بررسی اقتصادی کولرهای آبی با وجود موتورهای الکتریکی سه‌فاز بهمراه اینورتر

احسان بلورکاشانی[۱]، سید عباس طاهر[۲]

تاریخ دریافت مقاله:
۱۳۹۲/۷/۲۳

تاریخ پذیرش مقاله:
۱۳۹۲/۱۲/۲۵

چکیده:

اهمیت موضوع صرفه‌جویی در انرژی و سهم گسترده بارهای موتوری در وسائل خانگی و همچنین افزایش بهای حامل‌های انرژی، لزوم استفاده از فناوری در بهینه‌سازی مصرف انرژی را پررنگ‌تر نموده است. در این مطالعه، به بررسی کولرهای آبی بهمراه موتور سه‌فاز و اینورتر با استفاده از برق تک‌فاز شهری در یک بازه زمانی مشخص و اقلیم آب و هوایی گرم و خشک که بیشترین مصرف‌کننده کولرهای آبی هستند، پرداخته شده است. نتایج نشان می‌دهد استفاده از راه‌انداز نرم که باعث کاهش استرس مکانیکی بر روی قطعات می‌گردد، کاهش تلفات انرژی الکتریکی در خطوط انتقال را نیز به وجود می‌آورد. نهایتا در کمتر از دو سال سرمایه اولیه برگشته و به میزان قابل توجهی کاهش مصرف انرژی را برای مصرف‌کننده در پی دارد.

کلمات کلیدی:

اینورتر، موتورهای الکتریکی، کاهش مصرف، بازگشت سرمایه، صرفه‌جویی سالانه انرژی

۱) دانشجوی دکتری برق قدرت دانشگاه کاشان
۲) دانشیار گروه مهندسی برق-قدرت دانشگاه کاشان

Boloor@grad.kashanu.ac.ir
Sataher@kashanu.ac.ir

[Downloaded from necjournals.ir on 2025-11-18]

مقدمه

با پیشرفت علم و فناوری، هوشمندسازی و استفاده از ادوات الکترونیک قدرت در جهت مدیریت مصرف توان موتورهای الکتریکی بسیار مورد توجه قرار گرفته است. تقریبا در بیشتر تجهیزات خانگی از موتورهای الکتریکی استفاده می‌گردد. موتورهای القایی AC عمومی‌ترین موتورهایی هستند که در سامانه‌های کنترل حرکت صنعتی و همچنین خانگی استفاده می‌شوند. طراحی ساده و مستحکم، قیمت ارزان، هزینه نگهداری پایین و اتصال آسان و کامل به یک منبع نیروی AC از امتیازات اصلی موتورهای القایی AC است [۳,۴]. برای موتور القایی محدوده حالت پایدار به سبب فرکانس تغذیه و تعداد قطب‌های ثابت بین ۸۰ تا۱۰۰ درصد سرعت ارزیابی شده است. هنگامی‌که یک موتورالقایی آغاز به کار می‌کند، جریان راه‌اندازی زیادی از شبکه دریافت می‌نماید [۱۲]. جریان هجومی زیاد ممکن است موجب تقلیل ولتاژ در خطوط تغذیه شود و بر عملکرد وسایل کاربردی دیگری متصل به همان منبع تغذیه تاثیر گذارد. هنگامی که موتور با ضریب توانی کمتر از واحد کار می‌کند، به واسطه غیرخطی بودن مدار مغناطیسی، جریان کشیده شده توسط موتور به طور طبیعی سینوسی نیست [۲۰] که این خود باعث ایجاد هارمونیک در شبکه می‌شود. ضریب‌توان پایین نیز از دیگر مشکلاتی است که موجب تلفات در خطوط انتقال می‌شود و همچنین می‌تواند به اشغال ظرفیت خطوط منجر شود [۱] به طوری که شرکت‌های توزیع مشتریان با ضریب‌توان پایین‌تر از حد معین شده را جریمه می‌نمایند. این بدین معنی است که مشتری مجبور است ضریب توان تجهیزات الکتریکی خود را کنترل و یا آنکه جریمه حالت بار سبک را بپردازد.

تحقیقات در زمینه افزایش بازدهی موتورها [۲,۸,۱۴] نشان می‌دهد استفاده از الکتروموتورها با راندمان بالا می‌تواند کاهش قابل توجهی در مصرف برق را ایجاد نماید. در همین زمینه با پیشرفت علم الکترونیک قدرت، درایوهای کنترل‌دور متغیر تحولی عظیمی در عرصه کنترل و کاهش استهلاک مکانیکی و همچنین کنترل جریان‌های هجومی در لحظه راه‌اندازی موتورهای الکتریکی برداشته‌اند [۶,۱۳,۲۱]. این پیشرفت، شروع تحقیقات جدیدی در زمینه صرفه‌جویی در مصرف انرژی را با نتایج خوبی همراه نموده است. تحقیقات انجام شده در اتحادیه اروپا [۷] در سال ۲۰۰۰ نشان می‌دهد میزان کل مصرف برق ۲۵۴۷ بیلیون کیلووات ساعت بوده است که به میزان ۶۵٪ از این مصرف مربوط به بارهای موتوری است. بعد از بررسی اقتصادی نشان داده شده که انجام اقداماتی همچون استفاده از راه‌اندازهای نرم و درایوهای کنترل سرعت متغیر، کاهش مصرف انرژی به میزان ۲۹٪ در بارهای موتوری و ۷٪ در تولید انرژی کل داشته است. تحقیقات و روش‌های متعددی در زمینه میزان بازدهی موتورهای الکتریکی با وجود درایوهای سرعت متغیرVFD انجام شده است [۵,۱۰,۱۱,۲۳] که میزان بازدهی موتور را با توجه به سرعت و میزان بار نشان می‌دهد. برای بررسی دقیق راندمان، توجه به تلفات ایجاد شده در درایو کنترل سرعت متغیر امری مهم است. طبق بررسی‌های انجام شده [۲۲] در ۱۰۰٪ سرعت نامی، راندمان درایو ۹۷٪ و نیز در۴۰٪ سرعت نامی، ۸۲/۵٪ است.

[Downloaded from necjournals.ir on 2025-11-18]

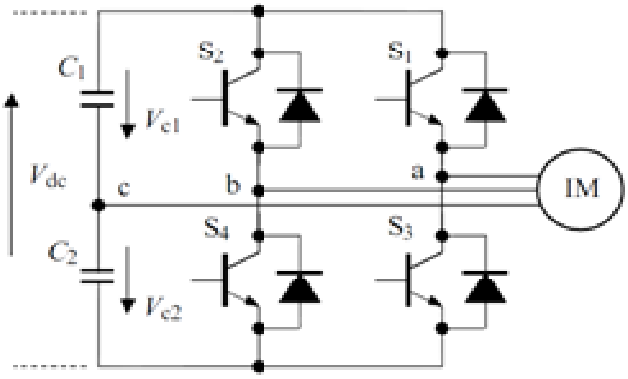
در این مقاله، به بررسی اقتصادی در مورد مصرف انرژی با وجود درایورهای سرعت متغیر VFD بـر روی کولرهـای آبی پرداخته شده است. همچنین توجه به مزیت‌های جایگزینی موتور سه‌فاز به جـای تـک‌فـاز [۱۷] (وزن کمتـر، رانـدمان بیشتر، عدم نیاز به سیم‌پیچ راه‌انداز و یا خازن جهت راه‌اندازی و نیز قیمت کمتر) و بررسی‌هـای اقتـصادی بـر پایـه روابـط ریاضی، نشانگر کاهش مصرف چشمگیر انرژی در یک بازه زمانی مشخص است که در نتیجه، کاهش هزینه را بـه دنبـال خواهد داشت.

انواع درایوهای کنترل سرعت متغیر (VFD)

درایو فرکانس متغیـر یـا VFD یـک سیـستم بـرای کنتـرل کـردن سـرعت چـرخش یـک موتـور AC بـا کنتـرل کردن فرکانس و ولتاژ بـرق اعمـال شـده بـه موتـور الکتریکـی اسـت. اینورترهـا بـر اسـاس شـیوه‌هـای متنـوع کنترلـی (SPWM, SVM, SVPWM) معمولا به صورت ۶ سوئیچه مورد استفاده قرار می‌گیرند. در طبقـه خروجـی اینـورترهـا ترانزیستورهای قدرت (IGBT) استفاده می‌شود که پرهزینه‌ترین قسمت یـک اینـورتر را بـه خـود اختـصاص مـی‌دهنـد. روش‌های مختلفی برای کاهش هزینه در مراجع مورد بحث قرار گرفته اسـت. در ایـن مطالعـه، اینـورتر ۴ سـوئیچه کـه در [۱۶,۱۹] به ذکر جزییات، محاسن و معایب آن پرداخته شده است، برای استفاده در کولرهای آبی مـورد بررسـی اقتـصادی قرار می‌گیرد. مزیت مهم اینورتر ۴ سوئیچه نسبت به اینورترهای مشابه کاهش تعداد سوئیچ از ۶ بـه ۴ عـدد و در نتیجـه، کاهش تلفات درایو و هزینه تمام شده است.

بررسی اقتصادی اینورتر چهارسوئیچه FSTPI

در این طرح، ابتدا برق تک فاز ورودی توسط یکسوساز تمام پل از AC به DC تبدیل می‌شود و سپس این ولتاژ بـه قسمت قدرت اینورتر شکل (۱) اعمال می‌گردد.



شکل ۱) مدار قدرت اینورتر ٤ سوئیچه (FSTPI)

[Downloaded from necjournals.ir on 2025-11-18]

این نوع اینورتر ها با توجه به کاهش تعداد سوئیچ، هم از لحاظ تلفات حرارتی و همچنین از لحـاظ مـساحت گرمـاگیر نسبت به اینورترهای ۶ سوئیچه برتری دارند. با توجه به صرفه اقتصادی این نوع اینورتر، برای استفاده در کـولر بـا ظرفیـت هوادهی ۵۵۰۰ فوت مکعب بر دقیقه (CFM)، فهرست قطعات استفاده شده به همـراه قیمـت در جـدول (۱) آورده شـده است. تفاوت اینورتر ۴ سوئیچه با اینورترهای ۶ سوئیچه در جدول (۱) با زمینه خاکستری مشخص شده است (کاهش تعداد سوئیچ از ۶ به ۴، استفاده از کنترلر معمولی و ارزان قیمت، استفاده از گرماگیر با مـساحت کمتـر بـه نـسبت کـاهش تعـداد سوئیچ‌ها). همانطور که مشاهده می‌شود، تفاوت قیمت یک اینورتر ۶ سوئیچه و ۴ سوئیچه ۷/۵ دلار می باشد.

جدول ۱)فهرست قیمت قطعات تشکیل دهنده اینورتر

نام قطعه	تعداد	قیمت واحد($)	قیمت کل اینورتر ٤ سوئیچه ($)	قیمت کل اینورتر ٦ سوئیچه ($)
Xmega16a4 / DSPIC30F4013	1	2.1	(Xmega16a4) 2.1	(DSPIC30F4013) 5.2
IHW25N120R2 (IGBT)	4 / 6	1.7	6.8	10.2
IR2132 (IGBT Driver)	1	2.7	2.7	2.7
HCPL2631 (Opto-isolator)	3	1	3	3
Bridge Diode	1	0.7	0.7	0.7
EMI Filter	1	1	1	1
470uf 450v Capacitor	3	1.5	4.5	4.5
Push button	4	0.025	0.1	0.1
Fonix socket	5	0.1	0.5	0.5
LM1117 Regulator	1	0.5	0.5	0.5
Metalize Boards	-	5	5	5
Box	1	4	4	4
heat sink	1	2 / 3	2	3
Total Cost	-	-	32.9	40.4

بررسی تاثیر درایوهای کنترل سرعت بر کاهش مصرف توان بارهای موتوری

به طورکلی و با توجه به نتایج شرکت NEMA [۱۷] می‌توان بارهایی را که نیاز به نیروی موتـوری دارنـد، بـه ۳ دسـته تقسیم نمود:

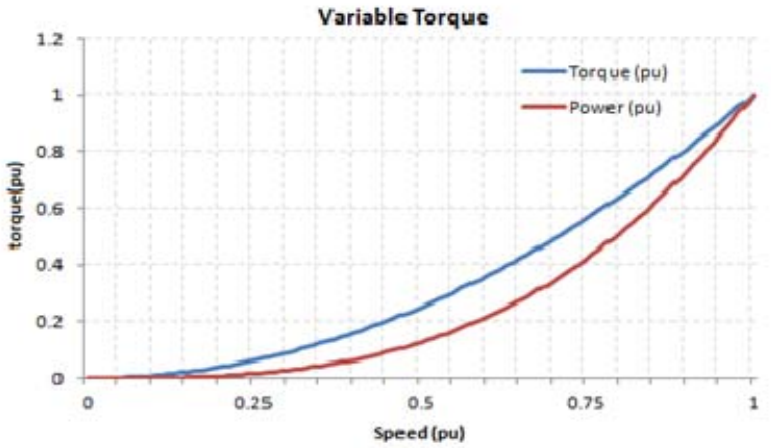
۱) گشتاور ثابت: در این نوع، کاربرد گشتاور در اثر تغییرات سرعت، ثابت است، پس توان ثابتی نیز دریافت خواهد نمـود.

[Downloaded from necjournals.ir on 2025-11-18]

از جمله این نوع تجهیزات می‌توان به نوار نقاله اشاره کرد.

۲) توان ثابت: در این نوع کاربرد، موتورها توان مصرفی ثابتی از شبکه دریافت می‌کنند که در این نوع کاربردها، توان با سرعت رابطه معکوس دارد، دریل برقی از جمله این موارد است.

۳) گشتاور متغیر: مطابق شکل(۲)، در این گروه گشتاور با سرعت تغییر می‌کند همانند بارهای پنکه‌ای (کولرهای آبی)، که این دسته از کاربرد موتورهای الکتریکی با وجود درایو کنترل سرعت متغیر (VFD) می‌تواند صرفه‌جویی قابل توجهی را در مصرف انرژی ایجاد نماید، اما در دو گروه قبل با توجه به آنکه توان ثابتی باید تامین گردد، استفاده از VFD کمکی در جهت صرفه‌جویی اقتصادی نخواهد کرد.



شکل ۲) تغییرات گشتاور برحسب سرعت

در کاربردهای گروه سوم، گشتاور مستقیما با سرعت تغییر می‌نماید و توان با مکعب سرعت. پس اگر سرعت به نصف کاهش پیدا کند، توان به یک هشتم مقدار حداکثر تنزل پیدا می‌کند که این مورد در جدول (۲) مشاهده می‌گردد [۹] . با توجه به نوع اقلیم آب‌وهوایی، درجه حرارت محیط و نیز ساعات کاری، دبی هوای متغیری نیاز است. پس با کنترل سرعت موتور، این امکان فراهم می‌گردد. در نتیجه، توان متغیری که از شبکه کشیده می‌شود، بسیار کمتر از توان ثابتی است که کولر آبی بدون وجود اینورتر به صورت ثابت از شبکه دریافت می‌کند.

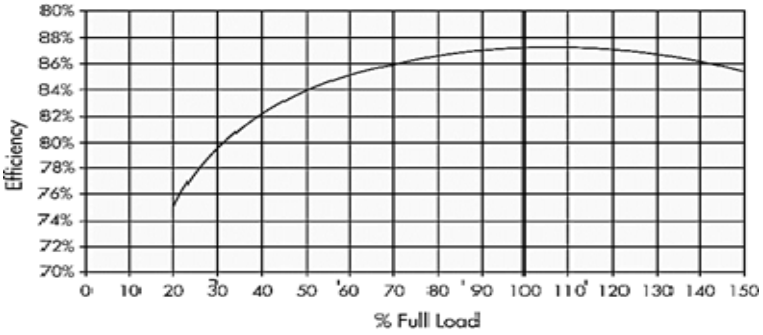
جدول ۲) توان مورد نیاز موتور به صورت تابعی از سرعت

توان مورد نیاز	سرعت موتور
%۱۰۰	%۱۰۰
%۷۳	%۹۰
%۴۲	%۷۵
%۱۳	%۵۰

[Downloaded from necjournals.ir on 2025-11-18]

بررسی بازدهی موتور بهمراه درایو VFD

با توجه به نتایج بدست آمده توسط شرکت NEMA ، میزان راندمان موتورهـای الکتریکـی در بـار کـم، در گـستره وسیعی از موتورهای القایی در حدود ۸۰٪ (برای موتورهای کوچک) و در موتورهای با تـوان بـالاتر از ۱۰۰ اسـب بخـار در حدود ۹۵٪ است. با توجه به شکل (۳) کاملا مشخص است که موتور در بار کامل راندمان بیشتری نسبت به بـی‌بـاری دارد تا آنجا که در کم‌باری بازده موتور به مقدار کمتر از ۴۰٪ کاهش می‌یابد. در نتیجه، در طراحی و انتخـاب یـک موتـور بـرای یک کولر آبی ابتدا می‌بایست نوع و میزان بار مشخص و سپس نوع موتور انتخاب گردد که بـا توجـه بـه انتخـاب کـولر بـا ظرفیت هوادهی ۵۵۰۰ فوت مکعب بر دقیقه (CFM) ، موتورالکتریکی با توان kW ۱/۵ انتخاب مناسبی است.



شکل ۳) تغییرات بازده موتور نوعی(۱۰ اسب بخار)

تحقیقات انجام شده توسط گروه بین المللی تحقیقات و توسعه انرژی کانادا [۱۸] در ایـن بـاره در جـدول (۳) نـشان داده شده است. همانطور که مشاهده می‌شود، میزان راندمان درایو با تغییرات سرعت و بار تغییر می‌کند. لذا بایـد دقـت لازم در محاسبات لحاظ گردد.

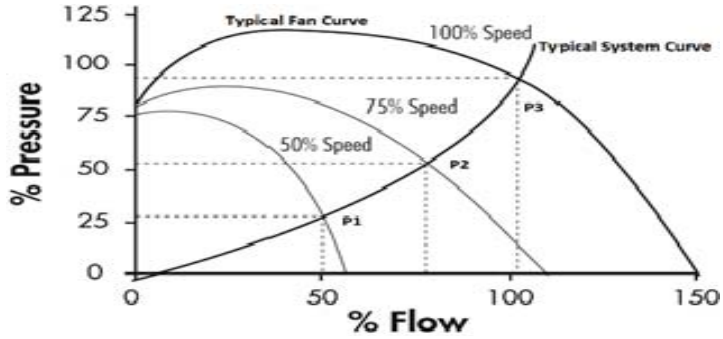
جدول ۳) بازدهی موتور با وجود درایو کنترل دور متغیر

PWM VFD Efficiency as a Function of VFD Power Rating					
VFD HP rating	**Efficiency %** **Load, Percent of Drive Rated Power Output**				
	۱۲/۵	۲۵	۵۰	۷۵	۱۰۰
۱	۰/۴۸	۰/۷۴	۰/۸۴	۰/۸۷	۰/۸۹
۵	۰/۸۰	۰/۸۸	۰/۹۲	۰/۹۴	۰/۹۵

ازجمله نکات قابل توجه در بررسی راندمان موتور و درایو در کولرهای آبی میـزان دبـی یـا فـشار هـوای خروجـی در سرعت‌های متفاوت است. همچنین با داشتن ساعات کاری کولر آبی در طول یک روز می‌توان میزان توان الکتریکی مـورد نیاز را محاسبه نمود. شکل (۴) نشان می‌دهد که جریان هوای خروجی کولر متاثر از میزان فشار گریز از مرکـزی اسـت کـه

[Downloaded from necjournals.ir on 2025-11-18]

موتور به کمک حلزونی به وجود می‌آورد. نقاط P1 تا P3 مشخص می‌کند که چه میزان فشار مورد نیاز است تا بر تلفات غلبه نماید و به دبی جریان هوای ۵۰ تا ۱۰۰ درصد برسد. با توجه به شکل(۴) مستخرج از [۲۲] ، منحنی نوعی فن عبارت است از تغییرات فشار هوا مستقل از عوامل محیطی و خارجی و همچنین منحنی نوعی سیستمی نشان دهنده نیاز محیط به جریان هوای مطلوب بدون تاثیر پذیری از سرعت فن است. نقاط تقاطع این دو منحنی را نقاط کارکرد طبیعی می‌نامند.

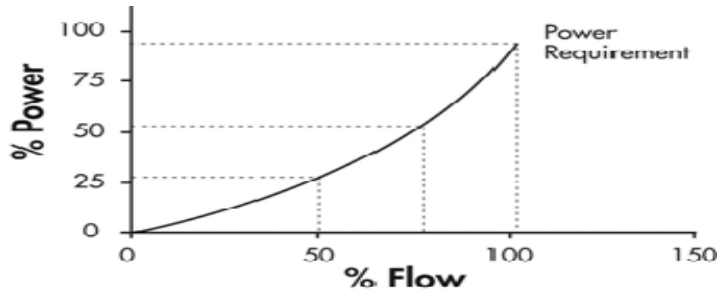


شکل ٤) میزان تغییرات جریان هوای خروجی بر حسب فشار

روابط بین فشار وجریان هوای خروجی و همچنین میزان فشار و توان الکتریکی را که رابطه‌ای غیرخطی است می‌توان به صورت رابطه (۱) نشان داد.

$$\frac{Q_1}{Q_2}=\frac{N_1}{N_2},\ \frac{P_1}{P_2}=\frac{N_1^2}{N_2^2},\ \frac{HP_1}{HP_2}=\frac{N_1^2}{N_2^2} \qquad (۱)$$

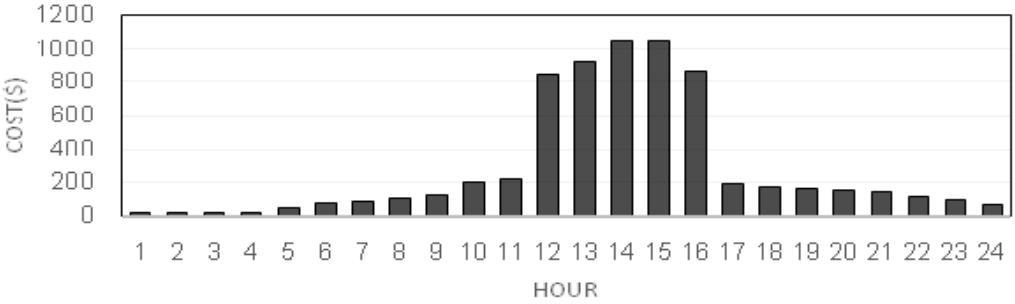
که در آن N سرعت ، Q دبی ، P فشار و HP توان است. همچنین نقاط تقاطع دو منحنی (سیستمی و نوعی فن) به صورت پیوسته عبارت است از $\text{Curve P} = \text{K x (N)}^2$. بر اساس روابط (۱) می‌توان میزان توان مصرفی را بر حسب میزان جریان هوای خروجی طبق شکل(۵) نشان داد.



شکل ۵) میزان تغییرات توان برحسب دبی

[Downloaded from necjournals.ir on 2025-11-18]

نکته مشخص در شکل (۵)، کاهش توان الکتریکی به میزان ۲۵٪ در میزان دبی هوای ۵۰٪ است که نشان می‌دهد با توجه به تغییرات آب و هوایی، اگر کنترل سرعت بخوبی مدیریت شود، کاهش قابل توجهی در مصرف توان الکتریکی حاصل می‌گردد. از جمله موارد مهم دیگر در بررسی اقتصادی موتورهای الکتریکی با وجود اینورتر، میزان ساعات کارکرد موتور در بازه‌های مختلف سرعت است که طی ساعات مختلف در یک روز متغیر است. در یک بررسی و مانیتورینگ پیوسته طبق شکل(۶) در یک‌روز [۱۷] برای یک کولر آبی، بیشترین هزینه انرژی مربوط به ساعات ۱۲-۱۶ (ساعات اوج مصرف) است که موتور باید با حداکثر سرعت و توان کار کند. با این وجود، در ساعات اوج مصرف تقریبا صرفه جویی را در مصرف توان شاهد نیستیم (حداکثر هزینه ۱۰۰۰ دلار)، اما در دیگر ساعات با توجه به کاهش دمای محیط، نیاز به کارکرد ۱۰۰ درصدی موتور نیست و کاهش سرعت موتور باعث کاهش مصرف انرژی و در نتیجه، موجب کاهش هزینه‌ها می‌شود.



شکل ٦) مقادیر هزینه توان در ساعات مختلف

میزان صرفه جویی سالانه انرژی

معادله صرفه‌جویی سالانه در مصرف موتورهای الکتریکی [۱۷]، با توجه به تفاوت راندمان دو موتور هم توان به صورت رابطه (۲) نشان داده شده است:

$$SavingEnergyAnual = HP \times LF \times 0.746 \frac{Kw}{hp} \times \frac{hours}{year} \times (\frac{100\%}{E_{motor1}} - \frac{100\%}{E_{motor2}}) \times \frac{\$}{KWh} \quad (۲)$$

که در آن LF ضریب میزان بار است و از حاصل تقسیم بار متوسط به بار اسمی موتور به دست می‌آید و E نیز راندمان موتور و HP توان الکتریکی موتور بر اسب بخار است. در معادله مذکور میزان ساعت کاری موتورالکتریکی در سال و همچنین میزان راندمان موتور تک‌فاز و سه‌فاز به تفکیک مورد نیاز است تا با توجه به موارد ذکر شده مشخص شود تغییرات راندمان چه تاثیری بر روی کاهش هزینه خواهد داشت. میزان ذخیره دیماند مصرفی در هر ساعت نیز از معادله (۳) محاسبه می‌شود.

[Downloaded from necjournals.ir on 2025-11-18]

$$Electric\ \ Demand\ Saving = 0.746\frac{Kw}{hp}\times\left(\frac{hp}{E_{motor1}}-\frac{hp}{E_{motor2}}\right) \quad (۳)$$

از دو معادله اخیر مشهود است که در سال به چه میزان صرفه‌جویی در انرژی، تنها با توجه به تعـویض موتـور کـولر آبی از تک‌فاز به سه فاز به وجود می‌آید. برای محاسبه دقیق صرفه‌جویی سالانه در مـصرف انـرژی نیـاز اسـت تـا کـاهش مصرف انرژی با وجود اینورتر مورد بررسی قرار گیرد که ابتدا از معادله (۴) هزینه سالانه یک موتور سه‌فـاز بـدون اینـورتر و یک بار هم با وجود اینورتر محاسبه و سپس از تفاضل آنها میزان ذخیره انرژی الکتریکی سالانه به دست می‌آید.

$$Annual\ Energy\ Cost = \frac{P}{E_{motor}}\times LF\times 0.746\frac{Kw}{hp}\ (\omega F)^3\ \times H\times\frac{\$}{KWh}\times\frac{1}{ASD} \quad (۴)$$

که در آن P توان برحسب اسب بخار، P نرخ تغییرات سرعت موتور بر بار کامل اسـمی موتـور، ω_F سـرعت موتـور تحت بارکامل، Emotor راندمان موتور که از مرجع [۲۲] استخراج شـده اسـت، EASD رانـدمان درایـو سـرعت متغیـر استخراج شده از مرجع [۱۶] است. همچنین میزان ذخیره دیماند مصرفی با توجه به استفاده از درایو کنترل سرعت متغیـر از معادله زیر به دست می‌آید.

$$Electric\ Demand\ Savings = \frac{hp}{E_{motor}}\times LF\times 0.746\frac{Kw}{hp}\times \left((\%\ full\ rated\ speed\ (motor)^3-\frac{\%\ full\ rated\ speed\ (drive))^3}{E_{ASD}}\right) \quad (۵)$$

جهت دقت در محاسبات نیاز است تا مشخصات دو موتور هم‌توان (تک‌فاز و سه‌فـاز) را بـه صـورت واقعـی در اختیـار داشته باشیم. مشخصات دو موتور هم توان، اخذ شده از [۹] در جدول (۴) آورده شده است.

جدول ٤) مشخصات موتور

PRICE LIST							
TYPE	POWER		Unit Price FOB	PACKING SIZE	N.W KG	G.M.	Premium Efficiency At speed 1800rpm
	HP	KW	IN USD	L*W*H		KG	
YL-90S-4 Single Phase	۱/۵	۱/۱	۴۹$	۳۴۵*۲۹۵*۲۸۵	۱۶/۳	۱۷	۸۴%
Y2-90S-4 Three Phase	۱/۵	۱/۱	۴۰$	۳۵۵*۲۶۵*۲۲۰	۱۷	۱۸	۸۸/۵%

همانطور که مشاهده می‌شود، هزینه خرید یک موتور سه فاز ، ۹ دلار کمتر از یک موتور تک فـاز بـا تـوان یکـسان

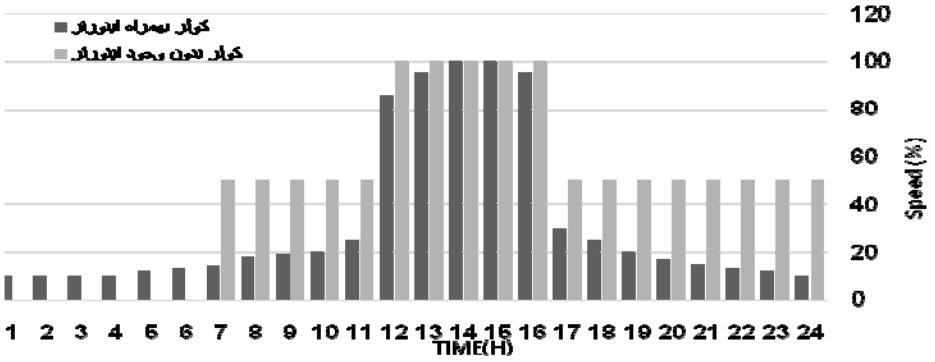
[Downloaded from necjournals.ir on 2025-11-18]

است و بازدهی موتور سه فاز نیز نسبت به تک فاز ۴/۵٪ بیشتر است.

بررسی نتایج بهینه‌سازی

برای اینکه بتوانیم مساله را به صورت واضح بیان نماییم، نیاز است تا فرضیاتی را درنظر بگیریم. ابتدا یک منطقه با اقلیم آب وهوایی گرم وخشک در نظر می‌گیریم که در این منطقه جغرافیایی با توجه به تعداد خانوار، تعداد ۱۰۰۰۰۰ کولر آبی کاربری مسکونی دارد. همچنین فرض بر این است که کولر در ۵ ماه از یک سال (۱۵۰روز * ۲۴ ساعت= ۳۶۰۰ ساعت در طول سال) مورد استفاده قرار می‌گیرد و هزینه هرکیلو وات برق نیز $\frac{\$}{KWH}$ ۰/۰۷ در نظر گرفته می‌شود. هزینه ثابت برای خرید یک عدد کولر بدون اینورتر ۲۰۰ دلار در نظر گرفته شده و میزان هزینه برحسب ساعات کاری در شکل (۶) نشان داده شده است. میزان ساعات کاری کولر، ۲۴ ساعت در نظر گرفته شده و مشخص است که با توجه به امکان کنترل‌دور پیوسته، کاربر می‌تواند باتوجه به دمای محیط دور موتور را کنترل نماید و یا اینکه اینورتر به صورت هوشمند و با توجه به دمای محیط و همچنین دما و رطوبت داخل خانه، سرعت موتور را کنترل نماید که نتیجه این عمل در شکل (۶) نشان داده شده است.

در شکل(۷) کارکرد موتور بهمراه اینورتر و همچنین بدون آن ترسیم شده است. همانطور که مشاهده می‌شود، در حالتی که از اینورتر استفاده نمی‌شود، فقط می‌توان وضعیت موتور را بین حالت‌های خاموش، دورتند، و دورکند قرار داد که سرعت موتور به صورت میانگین در ۲۴ ساعت (که میزان ساعات کاری کولر به صورت پیش فرض و بر اساس ارزیابی نمودارهای تغییرات آب و هوایی اقلیم گرم و خشک در نظر گرفته شده است) ۴۷/۹۱٪ است در حالی که با استفاده از اینورتر وکنترل پیوسته سرعت، این میزان به ۳۱/۷ ٪ تنزل پیدا می‌کند.



شکل ۷) مقایسه تغییرات سرعت موتور در ساعات روزانه

با استفاده از معادله (۲) و نیز فرضیات مساله و همچنین اطلاعات جدول (۴)، میزان صرفه‌جویی سالانه توان

[Downloaded from necjournals.ir on 2025-11-18]

الکتریکی حاصل از تعویض موتور الکتریکی کولر از تک‌فاز به سه‌فاز برای یک کولرآبی ۱۲/۸ دلار می‌باشد که اگر این مقدار در تعداد ۱۰۰۰۰۰ (تعداد کل کولرها در یک منطقه) ضرب گردد، ۱۲۸۰۰۰۰ دلار سالانه صرفه‌جویی را شاهد می‌باشیم، در ضمن اینکه قیمت موتور سه‌فاز نسبت به تک‌فاز بر اساس جدول (۴)، ۹ دلار کمتر است. پس با این وجود، ۹۰۰۰۰۰ دلار نیز کاهش هزینه تولید را نیز در همان ابتدا شاهد هستیم.

این صرفه‌جویی اقتصادی صرفا در اثر افزایش راندمان موتورالکتریکی است. برهمین اساس و نیز با استفاده از معادله (۳) میزان صرفه‌جویی دیماند مصرفی ۶۷/۷۳ وات بر ساعت برای یک عدد کولر به دست می‌آید که اگر در تعداد کل مصرف کننده‌ها ضرب شود، ۶۷۷۳ کیلووات بر ساعت صرفه‌جویی خواهیم داشت، اما مشکلی نیز به وجود می‌آید و آن اینکه تمامی مصرف کننده‌ها به برق سه‌فاز نیاز دارند که این مشکل با اضافه شدن اینورتر مرتفع می‌گردد. پس حل مساله با وجود اینورتر با توجه به معادلات (۴) و (۵) انجام می‌گیرد.

در این معادله، نرخ درصد سرعت موتور[1] با استفاده از شکل (۷) و شرایط ذکر شده محاسبه گردید که به طور میانگین ۳۱/۱۷ ٪ در نظر گرفته شده است. متغیر دیگری که مورد نیاز است، راندمان درایو کنترل سرعت متغیر است که به میزان ۸۷٪ متناظر با ۷۵٪ بار (به صورت میانگین و با توجه به دبی هوای خروجی کولر) طبق جدول (۳) در نظرگرفته شده است. همچنین میزان راندمان موتور سه‌فاز با توجه به جدول (۵) ۸۸/۵٪ است. رابطه (۶) محاسبه هزینه سالانه یک کولر با وجود اینورتر و رابطه (۷) محاسبه هزینه سالانه یک کولر بدون وجود اینورتر را نشان می‌دهد.

$$\frac{1.5hp}{0.885}\times 0.75\times 0.746\frac{Kw}{hp}\times (0.317)^3\times 3600\frac{hours}{year}\times 0.07\frac{\$}{KWh}\times\frac{1}{0.87}=8.75\$\ per\ year \qquad (۶)$$

$$\frac{1.5hp}{0.885}\times 0.75\times 0.746\frac{Kw}{hp}\times (0.4791)^3\times 3600\frac{hours}{year}\times 0.07\frac{\$}{KWh}=26.28\$\ per\ year \qquad (۷)$$

برای به دست آوردن مقدار صرفه جویی سالانه، کافی است دو مقدار بالا را از یکدیگر کسر نماییم که میزان صرفه‌جویی سالانه برای کل کولرهای موجود در منطقه مفروض ۱۷۵۳۰۰۰ دلار به دست می‌آید. برای محاسبه میزان صرفه‌جویی در دیماند مصرفی موتور بهمراه اینورتر از معادله (۵) استفاده شده که برای کل منطقه ۹۱۴۰۰ کیلووات بر ساعت کاهش دیماند مصرفی را نتیجه می‌دهد. با فرض ضریب همزمانی که برای کولرهای آبی ۰/۸ و همچنین ضریب بهره برداری ۰/۸۶ و ضریب توان شبکه ۰/۹، طبق رابطه $S = P \times 0.8/(0.9 \times 0.86)$ به میزان ۹۴۴۷۰ کیلو ولت

1) Percent Full Rated Speed

[Downloaded from necjournals.ir on 2025-11-18]

آمپر ساعت صرفه‌جویی در تولید نیروگاه نیز ایجاد شده است.

با توجه به محاسبات انجام شده، یک مقدار صرفه‌جویی در هزینه تولید کولر با در نظر گرفتن تعویض موتـور خـواهیم داشت. همچنین مقدار افزایش هزینه بابت اضافه شدن اینورتر به کولر نیز باید لحاظ گردد، پس داریم ۹–۳۲/۹ و در نتیجه، ۲۳/۹ دلار به هزینه هر کولر اضافه می‌گردد که اگر در تعداد کولرهای فرض شده ضرب گردد، ۲۳۹۰۰۰۰ دلار باید هزینـه گردد.

جدول ۵) هزینه‌های محاسبه شده برای تعداد ۱۰۰۰۰۰ کولر

قیمت (هزار دلار)	نوع هزینه
۲۰۰۰۰	هزینه ثابت کولر بدون تجهیز به اینورتر
۹۰۰	کاهش هزینه ناشی از تعویض موتور (تک‌فاز به سه‌فاز)
۱۲۸۰	هزینه توان الکتریکی با وجود تعویض موتور (تک‌فاز به سه‌فاز) در سال
۸۷۵	هزینه توان الکتریکی مصرفی با وجود اینورتر در سال
۲۶۲۸	هزینه توان الکتریکی مصرفی بدون وجود اینورتر در سال
۳۰۰۰	ارزش اسقاطی کولر بعد از طی شدن طول عمر مفید (۱۰ سال)
۳۲۹۰	هزینه اولیه اینورتر

با توجه به مرجع [۱۵] ، ضریب بازگشت سرمایه از رابطه (۸) استخراج می‌گردد:

$$\frac{\alpha}{P}=\frac{i(1+i)^n}{i(1+i)^n-1} \qquad (۸)$$

که در آن P مبلغ سرمایه‌گذاری اولیه، n مدت زمان سرمایه گذاری، i نرخ بهره و a مبلغی است که به طور یکنواخت در انتهای هر دوره مورد نظر است. همچنین ضریب ارزش فعلی مبلغ آینده f به صورت زیر به دست می‌آید:

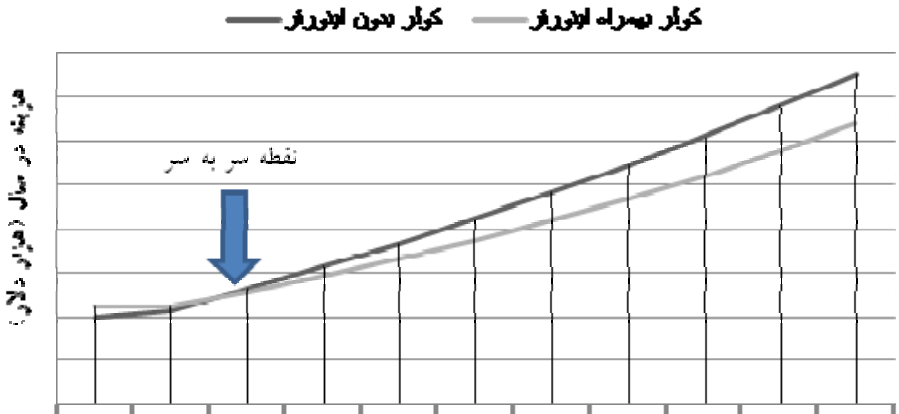
$$\frac{P}{f}=\frac{1}{(1+i)^n} \qquad (۹)$$

[Downloaded from necjournals.ir on 2025-11-18]

برای بررسی اقتصادی، در این مقاله i (نرخ بهره) ۱۰٪ و همچنین n، ۱۰ سال در نظر گرفته شده است. حال برای مقایسه هزینه‌های کولر با وجود اینورتر و نیز بدون وجود آن، نیاز به محاسبه جداگانه هرکدام است که از رابطه (۱۰) به دست می‌آید.

$$C_T = \sum_{n=1}^{10}\left(P(1+i)^n - C_W\right) + \left(Annual\ Energy\ Cost \times n\right) \qquad (۱۰)$$

که در آن C_W هزینه اسقاط کولر در پایان دوره است. هزینه سرمایه‌گذاری اولیه P جهت کولر بدون اینورتر با توجه به جدول(۵) ۲۰۰۰۰ هزار دلار و همچنین کولر بهمراه اینورتر ۲۲۳۹۰ هزار دلار است. در ادامه، با استفاده از رابطه (۹)، f را محاسبه می‌نماییم که این میزان برای کولر بدون تجهیز اینورتر درپایان دوره ۵۱۸۷۵ هزار دلار و ۵۸۰۷۴ هزار دلار برای کولر با وجود اینورتر است. با اضافه کردن هزینه‌های انرژی و ارزش اسقاطی کولر و استفاده از رابطه (۱۰)، در پایان طول عمر تجهیز (۱۰ سال)، اگر هزینه مجموع را محاسبه نماییم، C_T= ۷۵۱۵۵ بر حسب هزاردلار برای کولر بدون اینورتر و C_T = ۶۳۸۲۴ بر حسب هزار دلار جهت کولر بهمراه اینورتر محاسبه می‌گردد. محاسبه هزینه‌ها جهت تمام سال‌های عمر کولر به صورت نمودار سالانه در شکل (۸) نشان داده شده است.



	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
کولر بدون اینورتر	20000	21628	26456	31504	36794	42350	48199	54370	60896	67811	75155
کولر بهمراه اینورتر	22390	22504	25842	29426	33281	37434	41915	46757	51995	57669	63824

شکل ۸) مقایسه هزینه‌ها در طول دوره n با هزینه $\frac{\$}{kWh}$ ۰/۰۷

همانطور که در شکل(۸) مشاهده می‌شود، پس از گذشت یک سال و نیم دو منحنی با یکدیگر تلاقی نموده و تا قبل از این نقطه، میزان هزینه‌ها بیشتر از زمانی است که کولر بدون اینورتر استفاده شده است، اما از نقطه تقاطع به بعد،کاهش

[Downloaded from necjournals.ir on 2025-11-18]

چشمگیر هزینه‌ها را شاهد می‌باشیم (فاصله بین دو منحنی) که این میزان همان میزان صرفه‌جویی انرژی در سال است. بر اساس میزان هزینه هرکیلووات ساعت از ۳ سنت تا ۷ سنت، زمان سر به سر شدن هزینه ها و همچنین هزینه سالانه کولر محاسبه و در جدول (۶) نشان داده شده است. واضح است هرچه هزینه انرژی پایین‌تر باشد، نقطه سر به سر به سال‌های بالاتر انتقال می‌یابد. اما با توجه به هزینه‌های بالای تولید انرژی و کاهش منابع طبیعی مانند نفت، گاز و زغال سنگ، هزینه انرژی نیز افزایش خواهد یافت. پس ضرورت استفاده از روش‌های مختلف جهت کاهش مصرف انرژی، روز به روز بیشتر احساس می‌شود.

جدول ٦) تاثیر نرخ بهای انرژی بر زمان سر به سر شدن هزینه‌ها

زمان سربه سر شدن هزینه ها	هزینه سالانه کولر بهمراه اینورتر (هزار دلار)	هزینه سالانه کولر بدون اینورتر(هزار دلار)	هرکیلو وات ساعت ($\frac{\$}{KWH}$)
اواخر سال چهارم	۱۱۲۶	۳۷۵	۰/۰۳
بین سال سوم و چهارم	۱۵۰۲	۵۰۰	۰/۰۴
بین سال دوم و سوم	۱۸۷۷	۶۲۵	۰/۰۵
اواخر سال دوم	۲۲۵۲	۷۵۰	۰/۰۶
بین سال اول و دوم	۲۶۲۸	۸۷۵	۰/۰۷

نتیجه گیری

در این مقاله، به بررسی اقتصادی استفاده از کولرهای آبی با موتور الکتریکی سه‌فاز بهمراه اینورتر پرداخته شده است. با توجه به بررسی‌های انجام شده، استفاده از اینورتر برای کولر آبی و همچنین تعویض موتور کولر از تک‌فاز به سه‌فاز کاملا اقتصادی و پس از گذشت مدت زمان کوتاهی برای تولیدکننده و مصرف‌کننده سودآور است. افزایش هزینه ثابت اولیه برای مصرف کننده که در اثر نصب اینورتر و تعویض موتور الکتریکی بر روی کولر به وجود می‌آید بعد از گذشت یکسال و نیم (نشان داده شده درشکل ۸) سربه سر می‌گردد و پس از آن، صرفه‌جویی بوجود آمده در انرژی الکتریکی، کاهش هزینه‌های پرداختی را در بر داشته و همچنین کاهش بار سیستم را نیز به همراه دارد و نهایتا کاهش تلفات در خطوط انتقال را نتیجه می‌دهد. همانطور که از نتایج مشاهده گردید، در پایان دوره دهم میزان هزینه‌های کلی کولر (اعم از هزینه‌های مصرف انرژی الکتریکی و تعمیر نگهداری) با وجود اینورتر به میزان ۱۵٪ کمتر است. بنابراین، مشتری به این میزان در طول دوره بهای کمتری بابت انرژی پرداخت می‌کند. البته نقطه سر به سر با تغییر در بهای پرداختی جهت هرکیلووات ساعت

[Downloaded from necjournals.ir on 2025-11-18]

تغییر می‌نماید. از مزایای دیگر می‌توان به کاهش استرس مکانیکی در قطعات کولر با وجود راه‌انداز نرم، حذف استارت‌های ناگهانی و در نتیجه، پرداخت هزینه کمتر جهت تعمیر و نگهداری موتور و همچنین حذف افت ولتاژهای کوتاه مدت در شبکه اشاره کرد.

منابع

[1] Almeida, A. T. D., and Ferreira, F. J., (2003) "Actions to promote Energy Efficient Electric Motors repair," *International journal of energy technology and policy*, pp. 302-314,.

[2] Al-Naseem, O. A., and Adi, A. K,. (2003) "Impact of Power Factor Correction on the Electrical Distribution Network of Kuwait-A Case Study," *The Online Journal on Power and Energy Engineering*, No .1, pp. 173-176,.

[3] Beaty, H., Wayne and James L., Kirtley., (1998) *Electric Motor Handbook*, New York, McGraw-Hill Publishing,.

[4] Boldea, I., Nasar, S., (2009) *The Induction Machines Design Handbook*, CRC Press Publishing,.

[5] Burt, C. M., Piao, X., Gaudi, F., Busch, B., and Taufik, N. F., (2008) "Electric motor efficiency under variable frequencies and loads," *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, pp. 129-136,.

[6] Cohen V., (1995) "Induction motors-protection and starting," *Elektron Journal-South African Institute of Electrical Engineers*, pp. 5-10,.

[7] De Almeida, A. T., (2000) "Improving the Penetration of Energy Efficient Motors and Drives," , *European Commission*. pp. 7-11,.

[8] EURODEEM International Software version 1.0.17, 2007. sunbird.jrc.it/energyefficiency.

[9] Fujian Mindong HangYu Motor Company, http://www.hy-motors.com.

[10] IAC.Electric Motor Systems. Industrial Assessment Center. Center for Energy Efficiency and Renewable Energy. http://www.ceere.org/iac.

[11] ITRC. Variable Frequency Drives and SCADA. California Polytechnic State University. San Luis Obispo, CA. http://www.itrc.org/reports/vfd.

[12] Kim, J., Hong, J., and Nam, K., "A Current Distortion Compensation Scheme for Four-switch Inverters," *IEEE Trans on power Electronics*, No. 24, pp. 1032-1040, 2009.

[13] Lipo, T. A., "The analysis of induction motors with voltage control by symmetrically triggered thyristor," *IEEE Trans on power apparatus and system*, No. 2, pp. 515-525, 1971.

[14] McCoy, G. A., Litman, T., and Douglass, J. G., (1990) *Energy- Efficient Electric Motor Selection Handbook*, Washington State Energy Office, Olympia, WA (USA),.

[Downloaded from necjournals.ir on 2025-11-18]

[15] Mithulananthan, N., and Acharya, N., (2007) "A proposal for investment recovery of FACTS devices in deregulated electricity markets," *Electric Power Systems Research*, No. 5, pp. 695-703,.

[16] Najmi, E. S., et al., (2012) "Z-source three-phase four-switch inverter with DC link split capacitor and comprehensive investigation of z-source three-phase four-switch inverters," *Power Electronics and Drive Systems Technology (PEDSTC)*, Vol. 12, pp. 25-31, .

[17] National Electrical Manufacturers Association (NEMA) www.nema.org.

[18] Natural Resources Canada, www.nrcan.gc.ca.

[19] Niasar, A. H., and Kashani, E. B., (2013) "XMEGA-Based Implementation of Four-Switch, Three-Phase Voltage Source Inverter-Fed Induction Motor Drive," *International Journal of Power Electronics and Drive Systems (IJPEDS)*, Vol. 3, No. 2,.

[20] Singh, G. K., "A research survey of induction motor operation with non-sinusoidal supply wave forms," *IEEE Trans on Power system*,Vol. 75, pp. 200-213, 2005.

[21] Solveson, M. G., Mirafzal, B., and Demerdash, N. A, "Soft-Started Induction Motor Modeling and Heating Issues for Different Starting Profiles Using a Flux Linkage ABC Frame of Reference," *IEEE Trans on industry applications*, No .4, VOL. 42, pp. 973-982, 2006.

[22] Wallbom-Carlson, A., (1998) "Energy Comparison. VFD vs. On-Off Controlled Pumping Stations," *Scientific Impeller*, pp. 29-32,.

[23] Zinsmeyer, T. M., (1985) "Variable speed drive motor system with inverter control," *U.S. Patent*, No. 4,514,991.7,.

[Downloaded from necjournals.ir on 2025-11-18]