

پیش بینی مشخصه های حالت دائم سیستم فتوولتایی پمپاژ آب

سیدمرتضی سقائیان نژاد* و فرزاد فرهمند**

دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر، دانشگاه صنعتی اصفهان

(دریافت مقاله: ۱۳۷۴/۹/۱۸ - دریافت نسخه نهایی: ۱۳۷۵/۵/۹)

چکیده - در این مقاله مشخصه های عملکرد حالت دائم موتورهای DC مختلف (سنت، سری و تحریک جداگانه) پیش بینی می شود که به یک پمپ گریز از مرکز متصل بوده که از طریق یک مبدل کاهنده یا افزاینده یا کاک از ژنراتور فتوولتایی (خورشیدی) تغذیه می شود. فرض بر این است که از باتریهای ذخیره کننده انرژی استفاده نمی شود و لازم است بیشترین بهره برداری از سیستم به عمل آید. به عبارت دیگر با حداکثر کردن سرعت، بیشترین آب پمپاژ شود. ثابت می شود اگر بیشترین بهره برداری با تنظیم ضریب کار مبدل صورت پذیرد مفهومیهای بیشترین بهره برداری و کشیدن توان حداکثر از ژنراتور خورشیدی معادل خواهند شد. به این ترتیب از مبدل به عنوان یک ردگیر قله توان استفاده شده است. تنها در موتور تحریک جداگانه هنگامی که ضریب کار مبدل ثابت نگه داشته شود و بهره برداری حداکثر با تنظیم جریان تحریک به دست می آید، دو مفهوم متمایز می شوند. اضافه بر این در موتورهای سری و سنت و در بیشترین حالات موتور تحریک جداگانه با جریان تحریک ثابت با فرض کشیدن توان حداکثر از ژنراتور، بازده سیستم نسبت به ترمینالهای ژنراتور نیز حداکثر می شود.

Steady-State Performance Characteristics of Photovoltaic System Coupled with a Centrifugal Water Pump

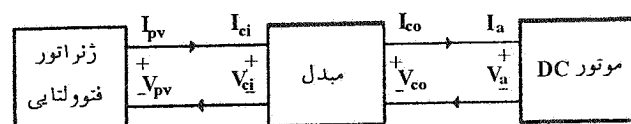
S. M. Saghaian and F. Farahmand

Department of Electrical Engineering, Isfahan University of Technology

ABSTRACT- *In this article our objective is to obtain steady state characteristics of shunt, series, and separately excited DC motors coupled with a centrifugal water pump supplied through a step-up, step-down, and buck converter from a photovoltaic generator. We assume that there are no storage batteries and, of course, the system must operate on maximum utilization; i.e. maximum water must be pumped. It is proven that if maximum utilization is obtained by duty ratio tuning, system utilization maximization and generator peak power tracking will be equal. Thus, a DC/DC converter is used as a peak power tracker. However, a single exception exists in the case of separately excited motors operated in constant converter duty ratio and tuned excitation for maximum utilization. In this case, system utilization maximization and generator peak power tracking will be different. In addition, with the assumption of generator peak power tracking, as in the case of shunt and series motors, system efficiency relative to generator terminals will also be maximized.*

* استادیار ** کارشناسی ارشد

ژنراتور فتوولتایی		جریان نوری ژنراتور فتوولتایی	I_{ph}	برابر با $\frac{Ra}{M_{af}^2 I_f^2}$	A
کل گشتاور اتلافی در موتور - پمپ	T_l	جریان ژنراتور فتوولتایی	I_{pv}	نسبت جریان در مبدل	a
کل گشتاور خروجی موتور DC	T_m	ضریب کار مبدل	K	دیود در مدار معادل ژنراتور فتوولتایی	D_{ph}
گشتاور مفید پمپ	T_p	القابیدگی متقابل آرمیچر و تحریک موتور شنت	M_{af}	جریان آرمیچر موتور DC	I_a
ولتاژ آرمیچر موتور DC	V_a	بازده سیستم نسبت به ترمینالهای ژنراتور فتوولتایی	R	جریان ورودی مبدل	I_{ei}
ولتاژ ورودی مبدل	V_{ci}	مقاومت آرمیچر موتور DC شنت	R_a	جریان خروجی مبدل	I_{co}
ولتاژ خروجی مبدل	V_{co}	مقاومت تحریک موتور DC شنت	R_f	جریان تحریک موتور DC	I_f
ولتاژ ژنراتور فتوولتایی در توان حداکثر	V'_{mp}	مقاومت تحریک موتور DC شنت و تحریک جداگانه	R_{ma}	جریان ژنراتور فتوولتایی در توان حداکثر	I'_{mp}
ولتاژ ژنراتور فتوولتایی معادل در توان حداکثر	V_{pv}	بازده حداکثر سیستم نسبت به ترمینالهای ژنراتور فتوولتایی	R_s	جریان اشباع معکوس ژنراتور فتوولتایی	I_o
ولتاژ گرمایی ژنراتور فتوولتایی	V_T	مقاومت داخلی			
سرعت دورانی در موتور - پمپ	ω				



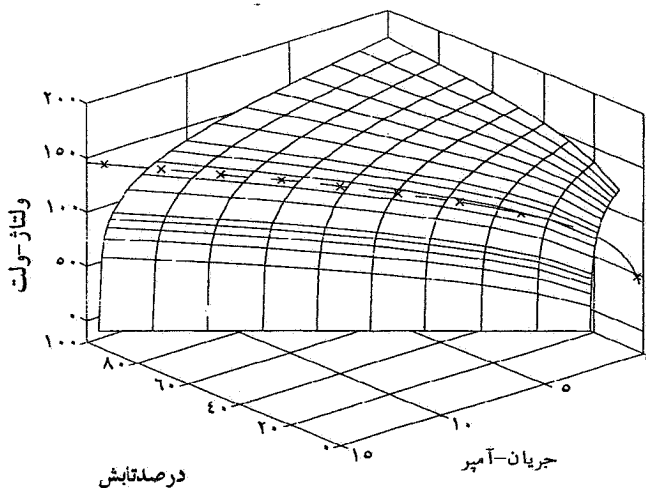
شکل ۱- شماتیک سیستم

ترتیب مبدل همچون یک ردگیر قله توان عمل می‌کند و مشخصه موتور - پمپ را با منحنی توان حداکثر ژنراتور منطبق می‌کند. راه دیگری که در موتور تحریک جداگانه برای بهره‌برداری بهینه وجود دارد، تنظیم جریان تحریک است. در اینجا فرض براین است که تحریک از منبع جریان مستقلی تغذیه می‌شود و مبدل با ضریب کار ثابت همچنان بین ژنراتور و استاتور موتور قرار دارد.

در مرجع [۱] با استفاده از تغییر اتصالات سری - موازی ماژولهای ژنراتور به بهره‌برداری بیشتر از سیستمی متشکل از ژنراتور خورشیدی، باتریهای ذخیره‌کننده انرژی و بار اهمی پرداخته است. مرجع [۲] مطالعه‌ای است در باره مشخصه‌های حالت دائم و راه‌اندازی انواع مختلف موتورهای DC و پمپهای آب که مستقیماً به ژنراتور فتوولتایی متصل شوند. در مرجع [۳] انطباق موتورهای DC با ژنراتور برای حداکثر انرژی مکانیکی ناخالص روزانه و در مرجع [۴] عملکرد بارهایی که با منابع خورشیدی جداگانه یا با یک

۱- مقدمه

هزینه بالای تبدیل انرژی خورشیدی به برق ایجاب می‌کند که استفاده‌کننده بیشترین بهره‌برداری را از ژنراتور فتوولتایی به عمل آورد. برای یک سیستم خورشیدی پمپ‌آب، بهره‌برداری بیشتر به مفهوم دبی و پمپ‌آب بیشتر است که این منظور با سرعت بیشتر موتور - پمپ، در هر سطح تابش میسر می‌شود. برای رسیدن به این هدف یک راه، عوض کردن اتصالات سری - موازی ماژولهای درون آرایه‌ای ژنراتور است. در این صورت مشخصه ژنراتور در هر سطح تابش چنان تغییر می‌یابد که بیشترین سرعت به موتور - پمپ داده شود. مشکل عمده این روش احتیاج به یک ژنراتور خورشیدی با قابلیت بالا در تغییر ساختار است. مسئله دیگر آن ناپیوستگی و وجود سطحهای کوانتیده در گرفتن سرعت حداکثر برحسب تغییرات تابش است. راه بهتر در بهره‌برداری بهینه از چنین سیستمی استفاده از یک مبدل DC/DC به عنوان واسطه‌ای بین موتور - پمپ و ژنراتور خورشیدی است (شکل ۱)، تا با کنترل ضریب کار مبدل، سرعت موتور - پمپ در هر تابشی حداکثر شود. در بخشهای آتی ثابت می‌شود هنگامی که موتور از نوع تحریک جداگانه با جریان تحریک ثابت یا شنت یا سری باشد، مفهومهای بهره‌برداری بهینه و کشیدن توان حداکثر از ژنراتور معادل خواهند شد. به این



شکل ۳- مشخصه ژنراتور فتوولتایی و منحنی توان حداکثر: x-

$$V_{pv} = V_T \ln \left[\frac{I_{ph} - I_{pv}}{I_0} + 1 \right] - R_s I_{pv} \quad (1)$$

I_{ph} به نام جریان نوری متناسب با مقدار تابش نور بر ژنراتور است و مقدار آن برای ۱۰۰٪ تابش معادل با 1 Kw/m^2 جز پارامترهای ژنراتور خورشیدی است. شکل (۳) مشخصه $V-I$ ژنراتور مورد بحث در این مقاله را همراه با منحنی توان حداکثرش که از رابطه (۲) به دست می‌آید نشان می‌دهد.

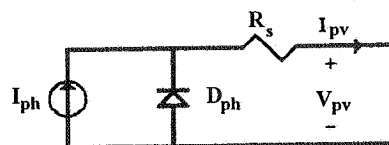
$$\frac{d(v_{pv} I_{pv})}{d I_{pv}} = V_T \left[\ln \left[\frac{I_{ph} - I_{mp}}{I_0} + 1 \right] - \frac{I_{mp}}{I_{ph} + I_0 - I_{mp}} \right] - \eta R_s I_{mp} = 0 \quad (2)$$

$$I_{pv} = I_{mp}$$

$$V_{pv} = V_{mp}$$

۳- مشخصه‌های ورودی - خروجی مبدلها

مبدلها در DC مشابه با ترانسفورماتورها، در توان ثابت سطح جریان و ولتاژ را طبق رابطهای (۳) و (۴) تغییر می‌دهند. بسته به نوع تغییری که مبدل در سطح ولتاژ ایجاد می‌کند سه نوع مبدل کاهنده، افزایشده و کاک داریم. در دو نوع اول تغییر سطح ولتاژ خروجی نسبت به ورودی همواره در یک جهت به ترتیب یا کاهش یا افزایش میسر است. ولی در نوع کاک می‌توانیم سطح ولتاژ



شکل ۲- مدار معادل ژنراتور فتوولتایی

منبع مشترک تغذیه شوند، مورد بحث قرار گرفته است. مرجع [۵] رفتار موتورهای DC مغناطیس دائم که پمپهای مختلفی را به گردش درمی‌آورند و با ژنراتور مشترکی تغذیه می‌شوند مورد تحقیق قرار داده است.

در مراجع [۶] و [۷] از یک مبدل افزایشده به عنوان ردگیر قله توان برای تغذیه یک موتور - پمپ DC شنت از ژنراتور خورشیدی استفاده شده است ولی در هر دو تناقض و اشتباهات فاحشی وجود دارد، از جمله اینکه سرعت در تاریکی حداکثر است و با افزایش تابش کاهش می‌یابد!

در مرجع [۸] سعی شده است علاوه بر ارائه تحلیل درستی از سیستم مذکور در [۶] و [۷]، اثر مبدلهای مختلف در رفتار حالت دائم نیز مطالعه شود. مرجع [۹] نیز از سیستمی مشابه با سیستم مفروض در [۶] و [۷] استفاده کرده است جز اینکه موتور از نوع تحریک جداگانه است. این مرجع با در نظر گرفتن مبدل به صورت مداری خاص، معادلات دینامیکی درایو DC را به دست آورده و با ارائه نتایج آزمایش عملی و شبیه‌سازی برای منبع DC ثابت و گشتاور بار ثابت صحت معادلات را نشان داده است. در انتها نیز یک روش نظری برای کنترل ضریب کار مبدل برای کشیدن توان حداکثر از ژنراتور ارائه شده است.

مقاله حاضر در ادامه و تکمیل کار مرجع [۸] است و سعی شده است تا برخلاف موارد مشابه (مانند [۶]، [۷] و [۹] که سیستم را در حالت خاص در نظر گرفته‌اند و بعضاً عاری از اشتباه نیستند کاملترین تحلیل برای بهره‌وری سیستم ژنراتور خورشیدی، مبدل و موتور - پمپ DC داده شود.

۲- مشخصه ژنراتور فتوولتایی

شکل (۲) و رابطه (۱) به عنوان مدل مناسبی برای تحلیل معمول ژنراتور خورشیدی در اختیار قرار می‌گیرند [۱۰ و ۱۱].

حالت موتوری V_a و I_a هر دو مثبت‌اند پس باید عبارت داخل پراوتر نیز مثبت باشد و از آنجا رابطه (۱۵) حاصل می‌شود. به این معنا که سرعت موتور شنت هیچ‌گاه از R_f / M_{af} بزرگتر نمی‌شود.

$$I_f = \frac{V_a}{R_f} \quad (۱۳)$$

$$V_a \left(1 - \frac{M_{af}}{R_f} \omega\right) = R_a I_a \quad (۱۴)$$

$$\omega < \frac{R_f}{M_{af}} \quad (۱۵)$$

رابطه (۱۶) از ترکیب رابطه‌های (۶)، (۷)، (۱۰)، (۱۲) و (۱۳) به دست می‌آید که دو نکته در آن قابل توجه است: اول، طرف چپ یک تابع اکیداً صعودی از سرعت است، دوم، طرف راست تابعی خطی از توان ژنراتور است.

پس هرچه توان بیشتری از ژنراتور کشیده شود سرعت موتور-پمپ بیشتر خواهد شد و این به مفهوم پمپاژ آب و بهره‌برداری بیشتر است. بیشترین بهره‌برداری در حداکثر طرف راست رابطه (۱۶) یعنی در توان حداکثر ژنراتور - رابطه (۱۷) - حاصل می‌آید.

$$\omega + \frac{0.001}{0.004} \omega^{1/8} = \frac{M_{af}}{R_f} V_{pv} I_{pv} \quad (۱۶)$$

$$\omega + \frac{0.001}{0.004} \omega^{1/8} = \frac{M_{af}}{R_f} V_{mp} I_{mp} \quad (۱۷)$$

با حل دستگاهی متشکل از رابطه‌های (۱۰)، (۱۱)، (۱۲)، (۱۳) و (۱۷) تمام متغیرهای موتور - پمپ شامل ω ، T_m ، I_a و V_a و I_f به دست می‌آید. تنها مجهول باقیمانده، ضریب کار K ، با استفاده از یکی از رابطه‌های (۶) و (۷) و رابطه (۵) قابل محاسبه است. توجه کنید که ضرایب کار منفی و بزرگتر از واحد جزو مجموعه جوابها نیستند. نتایج محاسبات برای سطوح مختلف تابش در شکل‌های (۴) تا (۸) ارائه شده است. چنانچه از روند محاسباتی و شکل‌های به دست آمده مشاهده می‌شود، اگر برای توان تحویلی از ژنراتور به موتور - پمپ تابعی مشخص برحسب سطح تابش در نظر گرفته شود (یعنی طرف راست رابطه (۱۶) برای هر سطح تابش معین باشد مانند حالت بهره‌برداری بهینه و رابطه (۱۷)) متغیرهای موتور از نوع مبدل و ضریب کار آن مستقل خواهند شد. نوع مبدل تنها می‌تواند عملکرد سیستم را به سطوح تابش خاصی محدود کند. ضریب کار نیز نه یک متغیر مستقل بلکه یک متغیر وابسته است.

خروجی را نسبت به ورودی هم کاهش و هم افزایش دهیم. در هر مبدل ضریب کار K ی تعریف می‌شود که همیشه مثبت و کوچکتر از واحد است و طبق رابطه (۵) با نسبت جریان a در ارتباط است.

$$I_{co} = I_{ci} \cdot a \quad (۳)$$

$$V_{co} = V_{ci} / a \quad (۴)$$

$$K = \begin{cases} \frac{1}{a} & \text{مبدل کاهنده} \\ 1-a & \text{مبدل افزایشنده} \\ \frac{1}{1+a} & \text{مبدل کاک} \end{cases} \quad (۵)$$

در مقاله حاضر ورودی مبدل به ژنراتور و خروجی آن به موتور متصل است (شکل ۱) لذا:

$$I_a = I_{pv} \cdot a \quad (۶)$$

$$V_a = V_{pv} / a \quad (۷)$$

۴- مشخصه پمپ و موتور DC

پمپ در نظر گرفته شده از نوع گریز از مرکز است که گشتاور مفیدی مطابق با رابطه (۸) دارد. کل گشتاور اتلافی مجموعه نیز از رابطه (۹) به دست می‌آید. بنابراین موتور باید گشتاور T_m برابر با رابطه (۱۰) را تولید کند.

$$T_p = 0.001 \omega^{1/8} \quad (۸)$$

$$T_1 = 0.05 + 0.004 \omega \quad (۹)$$

$$T_m = T_1 + T_p = 0.05 + 0.004 \omega + 0.001 \omega^{1/8} \quad (۱۰)$$

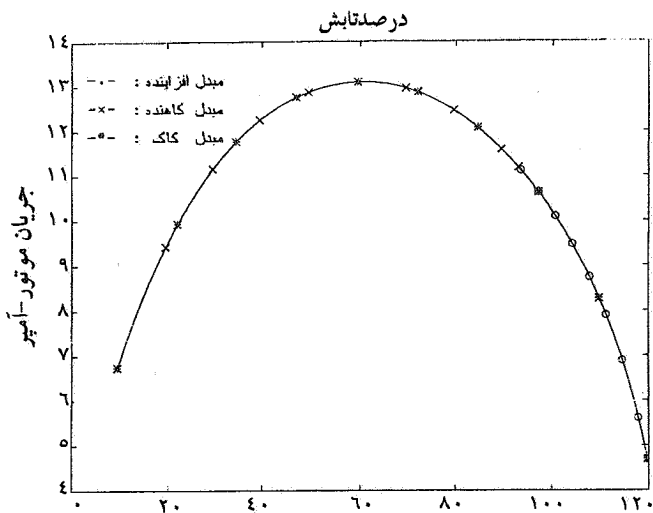
صرف نظر از نوع موتور، در حالت دائم رابطه‌های زیر نیز بین متغیرهای موتور DC برقرار است.

$$V_a = M_{af} I_f \omega + R_a I_a \quad (۱۱)$$

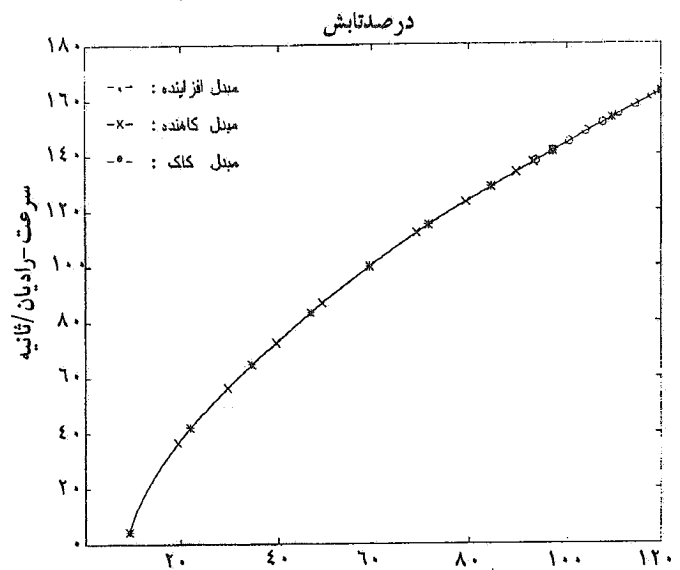
$$T_m = M_{af} I_f I_a \quad (۱۲)$$

۵- مشخصه‌های حالت دائم سیستم با موتور شنت

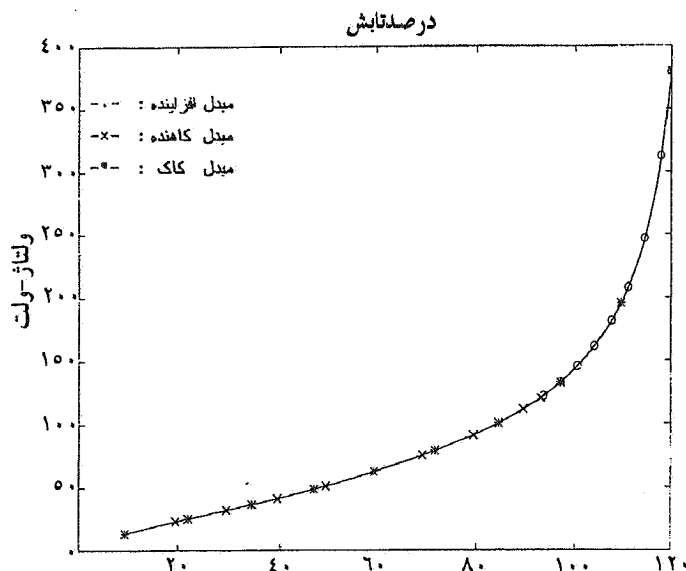
در موتور شنت جریان تحریک از رابطه (۱۳) به دست می‌آید که همراه با رابطه (۱۱) رابطه (۱۴) را نتیجه می‌دهد. در رابطه اخیر در



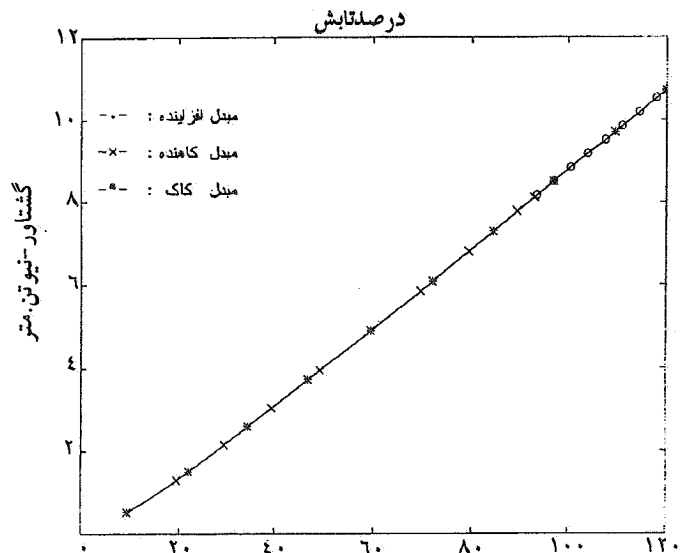
شکل ۶- جریان موتور شنت بر حسب تابش



شکل ۴- سرعت موتور شنت بر حسب تابش



شکل ۷- ولتاژ موتور شنت بر حسب تابش



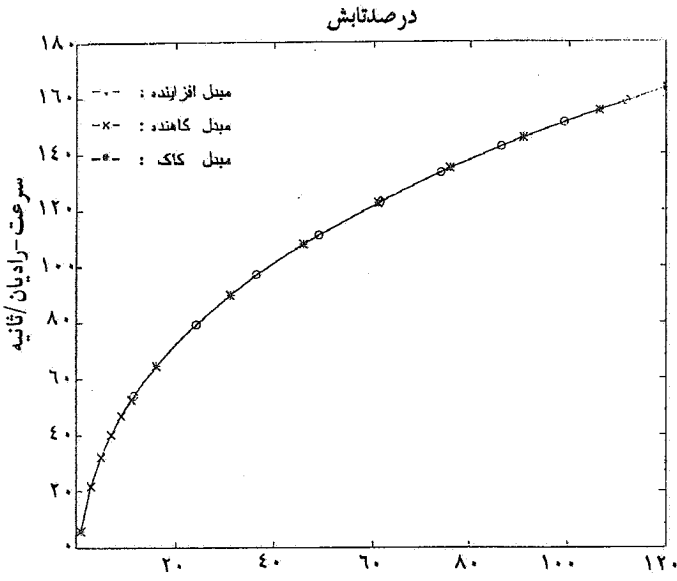
شکل ۵- گشتاور موتور شنت بر حسب تابش

$$R = \frac{\omega T_p}{V_{pv} I_{pv}} = \frac{0.001 M_{af} / R_f \omega^{2/8}}{0.5 + 0.004 \omega + 0.001 \omega^{1/8}} \quad (18)$$

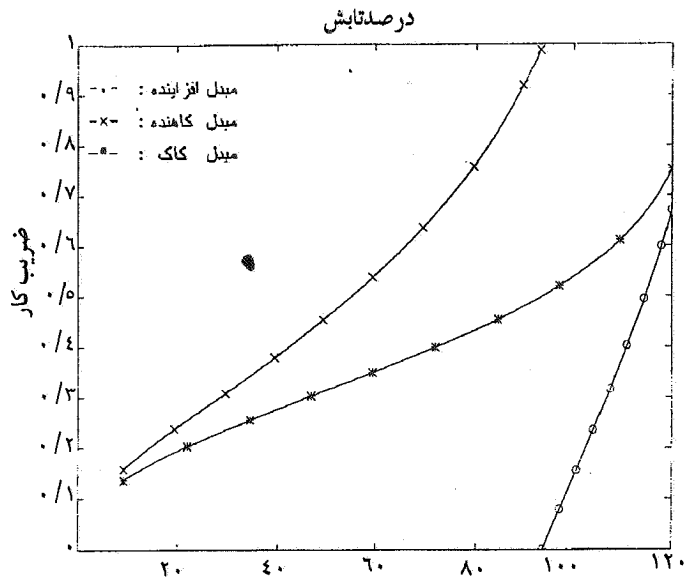
$$R_{max} = \frac{0.001 (R_f / M_{af})^{1/8}}{0.5 + 0.004 R_f / M_{af} + 0.001 (R_f / M_{af})^{1/8}} \quad (19)$$

از شکل‌های (۴) تا (۹) می‌توان دید که مبدل‌های کاهنده و افزایشنده در مجموع مکمل هم هستند و مجموعاً مانند مبدل کاک عمل می‌کنند در حالی که هیچکدام به تنهایی نمی‌تواند به گستردگی مبدل کاک

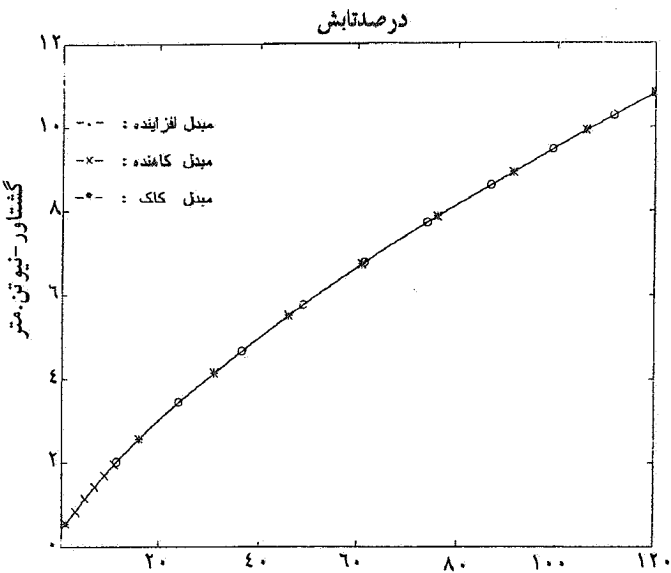
شکل (۹) نیز بازده کل سیستم را نسبت به ترمینال‌های ژنراتور که از رابطه (۱۸) محاسبه می‌شود نشان می‌دهد. طرف راست رابطه اخیر یک تابع اکیداً صعودی نسبت به سرعت است لذا با حداکثر کردن سرعت، بازده نیز حداکثر می‌شود. از طرفی طبق رابطه (۱۵) بازده در هیچ حالتی بیشتر از R_{max} رابطه (۱۹) نخواهد شد که در اینجا 0.9 است.



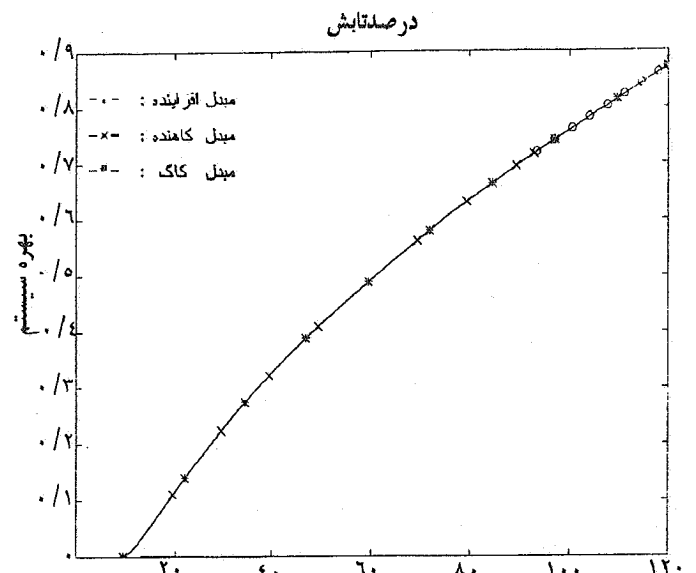
شکل ۱۰- سرعت موتور سری بر حسب تابش



شکل ۸- ضریب کار مبدلها بر حسب تابش برای موتور شنت



شکل ۱۱- گشتاور موتور سری بر حسب تابش



شکل ۹- بهره سیستم بر حسب تابش برای موتور شنت

جریان تحریک و آرمیچر برابرند یعنی

$$I_f = I_a \quad (20)$$

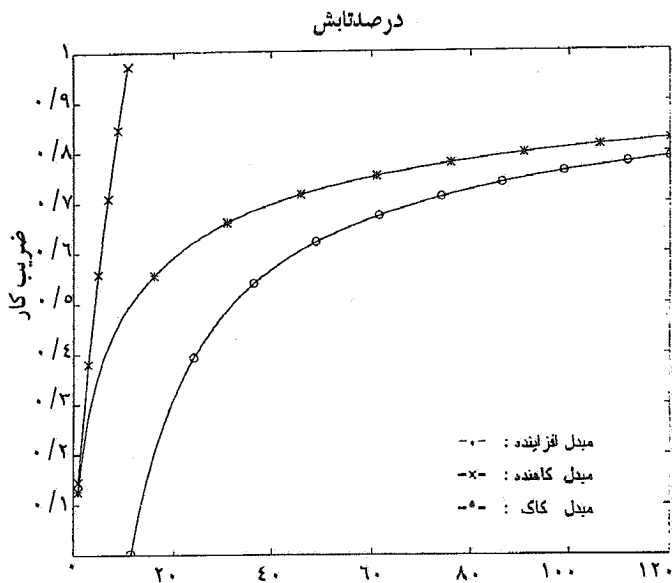
از این لحاظ

$$(0.5 + 0.004\omega + 0.001\omega^2)(M_{af}\omega + R_a) = M_{af} V_{pv} I_{pv} \quad (21)$$

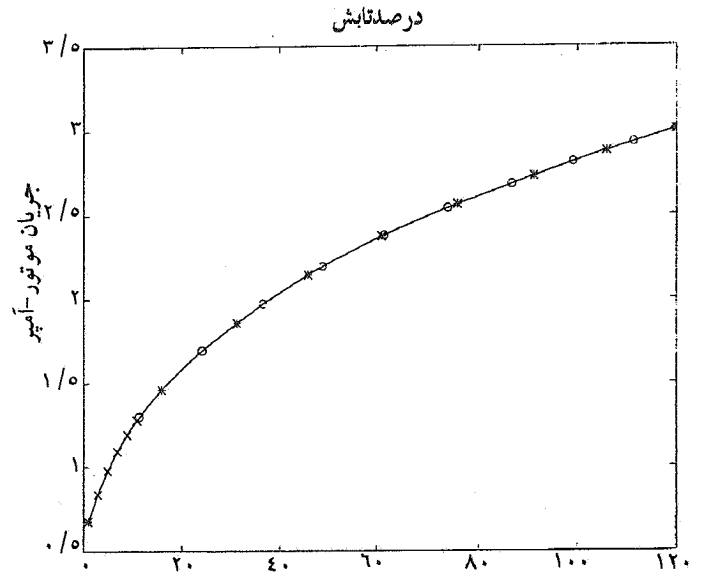
سطوح مختلف تابش را پوشش دهد. لذا مبدل کاک بهترین انتخاب در بین مبدلهاست. مرز مشترک مبدلهای کاهشده و افزایشده نیز در محل تلاقی مشخصه V-I موتور- پمپ با منحنی توان حداکثر ژنراتور قرار دارد.

۶- مشخصه‌های حالت دائم سیستم با موتور سری

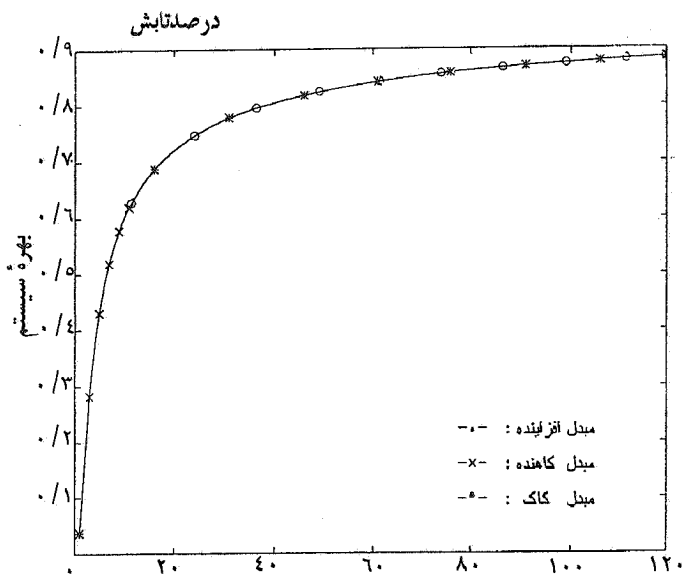
در موتور سری R_a به عنوان مقاومت دوسر ترمینالهای موتور شامل مقاومت تحریک و آرمیچر در نظر گرفته شده است. به علاوه



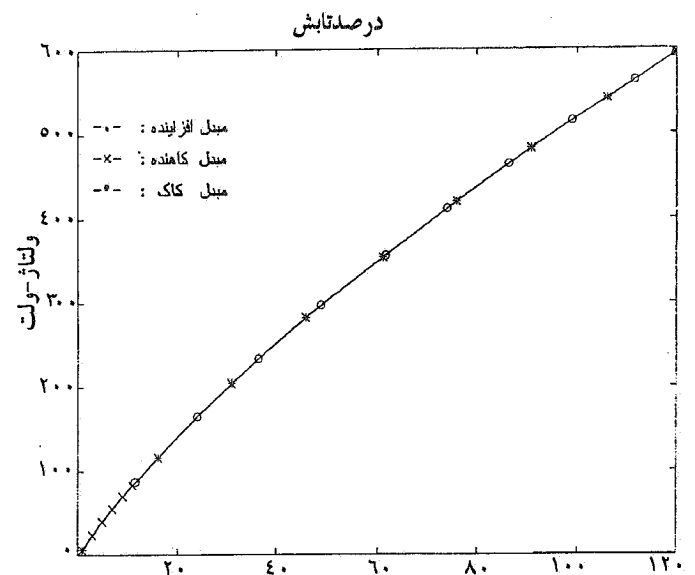
شکل ۱۴- ضریب کار مبدلها برحسب سری برای موتور شنت



شکل ۱۲- جریان موتور سری برحسب تابش



شکل ۱۵- بهره سیستم برحسب تابش برای موتور سری



شکل ۱۳- ولتاژ موتور سری برحسب تابش

تابش را که از دستگاهی شامل رابطه‌های (۱۰)، (۱۱)، (۱۲)، (۲۰) و (۲۲) به دست آمده‌اند نشان می‌دهند. در شکل (۱۴) ضریب کار مبدل‌ها و در شکل (۱۵) نیز بازده که از

که از ترکیب رابطه‌های (۶) و (۷)، (۱۰)، (۱۱)، (۱۲) و (۲۰) به دست آمده است. در رابطه (۲۱) نیز همان نکات مربوط به رابطه (۱۶) برقرار است. پس در موتور سری نیز بیشترین بهره‌برداری در بیشترین توان ژنراتور به دست می‌آید یعنی رابطه (۲۲).

$$R = \frac{\omega T_p}{V_{pv} I_{pv}} = \frac{0.001 M_{af} \omega^{2/8}}{(0.5 + 0.004 \omega + 0.001 \omega^{1/8})(M_{af} \omega + R_a)} \quad (23)$$

محاسبه می‌شود ارائه شده است. نتایج و نکات مذکور در مورد

$$(0.5 + 0.004 \omega + 0.001 \omega^{1/8})(M_{af} \omega + R_a) = M_{af} V_{mp} I_{mp} \quad (22)$$

شکل‌های (۱۰) تا (۱۳) تغییرات متغیرهای موتور - پمپ برحسب

مبدل و ضریب کار آن و بازده سیستم برای موتور شنت در اینجا نیز مصداق دارد.

۷- مشخصه‌های حالت دائم سیستم با موتور تحریک جداگانه

در موتور تحریک جداگانه به دو صورت می‌توان بهره‌برداری را به حداکثر رساند. یکی با استفاده از واسطه مبدل و دیگری با تنظیم جریان تحریک. برای عمومیت بخشیدن به مسئله فرض می‌شود که در حالت دوم نیز مبدل کماکان بین ژنراتور و آرمیچر به کار خود ادامه می‌دهد.

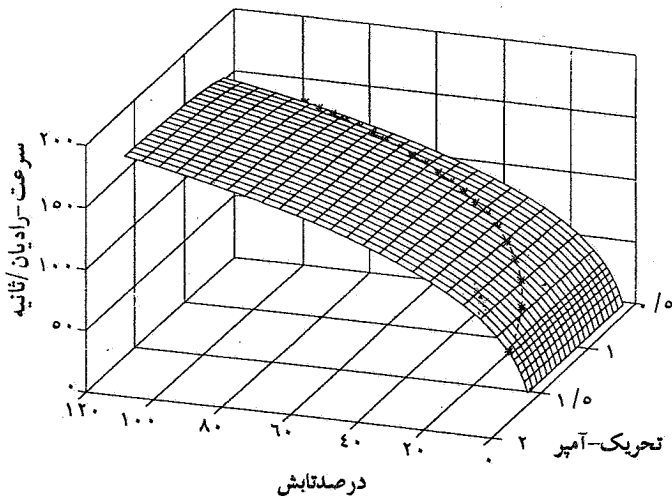
الف) جریان تحریک ثابت و بهره‌برداری بهینه با تنظیم ضریب کار مبدل

با مشخص بودن I_f می‌توان رابطه (۲۴) را به دست آورد که مشابه با رابطه‌های (۱۶) و (۲۲) طرف چپ نسبت به سرعت تابعی اکیداً صعودی و طرف راست تابعی خطی از توان ژنراتور است. پس در اینجا نیز با کشیدن توان حداکثر از ژنراتور، بهره‌برداری حداکثر می‌شود و این یعنی رابطه (۲۵)

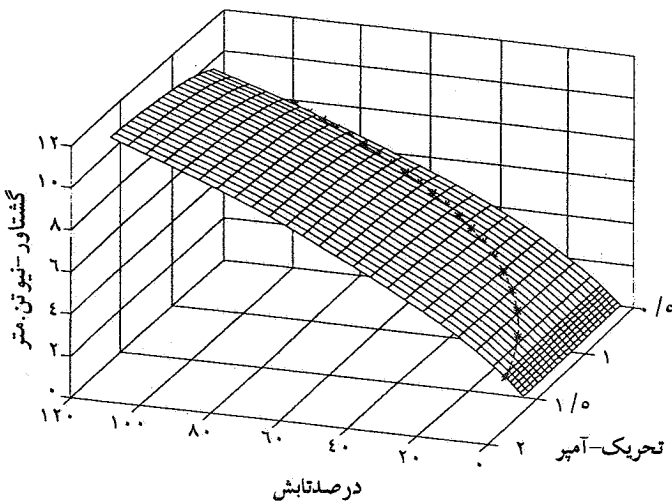
$$\omega(0.5 + 0.004\omega + 0.001\omega^{1/8}) + A(0.5 + 0.004\omega + 0.001\omega^{1/8})^2 = v_{pv} I_{pv} \quad (24)$$

$$\omega(0.5 + 0.004\omega + 0.001\omega^{1/8}) + A(0.5 + 0.004\omega + 0.001\omega^{1/8})^2 = v_{mp} I_{mp} \quad (25)$$

به طریق مشابه با بخشهای پیش و مستقل از مبدل و ضریب کار، متغیرهای موتور قابل محاسبه است. لذا نتایج مذکور در مورد موتور شنت درباره نوع مبدل و ضریب کار آن در این حالت نیز برقرار است به جز اینکه مرز بین مبدل کاهنده و افزایشنده تابعی از جریان تحریک است. در جریان تحریک کوچک این مرز در سطوح تابش بالا قرار دارد و با افزایش تحریک به سطوح تابش پایینتر انتقال می‌یابد. با انتخاب تحریک در مقادیر کوچک یا بزرگ می‌توان



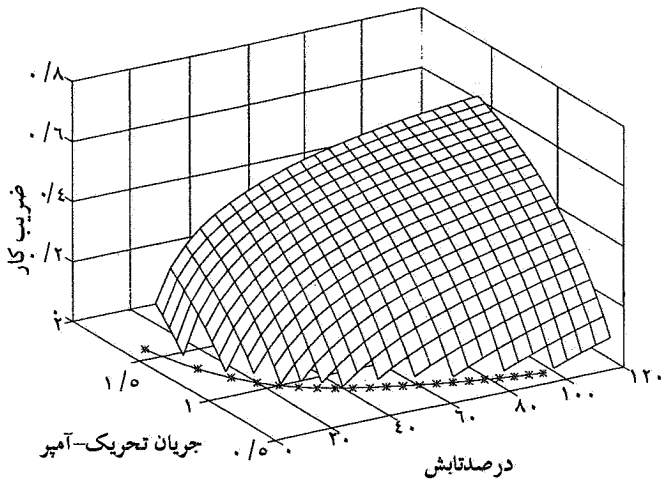
شکل ۱۶- سرعت موتور تحریک جداگانه همراه با مرز مبدلهای افزایشنده و کاهنده: - - -



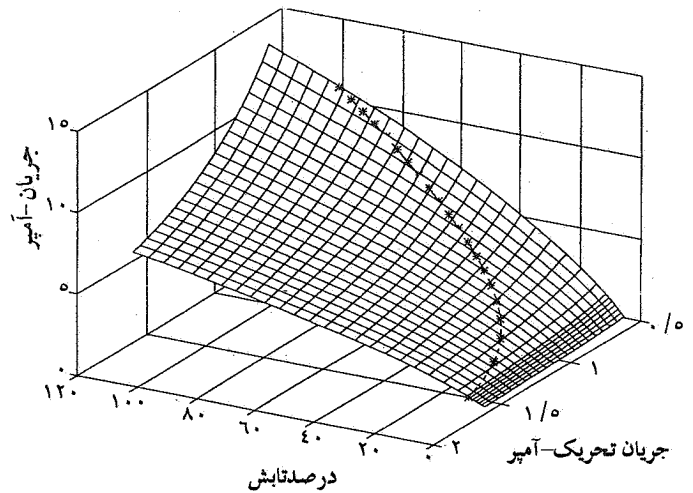
شکل ۱۷- گشتاور موتور تحریک جداگانه همراه با مرز مبدلهای افزایشنده و کاهنده: - - -

به ترتیب با سطوح عملکرد، مبدلهای کاهنده یا افزایشنده را به کل سطوح گسترش داد در حالی که دیگری عملاً در هیچ سطح تابشی کار نکند. شکل‌های (۱۶) تا (۲۰) متغیرهای سیستم را برای مقادیر مختلف تابش و جریان تحریک در انواع مبدلها و شکل‌های (۲۱) بازده را که از رابطه (۲۶) حساب می‌شود ارائه می‌دهند. جز در شکل‌های (۲۰) در این شکلها نیم سطحی که در جهت افزایش تابش قبل از علامت * - * تشکیل می‌شود مربوط به مبدل کاهنده، بعد از آن مربوط به مبدل افزایشنده و در کل مربوط به مبدل کاک است.

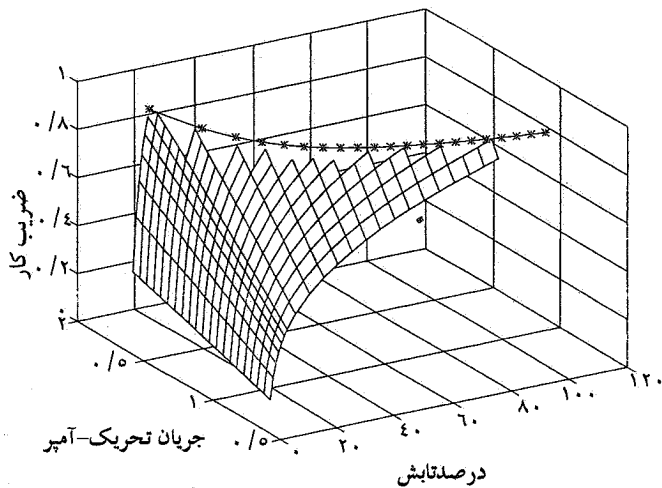
$$R = \frac{\omega T_p}{V_{pv} I_{pv}} = \frac{0.001\omega^{2/8}}{\omega(0.5 + 0.004\omega + 0.001\omega^{1/8}) + A(0.5 + 0.004\omega + 0.001\omega^{1/8})^2} \quad (26)$$



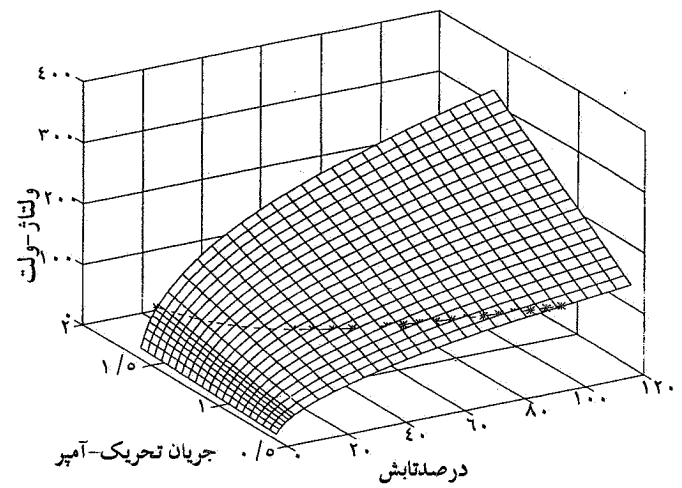
شکل ۲۰- الف ضریب کار مبدل افزایشده در موتور تحریک جداگانه و حد پایین آن: - - -



شکل ۱۸- جریان موتور تحریک جداگانه همراه با مرز مبدلهای افزایشده و کاهنده: - - -



شکل ۲۰- ب ضریب کار مبدل کاهنده در موتور تحریک جداگانه و حد بالای آن: - - -

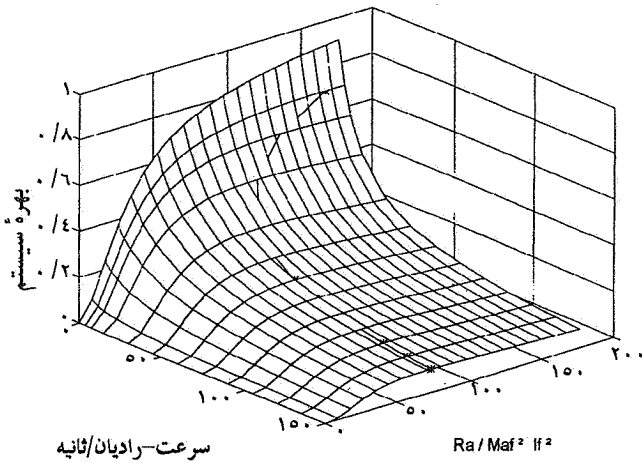


شکل ۱۹- ولتاژ موتور تحریک جداگانه همراه با مرز مبدلهای افزایشده و کاهنده: - - -

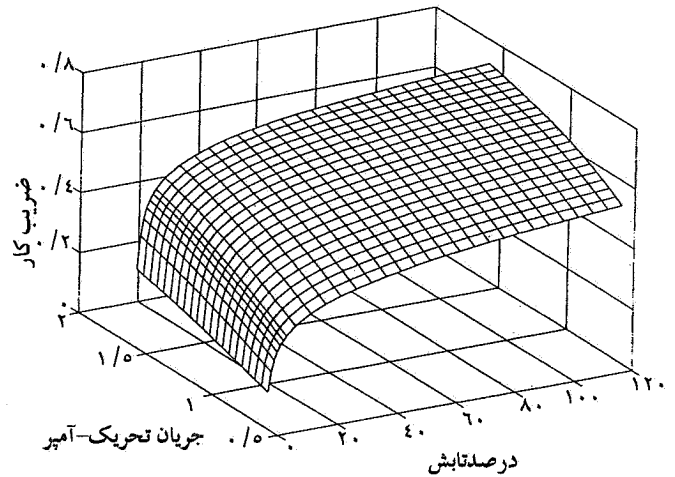
نباشد. در غیر این صورت مشابه با موتورهای شنت و سری باید با حداکثر کردن سرعت، بازده را تا می توان بالا برد. با این حال از شکل (۲۲) می توان دید که کاهش بازده بعد از حداکثرش بسیار آرام صورت می گیرد لذا با فرض حداکثر کردن سرعت، انحراف از بازده حداکثر، زیاد نخواهد بود، اما بایستی تا می توان I_f را بزرگ انتخاب کرد تا حداکثر بازده افزایش یابد. به این صورت این امکان هست که عملاً سطوح عملکرد مبدل کاهنده بسیار محدود و سطوح عملکرد مبدلهای کاک و افزایشده یکسان شود.

در اینجا برخلاف دو موتور پیشین بازده برحسب سرعت اکیداً صعودی نیست. مقدار حداکثر و موقعیت آن نیز به A وابسته است شکل (۲۲). با افزایش A مقدار حداکثر و سرعتی که در آن بازده حداکثر است کاهش می یابد. در حالت ایده آل با صفر بودن A ($R_a \leq M_{af} I_f$) حداکثر بازده یک است و در سرعت بینهایت قرار دارد و با بزرگ کردن A حتی می توان حداکثر بازده و سرعت مربوط به آن را به حدود صفر کاهش داد.

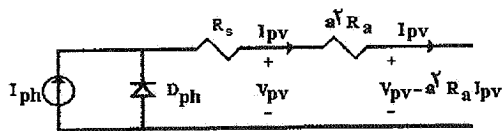
این مسئله باعث می شود تا حداکثر کردن بازده از بهره برداری بهینه منحرف شود. البته این انحراف از هنگامی است که بیشترین سرعت قابل دستیابی، از سرعتی که بازده در آن حداکثر است کمتر



شکل ۲۲- بهره سیستم در موتور تحریک جداگانه حداکثر آن در سرعت ثابت: -



شکل ۲۰- پ ضریب کار مبدل کاک در موتور تحریک جداگانه



شکل ۲۳- مدار معادل ژنراتور فتوولتایی همراه با مقاومت استاتور ارجاع شده به طرف ژنراتور

شکل ۲۳- مدار معادل ژنراتور فتوولتایی همراه با مقاومت استاتور ارجاع شده به طرف ژنراتور

$a^2 R_a$ اضافه شده است. رابطه‌های (۲۸) و (۲۹) ارتباط بین V'_{mp} و I'_{mp} ژنراتور معادل و ولتاژ و جریان ژنراتور اصلی را نشان می‌دهند.

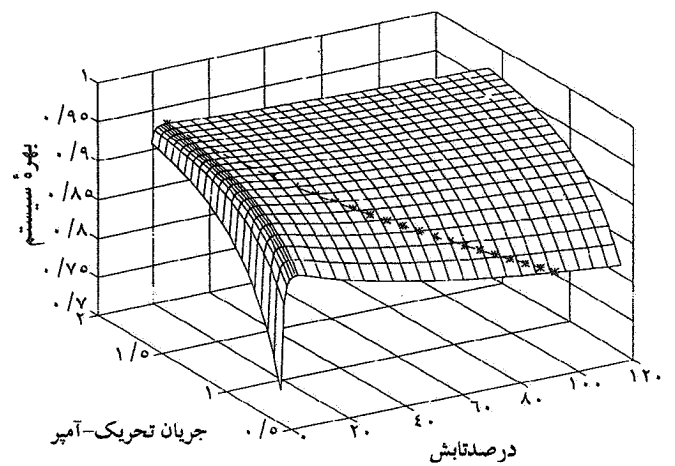
$$\omega (0.05 + 0.004\omega + 0.001\omega^{1/8}) = (V_{pv} - a^2 R_a I_{pv}) I_{pv} \quad (27)$$

$$V_{pv} = V'_{mp} + a^2 R_a I'_{mp} \quad (28)$$

$$I_{pv} = I'_{mp} \quad (29)$$

از دستگاهی متشکل از رابطه‌های (۶)، (۷)، (۱۰)، (۱۱)، (۱۷) تا (۲۹) کلیه متغیرها مشخص می‌شود. صحبت کردن در مورد حداکثر کردن بازده، رابطه (۳۰) و شکل‌های (۲۴)، به سادگی موارد پیش نیست، با این حال آنچه مسلم است با حداکثر کردن سرعت، بازده نسبت به ترمینال‌های ژنراتور معادل هم حداکثر خواهد شد.

$$R = \frac{\omega T_p}{V_{pv} I_{pv}} = \frac{0.001\omega^{2/8}}{\omega (0.05 + 0.004\omega + 0.001\omega^{1/8}) + a^2 R_a I_{pv}} \quad (30)$$



شکل ۲۱- بهره سیستم در موتور تحریک جداگانه همراه با مرز مبدل‌های افزایشنده و کاهشنده: -

ب) ضریب کار مبدل ثابت و بهره‌برداری بهینه با تنظیم جریان تحریک

با مشخص بودن K و در نتیجه a از رابطه‌های (۶)، (۷)، (۱۱) و (۱۲) می‌توان رابطه (۲۷) را به دست آورد که طرف چپ آن تابعی اکیداً صعودی از سرعت است. لذا برای بهره‌برداری بهینه باید طرف راست را که با توان خروجی شکل (۲۳) قابل نمایش است حداکثر کرد. شکل (۲۳) این مفهوم را می‌رساند که $a^2 R_a$ مقاومت آرمیچر است که از طرف موتور به طرف ژنراتور ارجاع و به طور مجازی جزو مقاومت داخلی ژنراتور حساب شود. به این ترتیب در اینجا نیز بهره‌برداری بهینه به معنای کشیدن توان حداکثر از ژنراتور معادلی است که تنها مقاومت داخلی آن نسبت به ژنراتور اصلی به اندازه

۸- نتایج

(۱) در موتورهای تحریک جداگانه با تحریک ثابت، شنت و سری اگر بهره‌برداری بیشتر (سرعت و پمپاژ آب بیشتر) با تنظیم ضریب کار مبدل صورت گیرد، دو مفهوم بهره‌برداری حداکثر و کشیدن حداکثر توان از ژنراتور PV معادل خواهند شد. اضافه بر این در موتورهای شنت و سری و در بیشتر حالات موتور تحریک جداگانه با تحریک ثابت با کشیدن توان حداکثر از ژنراتور PV بازده سیستم نسبت به ترمینالهای ژنراتور نیز حداکثر می‌شود. برای بالا بردن بازده در مورد آخر بایستی تا می‌توان تحریک را افزایش داد

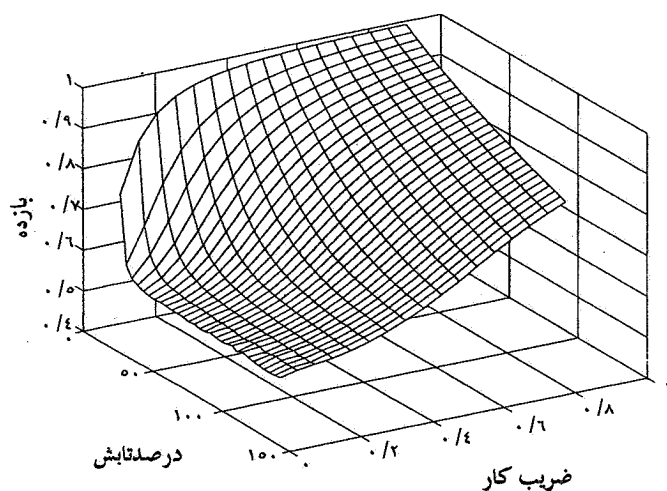
(۲) در بهره‌برداری حداکثر در موتورهای تحریک جداگانه با تحریک ثابت، شنت و سری متغیرهای موتور مستقل از مبدل و ضریب کار آن عمل می‌کنند. نوع مبدل تنها عملکرد سیستم را به سطوح تابش خاصی محدود می‌کند و ضریب کار در اینجا نه یک متغیر مستقل بلکه متغیری وابسته است.

(۳) برای بهره‌برداری حداکثر، بهترین انتخاب در بین مبدلها مبدل کاک است که به تنهایی تمام سطوح تابش را پوشش می‌دهد. دو مبدل دیگر تنها در قسمتی خاص عمل می‌کنند که مرز مشترکشان در تلاقی مشخصه V-I موتور-پمپ با منحنی توان حداکثر ژنراتور قرار دارد. در موتور تحریک جداگانه می‌توان این مرز را جابه‌جا کرد. در جریان تحریک کوچک مرز در سطوح تابش بالا قرار دارد که با افزایش تحریک به سطوح تابش پایینتر انتقال می‌یابد.

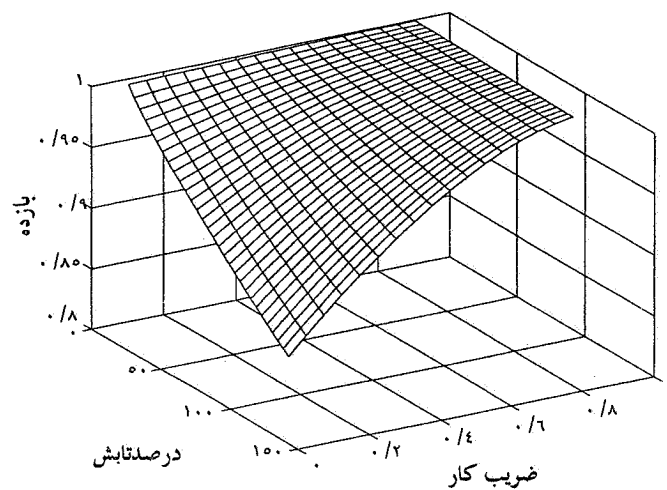
(۴) در موتور تحریک جداگانه با ضریب کار ثابت مقاومت استاتور ارجاع شده به طرف ژنراتور باعث انحراف بهره‌برداری بهینه از کشیدن توان حداکثر ژنراتور است. اما می‌توان ژنراتور PV معادلی که نسبت به ژنراتور اصلی تنها مقاومت داخلی آن به اندازه $a^2 R_a$ اضافه شده است در نظر گرفت که با کشیدن توان حداکثر از این ژنراتور بهره‌برداری بهینه حاصل می‌شود. به علاوه، بازده سیستم نسبت به ترمینالهای این ژنراتور معادل نیز حداکثر خواهد بود.

مراجع

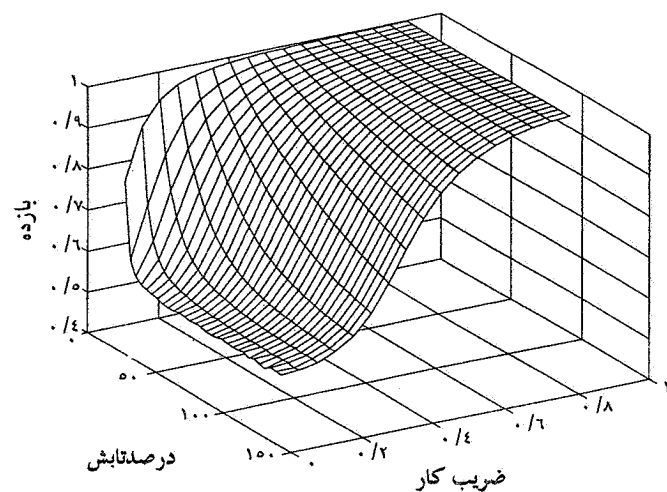
1. Zinger, Z., and Braunstein, A., "Dynamic Matching of a Solar-Electrical (Photovoltaic) System: an Estimation of the Minimum Requirements on the Matching System," *IEEE Transaction on Power Apparatus and Systems*, Vol. PAS-100, NO. 3, pp.



شکل ۲۴- الف بازده سیستم در مبدل افزایشده



شکل ۲۴- ب بازده سیستم در مبدل کاهشده



شکل ۲۴- پ بازده سیستم در مبدل کاک

- 1189-1192, March 1981.
2. Appelbaum, J., "Starting and Steady - State Characteristics of Motors Powered by Solar Cell Generators, " *IEEE Transaction on Energy Conversion*, Vol. EC-1, No.1, pp. 17-25 March 1986.
 3. Saied, M. M., "Matching of DC Motors to Photovoltaic Generators for Maximum Daily Gross Mechanical Energy," *IEEE Transaction on Energy Conversion*, Vol. 3, No. 3, pp. 465-472, September, 1988.
 4. Appelbaum, J., "The Operation of Loads Powered by Separate Sources or by a Common Source of Solar Cells," *IEEE Transaction on Energy Conversion*, Vol. EC-4, No. 3, pp. 351-357 September, 1989.
 5. Appelbaum, J., and Sarma, M.S., "The Operation of Permanent Magenet DC Motors Powered by a Common Source of Solar Cells," *IEEE Transaction on Energy Conversion*, Vol. EC-4, No. 4, pp. 635-642, December 1989.
 6. Alghuwainem, S. M., "Steady-State Performance of DC Motors Supplied from Photovoltaic Generators with Step-up Converter," *IEEE Transaction on Energy Conversion*, Vol. 7, No. 2, pp. 267-272, June 1992.
 7. Alghuwainem, S. M., "Matching of a DC Motor to a Photovoltaic Generator Using a Step-up Converter with a Current-Locked Loop," *IEEE Transaction on Energy Conversion*, Vol. 9, No. 1, pp. 192-197, March 1994.
 8. فرهمند، ف.، نیک خواجه‌ئی، ح. و سقائیان نژاد، س. م.، "پیش‌بینی مشخصه‌های عملکرد حالت دائمی درایو موتور DC تغذیه شده از ژنراتور فتوولتایی،" مجموعه مقالات قدرت سومین کنفرانس مهندسی برق ایران، اردیبهشت ۷۴، ص ۳۷-۴۲.
 9. Shokrolla, S. S., Twieg, N. T., and Sharaf, A.M., "A Photovoltaic Powered Separately Excited DC Motor Drive for Rural/Desert Pump Irrigation," *IEE Sixth International Conference on Electrical Machines and Drives*, pp. 406-411 September, 1993.
 10. Green, M. A., *Solar Cells Operating Principles: Technology and System Application*, Prentice-Hall, 1982.
 11. Hu, C., and White, R. M., *Solar Cells From Basic to Advanced Systems*, Mc Graw-Hill, 1983.