایو

## ۱-۲- ساختار درایو

بلوک دیاگرام کلی قسمت قدرت یک سیستم درایو سرعت متغیر در شکل (۱) نمایش داده شده است. بسته به نوع و کاربرد درایو، ممکن است تمامی این بلوک ها در یک درایو مورد استفاده قرار نگیرد. بخش های مختلف درایو سرعت متغیر به شرح ذیل می باشد.

(۱) بخش ورودی (Input Section): این بخش جدا سازی اجزاء درایو از سمت تغذیه خارجی را فراهم می نماید. آخرین سطح حفاظت نیز معمولاً در این بخش انجام می شود.

(۲) ترانسفورمر ورودی (Input Transformer): ترانسفورمر ورودی معمولاً دو کارکرد پایه ای دارد. این ترانسفورمر، به منظور اتصال و تغذیه یکسوساز با تعداد پالس بیشتر از ۶، می تواند یک ثانویه چند-سیم پیچ داشته باشد. به عنوان مثال، یک رکتیفایر ۱۲ پالس حداقل به یک ترانسفورمر سه سیم پیچ نیاز دارد. همچنین، یک یکسو ساز در ورودی درایو، حداقل به هفت سیم پیچ در ثانویه این ترانسفورمر نیاز دارد. بویژه، توالی صفر یا ولتاژ مد مشترک بین شبکه و موتور ایزوله می شود.

درایوهای سرعت متغیر و از طریق کاهش بار فن و یا پمپ قابل صرفه جوئی است [2]. توان مصرفی فنها و پمپ ها با توان سوم سرعت چرخشی شفت آن رابطه مستقیم دارد. کاهش ۱۰٪ سرعت موجب کاهش فلو به میزان ۱٪ می شود، در حالیکه توان مصرفی بهمیزان ۲۷٪ کم می شود. کاهش ۲۰٪ سرعت پمپ ها و فن ها می تواند صرفه جوئی در انرژی به میزان ۵۰٪ را در پی داشته باشد. الکتروموتورها بیشترین سهم را در مصرف داخلی نیروگاه ها دارند. یکی از اقدامات پر بازده جهت صرفه جوئی انرژی الکتریکی در نیروگاه های بخار که خود پیشگام تولید برق در کشور محسوب می شوند، کاهش مصرف پمپ ها و فن های نیروگاهی که عمدتاً از نوع آسنکرون هستند؛ از قبیل سیستم خنک کن روغن در واحد های گازی، فید پمپ، ID فن، FD فن، فن های برج خنک کننده و پمپ های سیرکولاسیون از طریق نصب درایو در مسیر تغذیه الکتروموتورها می باشد [۳]. تحقق این امر، کاهش مصرف داخلی و افزایش بهره وری نیروگاه ها را در پی خواهد داشت.

## ۲- درایوهای AC کنترل سرعت موتورها

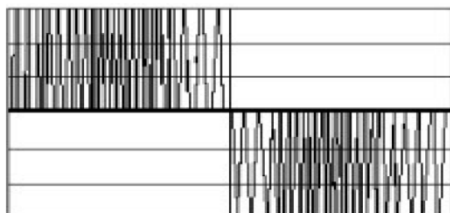
طی دهه های اخیر، پیشرفت زیادی در زمینه ساخت کلیدهای قدرت الکترونیکی مانند IGBT، GTO و IGCT و کنترل کننده های بر پایه پردازنده های سیگنال دیجیتال (DSP) با سرعت بالا بدست آمده است. لذا، استفاده از سیستم های مبتنی بر فن آوری الکترونیک قدرت [4] در کاربردهای متنوعی از قبیل منابع تغذیه سوئیچینگ، کلیدهای استاتیک، سیستم های انتقال انعطاف پذیر (FACTS)، فیلترهای اکتیو (APF)، سیستم های برق بدون وقفه (UPS) و درایوهای سرعت متغیر (VSD) گسترش یافته است [5] و [6]. درایوهای سرعت متغیر، دستگاه هایی هستند که توان ورودی با ولتاژ و فرکانس ثابت را به توان خروجی با ولتاژ و فرکانس متغیر تبدیل می کنند. سرعت چرخش (دور) شفت یک موتور، تابعی از فرکانس منبع تغذیه آن است. از این رو، در یک درایو نخست برق شبکه به ولتاژ DC تبدیل شده و سپس با

استفاده قرار می گیرد. فرم اصلی اینورترهای چند سطحی در شکل های الف تا ج شکل ۲ مشاهده می شود.

شکل ۲- الف ، خروجی یک اینورتر دو سطحی را نشان می دهد که خروجی این اینورتر بین دو سطح  $DC$  و  $-DC$  کلید زنی می شود.

در شکل ۲- ب، خروجی یک اینورتر سه سطحی را نشان می دهد که می تواند بین سه سطح  $0$ ،  $DC$  و  $-DC$  کلید زنی شود.

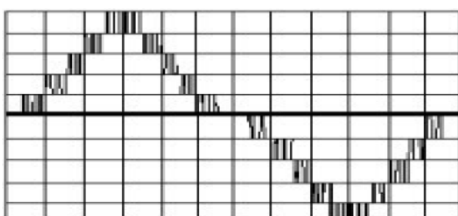
شکل ۲- ج ، خروجی یک اینورتر پنج سطحی را نمایش می دهد که خروجی بین پنج سطح  $0$ ،  $DC$ ،  $+2 \times DC$ ،  $-DC$  و  $-2 \times DC$  کلید زنی می شود. هر چه تعداد سطوح کلید زنی اینورتر بیشتر باشد، خروجی به دست آمده محتوای هارمونیک کمتری دارد و استفاده از آن در ولتاژهای بالاتر امکان پذیرتر می باشد. لیکن، طراحی و ساخت مدارات آن پیچیده تر و گرانیقیمت خواهد بود.



(الف)



(ب)



(ج)

شکل ۲: سطوح کلید زنی در اینورترها:  
الف - دو سطحی ، ب - سه سطحی و ج - پنج سطحی

۳) فیلتر ورودی (Input Filter): فیلتر ورودی به منظور محدود نمودن تزریق جریان های هارمونیک درایو به شبکه و جلوگیری از جابجایی ضریب توان نصب می گردد.

۴) یکسو ساز (Rectifier): یکسو ساز مورد استفاده برای یک اینورتر منبع ولتاژ ( $VSI$ ) معمولا با استفاده از دیودهای یکسوساز ساخته می شود. در سیستم های درایو ولتاژ پایین ( $LV$ )، بکارگیری یک یکسو ساز ۶ پالس متداول است. در درایو های ولتاژ متوسط، در اغلب موارد، یکسو ساز ۱۲ پالس به منظور محدود کردن هارمونیک های شبکه تا حدود معرفی شده در استاندارد *IEEE 519* مورد استفاده قرار می گیرد.

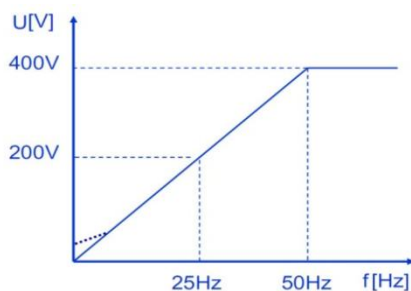
اگر چه در سیستم های درایو با توان بالاتر (بیشتر از 5000HP)، استفاده از یکسو سازهای با تعداد پالس کنترلی بیشتر از ۱۲ بسیار متداول است. در ساختار رکتیفایر اینورتر منبع جریان  $(CSI)$  معمولا از تایریستور استفاده می شود. تعداد پالس ها ، بین ۶ تا ۲۴ پالس می باشد.

۵) ارتباط  $DC$  ( $DC$  Link): لینک های  $DC$  به منظور جدا نمودن مبدل الکترونیک قدرت (یکسو ساز) از سمت مبدل موتور (اینورتر) مورد استفاده قرار می گیرد. در اینورتر منبع ولتاژی ، یک بانک خازنی به این منظور در نظر گرفته می شود، در حالیکه در اینورتر منبع جریانی، یک سلف به منظور جدا سازی دو طرف مورد استفاده قرار می گیرد. هر دو عنصر (خازن یا سلف) ، ذخیره انرژی را انجام داده و به صورت یک فیلتر عمل می کنند.

۶) اینورتر (Inverter): اینورتر که به آن مبدل الکترونیک قدرت سمت موتور نیز گفته می شود، به منظور تبدیل توان  $DC$  به  $AC$  مورد استفاده قرار می گیرد. ساختار قدرت و بویژه کنترل کلید زنی اینورتر ، پیچیده ترین بلوک در درایوهای سرعت متغیر می باشد. توپولوژی های مختلفی در اینورتر درایو وجود دارد . متداولترین آرایش ، اینورتر دو سطحی می باشد. این آرایش بطور گسترده در انواع درایوهای ولتاژ پایین مورد استفاده قرار می گیرد. در سیستم های درایو ولتاژ متوسط ، در پیکره بندی اینورتر ها تعداد سطح کلید زنی بالاتر (Switching Level) مورد

(۱) روش تثبیت نسبت ولتاژ به فرکانس (یا کنترل  $V/f$  ثابت): ساده ترین روش کنترل موتورهای  $AC$  می باشد شکل (۳).

هم اکنون ، این روش بطور گسترده در کاربردهای صنعتی مورد استفاده قرار می گیرد. این نوع کنترلرها از نوع اسکالر بوده و بصورت حلقه باز با پایداری خوب عمل می کنند. مزیت اصلی این روش، سادگی سیستم های کنترلی آن است. ولی این نوع کنترلرها برای کاربردهای با پاسخ سریع مناسب نمی باشند.



شکل ۳: منحنی  $V/f$  یک موتور القایی نمونه

(۲) روش کنترل برداری : روبات ها و ماشین های ابزار نمونه هائی از کاربردهای با دینامیک سریع هستند. در این کاربردها، از تکنیک های کنترل برداری (Vector Control) استفاده می شود که در آن، با تفکیک مؤلفه های جریان استاتور به دو مؤلفه گشتاور ساز و فلوساز، و کنترل آنها با استفاده از رگلاتورهای  $PI$  کنترل شود. و بدین ترتیب تمام مزایای موتور  $DC$  از جمله پاسخ گشتاور سریع آنها در موتورهای  $AC$  نیز در دسترس خواهد بود.

(۳) روش کنترل مستقیم گشتاور: پاسخ گشتاور در روش های برداری در حدود 20ms و در روش های کنترل مستقیم گشتاور (Direct Torque Control) این زمان در حدود 5ms می باشد.

## ۲-۲- مزایای استفاده از درایو کنترل سرعت موتور

تحقیقات زیادی به منظور ارزیابی کاربرد درایو در کنترل فن ها، پمپ ها، کمپرسورها و دیگر محرکه های صنعتی در سالهای اخیر انجام شده، و مزایای آن به اثبات رسیده است. امکان

(۷) فیلتر خروجی (Output Filter) : فیلتر خروجی جهت هموار سازی و حذف هارمونیک های شکل موج حاصل از کلید زنی در خروجی اینورتر استفاده می شود.

(۸) الکتروموتور (Motor): خروجی درایو، به منظور تبدیل انرژی الکتریکی به مکانیکی به موتور الکتریکی داده می شود.

تنظیم دور در الکتروموتور علاوه بر منعطف نمودن پروسه های صنعتی، در کاربردهای زیادی منجر به صرفه جویی انرژی هم می گردد. علاوه بر آن، درایوها جریان راه اندازی کشیده شده از شبکه را به میزان زیادی کاهش می دهند. به طوریکه این جریان خیلی کمتر از جریان نامی موتور است.

درایوها می توانند موتور را بطور نرم و کاملاً کنترل شده راه اندازی و متوقف نمایند. زمان استارت و استپ را می توان به دقت از کسری از ثانیه و صدها دقیقه تنظیم نمود. توانایی درایو در راه اندازی و توقف نرم ، موجب کاهش قابل ملاحظه تنش های مکانیکی در کوپلینگ ها و سایر ادوات دوار می گردد.

اگرچه کنترل کننده های دور موتور الکتریکی دارای ساختار پیچیده ای هستند ولی چون در ساختمان آنها از مدارات الکترونیک قدرت استاتیک استفاده می شود و فاقد قطعات متحرک می باشند، از عمر مفید بالایی برخوردار هستند. مزیت دیگر کنترل کننده های دور موتور، توانایی آنها در بازیابی انرژی مصرفی در ترمزهای مکانیکی و یا مقاومت های الکتریکی، به شبکه می باشد. در این شرایط، با استفاده از کنترلرهای دور مدرن می توان از اتلاف این نوع انرژی جلوگیری نمود. به نحوی که در برخی کاربردها قیمت انرژی بازیافت شده از این طریق، در کمتر از یک سال معادل هزینه سرمایه گذاری سیستم نصب شده می شود.

کنترل کننده های دور موتور انواع مختلفی دارند که می توانند انواع موتورهای  $AC$  و  $DC$  را کنترل کنند [7]. بخش کنترل این دستگاه ها بر اساس الگوریتم های مختلفی عمل می کند که می توان به روش های اصلی زیر اشاره نمود.

۷) کاهش برق مصرفی و هزینه آن  
۸) دسترسی به پورت های اطلاعاتی مانند مودباس، پروفی باس و... به منظور تبادل اطلاعات، امکان کنتررا از راه دور درایو، اتصال درایو به سیستم های کنترل و پایش (Monitoring) نوین قبل از PLC و DCS

۹) امکانات نرم افزاری و قابلیت برنامه ریزی عملکرد درایو  
۱۰) امکان ایجاد فشار ثابت در پمپ ها  
۱۱) افزایش قابل ملاحظه محدوده تغییرات دور نسبت به سایر روش های مکانیکی تغییر دور  
۱۲) استفاده از الکتروموتور در سرعت پائین که موجب کاهش هزینه های تعمیر و نگهداری ادوات متحرک مکانیکی و افزایش زمان قبل از بروز خطا (MTBF) می گردد.

۱۳) بازیابی انرژی تلفاتی در ترمز مکانیکی  
۱۴) منعطف نمودن فرایندهای صنعتی  
۱۵) تطبیق مشخصه های موتور با بار  
۱۶) امکان استفاده از درایو در مدهای کاری مختلف: فرکانس ثابت، سرعت متغیر، گشتاور ثابت و ...  
۱۷) صرفه جویی در مصرف انرژی، استفاده مفید از سوخت مصرفی و کاهش انتشار آلاینده های هوا

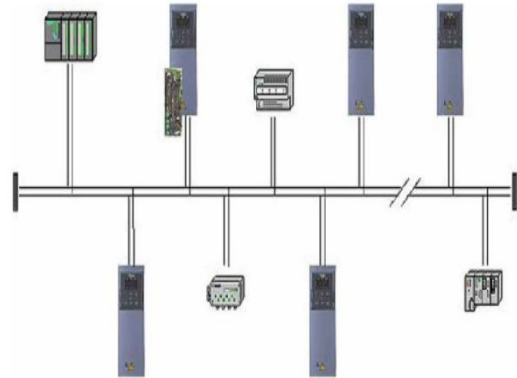
## ۲-۳- قوانین آفینیتی:

قوانین آفینیتی (Affinity Law/s)، مبنای محاسبات صرفه جویی انرژی در پمپ و فن با استفاده از درایوهای سرعت متغیر است [۸]. طبق این قوانین روابط حاکم در یک پمپ یا فن به صورت زیر است.

$$\frac{Q_1}{Q_2} = \frac{N_2}{N_1} \quad (1)$$

$$\frac{P_1}{P_2} = \left(\frac{N_1}{N_2}\right)^3 \quad (2)$$

تبادل اطلاعات بین درایوو سیستم های کنترل با استفاده از پورت های اطلاعاتی فراهم شده است. در شکل ۴، بخشی از یک شبکه صنعتی نمونه تحت پروفی باس، با PLC مرکزی، چند درایو و تعدادی تجهیزات دیگر نشان داده شده است.



شکل ۴: اتصال درایوها در یک شبکه صنعتی نمونه

از مزایای استفاده از درایوهای سرعت متغیر می توان موارد زیر را بر شمرد.

۱) تنظیم سرعت (دور) موتور الکتریکی  
۲) تغییر آسان جهت دور، بدون نیاز به کنتاکتور، و جلوگیری از گرم شدن موتور در کاربردهایی که موتور متناوباً تغییر جهت داده و یا خاموش می شود.  
۳) کاهش تنش های مکانیکی و در نتیجه افزایش طول عمر مفید اجزاء مکانیکی

۴) استفاده از درایو جهت راه اندازی و توقف نرم الکتروموتور، که موجب کاهش جریان راه اندازی به کمتر از ۱۰٪ جریان نامی، کاهش شوک های الکتریکی به شبکه (فلیکر، کمبود ولتاژ و ...) و جلوگیری از وارد شدن تنش های مکانیکی به قسمت های مکانیکی، جعبه دنده، بیرینگ ها، کویلینگ و ...، که منجر به کاهش هزینه های نگهداری و افزایش عمر مفید تجهیزات دوار می گردد.

۵) بهبود ضریب توان و رفع نیاز به نصب بانک خازنی و جبران سازهای توان راکتیو

۶) حفاظت موتور در برابر اضافه بار، افزایش و کاهش ولتاژ تغذیه

### ۳- نتیجه گیری

$$\frac{H_1}{H_2} = \left(\frac{N_1}{N_2}\right)^2 \quad (3)$$

در این مطالعه، یکی از راه حل های مدرن به منظور صرفه جوئی برق مصرفی الکتروموتورهای نیروگاهی بر پایه استفاده از درایوهای سرعت متغیر مورد ارزیابی قرار گرفت. نتایج به دست آمده مزایای متعدد این روش از قبیل کاهش مصرف داخلی واحد، افزایش عمر مفید ادوات مکانیکی دوار و بهبود شاخص متوسط زمان قبل از خطای (MTBF) این تجهیزات، کاهش تنش های الکتریکی و ضربه های مکانیکی راه اندازی را نشان می دهد. بنابر این، استفاده از سیستم درایو جهت کنترل دور الکتروموتورهای نیروگاهی با در نظر گرفتن ملاحظات کیفیت توان (Power Quality) از جنبه های فنی و نیز اقتصادی مقرون به صرفه می باشد.

که در آن؛  $Q$ : فلو،  $H$ : فشار و  $p$  توان ورودی می باشد. مطابق این روابط اگر دور موتور به نصف کاهش پیدا کند، فلوی سیال نیز نصف خواهد شد در حالیکه در این شرایط فشار به ۲۵٪ مقدار اولیه، و مصرف توان نیز ۸ برابر کاهش می یابد.

عکس العمل های داخل کل سیستم در رابطه تئوری بین سرعت فن و توان مصرفی موتور منظور نمی شود. همچنین اثر فشار برگشتی استاتیک در کارکرد سیستم کانال هوا یا اثر فشار هد استاتیکی در کاربرد پمپ سانتریفیوژ در نظر گرفته نمی شود. اندازه بزرگی فشار برگشتی استاتیک اثر معکوسی بر توان مصرفی و صرفه جوئی انرژی دارد. در این شرایط بهتر است به جای توان سوم از توان دوم استفاده گردد.

$$\frac{P_1}{P_2} = \left(\frac{N_1}{N_2}\right)^2 \quad (4)$$

### سپاسگزاری

برخود لازم می دانم از راهنمایی های جناب آقای دکتر فریدونی و جناب آقای دکتر توکلی تشکر و قدردانی نمایم.

### ۲-۴- ملاحظات خرید و نصب سیستم درایو:

علیرغم مزایای اشاره شده در خصوص سیستم های VSD، باتوجه به تولید هارمونیک بایستی ملاحظات مربوطه در خرید و نصب این سیستم ها در نظر گرفته شود.

(۱) بررسی مشخصات فنی درایو قبل از خرید و نیز تطابق مشخصه های الکتروموتورهای موجود و یا جدید

(۲) در صورت نیاز، نصب فیلترهای هارمونیک و تحلیل اقتصادی آن

(۳) در نظر گرفتن اثر هارمونیک های تولید شده توسط درایوها در طراحی سیستم الکتریکال نیروگاه ها و اثر آن بر سایر تجهیزات

### مراجع

۱- کاظم دولت آبادی "بهبود سازی مصرف انرژی در الکتروموتورهای صنعتی"، شرکت پرتو صنعت، ۱۳۸۲

2 - Pauwels, K.M. Laborelec, "Energy savings with variable speed drives", CIRED. 16th International Conference and Exhibition on (IEE Conf. Publ No. 482), Vol.4, 2001, pp.15-20.

۳- محمد رضا ملازاده شاهرودی، فرهاد فریدونی، مسعود شیخ، "استفاده از درایو سرعت متغیر به منظور افزایش بهره وری فن های برج خنک کن در نیروگاه بعثت"، سومین کنفرانس نیروگاه برق، ۱۳۸۹

4- Ned Mohan, "First Course on Power Electronics & Drives", Chapter 11, MNPERE., Hoboken, New Jersey, 2004

5 – Bimal K. Bose, "POWER ELECTRONICS and MOTOR DRIVES", Chapter 7, Academic Press In an imprint of Elsevier, 2006

6 – Bin Wu, "HIGH-POWER CONVERTERS AND AC DRIVES", 1st Ed. Chapter 14, John Wiley & Sons, Inc., Hoboken, New Jersey, 2006

7 – Bin Wu, Jorge Pontt, José Rodríguez, Steffen Bernet, Samir Kouro, "Current-Source Converter and Cycloconverter Topologies for Industrial Medium-Voltage Drives", IEEE TRANS. ON INDUSTRIAL ELECTRONICS, VOL. 55, NO. 7, 2008, pp.2786-2797.

۸- اباذر دهقان پور، مهدی ظریف، ابوالفضل قاسمی، محمد حسین جاویدی،  
”افزایش بهره وری پمپ های واحد الین نیروگاه مشهد با استفاده از درایو  
های اینورتری“، بیست چهارمین کنفرانس بین المللی برق F.PSC2009-  
EPG-016-09.