پیش بینی مشخصه های حالت دائم سیستم فتوولتایی پمپاژ آب

سیدمرتضی سقائیان نژاد* و فرزادفرهمند**
دانشکدهٔ مهندسی برق و کامپیوتر، دانشگاه صنعتی اصفهان
(دریافت مقاله: ۱۳۷۴/۹/۱۸ - دریافت نسخهٔنهایی: ۱۳۷۵/۵/۹)

چکیده – *در این مقاله مشخصه‌های عملکرد حالت دائم موتورهای DC مختلف (شنت، سری و تحریک جداگانه) پیش بینی می‌شود که به یک پمپ گریز از مرکز متصل بوده که از طریق یک مبدل کاهنده یا افزاینده یا کاک از ژنراتور فتو ولتایی (خورشیدی) تغذیه می‌شود. فرض بر این است که از باتریهای ذخیره‌کنندهٔ انرژی استفاده نمی‌شود و لازم است بیشترین بهره‌برداری از سیستم به عمل آید. به عبارت دیگر با حداکثر کردن سرعت، بیشترین آب پمپاژ شود. ثابت می‌شود اگر بیشترین بهره‌برداری با تنظیم ضریب کار مبدل صورت پذیرد مفهومهای بیشترین بهره‌برداری و کشیدن توان حداکثراز 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 بهره‌برداری حداکثر با تنظیم جریان تحریک به‌دست می‌آید، دو مفهوم متمایز می‌شوند. اضافه بر این در موتورهای سری و شنت 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 thes 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 cuk 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

فهرست علائم

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

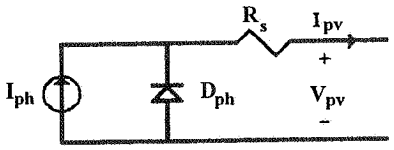
۱- مقدمه

هزینهٔ بالای تبدیل انرژی خورشیدی به برق ایجاب می کند که استفاده‌کننده بیشترین بهره‌برداری را از ژنراتور فتوولتایی به عمل آورد. برای یک سیستم خورشیدی پمپاژ آب، بهره‌برداری بیشتر به مفهوم دبی و پمپاژ آب بیشتر است که این منظور با سرعت بیشتر موتور - پمپ، در هر سطح تابش میسر می شود. 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 عمدهٔ این روش احتیاج به یک ژنراتور خورشیدی با قابلیت بالا در تغییر ساختار است. مسئلهٔ 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 هنگامی‌که 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 ۱- شماتیک سیستم

ترتیب مبدل همچون یک ردگیر قلهٔ توان عمل می‌کند و مشخصهٔ 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 موتورقرار دارد.

در مرجع [۱] با استفاده از تغییر اتصالات سری - موازی ماژولهای ژنراتور به بهره‌برداری بیشتر از سیستمی متشکل از ژنراتور خورشیدی، باتریهای ذخیره‌کنندهٔ انرژی و بار اهمی پرداخته است. مرجع [۲] مطالعه ای‌ست در بارهٔ 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



شکل ۲- مدار معادل ژنراتور فتوولتایی

منبع مشترک تغذیه‌شوند، موردبحث 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.

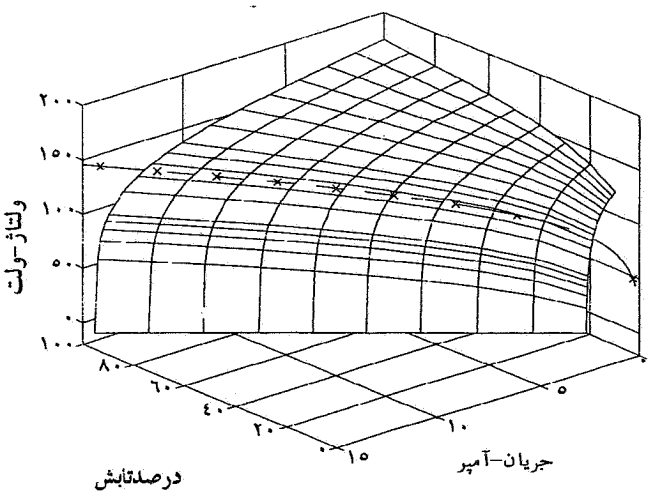
در مراجع [۶ و ۷] از یک مبدل افزاینده به عنوان ردگیر قلهٔ توان برای تغذیه یک موتور ـ پمپ DC شنت از ژنراتور خورشیدی استفاده شده است ولی در هر دو تناقض و اشتباهات فاحشی وجود دارد، از جمله اینکه سرعت در تاریکی حداکثر است و با افزایش تابش کاهش می‌یابد!

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 درنظر گرفتن مبدل به صورت مداری خاص، معادلات دینامیکی درایو DC را به دست آورده و با ارائهٔ 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.

مقالهٔ 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 ـ پمپ DC داده شود.

۲ـ مشخصه ژنراتور فتوولتایی

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



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

$$V_{pv} = V_T \, Ln\left[\frac{I_{ph} - I_{pv}}{I_\circ} + 1\right] - R_s I_{pv} \qquad (1)$$

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

$$\frac{d(v_{pv} I_{pv})}{d\, I_{pv}} = V_T \left[Ln\left[\frac{I_{ph} - I_{mp}}{I_\circ} + 1\right] - \frac{I_{mp}}{I_{ph} + I_\circ - I_{mp}}\right] - 2R_s I_{mp} = 0 \qquad (2)$$

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

۳ـ مشخصه‌های ورودی ـ 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، افزاینده 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

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

$$I_{co} = I_{ci} \cdot a \qquad (۳)$$

$$V_{co} = V_{ci} / a \qquad (۴)$$

$$K = \begin{cases} \frac{۱}{a} & \text{مبدل کاهنده} \\ ۱-a & \text{مبدل افزاینده} \\ \frac{۱}{۱+a} & \text{مبدل کاک} \end{cases} \qquad (۵)$$

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

$$I_a = I_{pv} \cdot a \qquad (۶)$$

$$V_a = V_{pv} / a \qquad (۷)$$

۴ـ مشخصهٔ پمپ و موتور DC

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

$$T_p = ۰/۰۰۱ \omega^{۱/۸} \qquad (۸)$$

$$T_l = ۰/۵ + ۰/۰۰۴ \omega \qquad (۹)$$

$$T_m = T_l + T_p = ۰/۵ + ۰/۰۰۴ \omega + ۰/۰۰۱ \omega^{۱/۸} \qquad (۱۰)$$

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

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

$$T_m = M_{af} I_f I_a \qquad (۱۲)$$

۵ـ مشخصه‌های حالت دائم سیستم با موتور شنت

در موتور شنت جریان تحریک از رابطهٔ (۱۳) به دست می‌آید که همراه با رابطهٔ (۱۱) رابطهٔ (۱۴) را نتیجه می‌دهد. در رابطهٔ اخیر در حالت موتوری V_a و I_a هر دو مثبت‌اند پس باید عبارت داخل پرانتز نیز مثبت باشد و از آنجا رابطهٔ (۱۵) حاصل می‌شود. به این معنا که سرعت موتور شنت هیچ گاه از R_f / M_{af} بزرگتر نمی‌شود.

$$I_f = \frac{V_a}{R_f} \qquad (۱۳)$$

$$V_a \left(۱ - \frac{M_{af}}{R_f} \omega\right) = R_a I_a \qquad (۱۴)$$

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

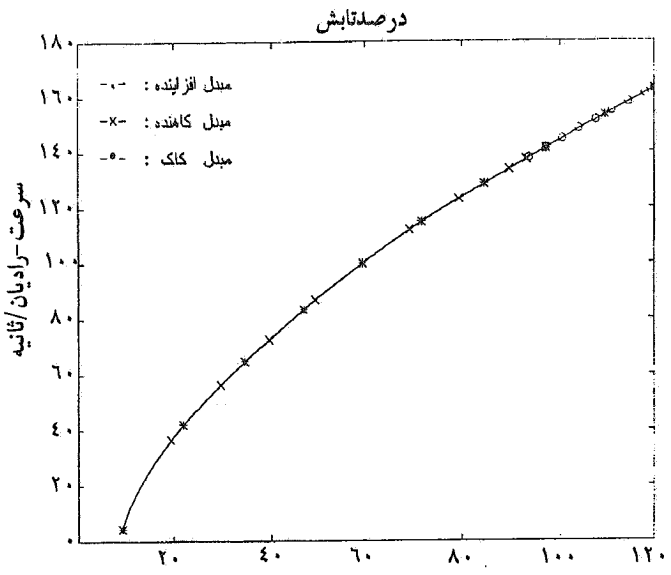
رابطهٔ (۱۶) از ترکیب رابطه های (۶)، (۷)، (۱۰)، (۱۲) و (۱۳) به دست می‌آید که دو نکته در آن قابل توجه است: اول، طرف چپ یک تابع اکیداً صعودی از سرعت است، دوم، طرف راست تابعی خطی از توان ژنراتور است.

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

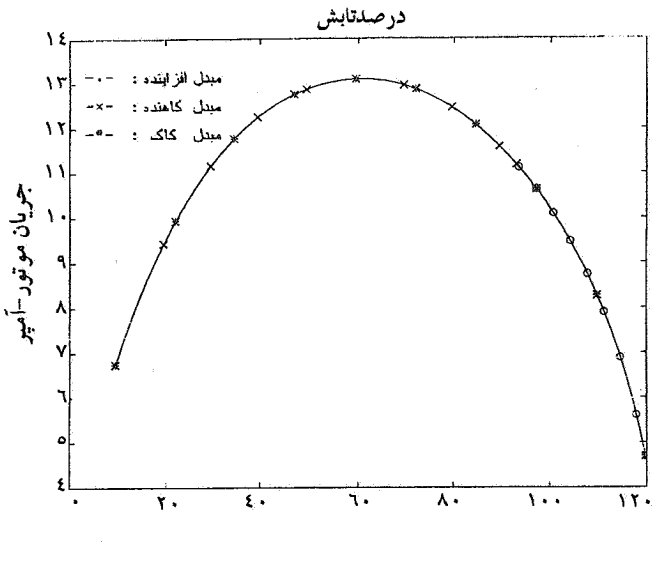
$$۰/۵ + ۰/۰۰۴ \omega + ۰/۰۰۱ \omega^{۱/۸} = \frac{M_{af}}{R_f} V_{pv} I_{pv} \qquad (۱۶)$$

$$۰/۵ + ۰/۰۰۴ \omega + ۰/۰۰۱ \omega^{۱/۸} = \frac{M_{af}}{R_f} V_{mp} I_{mp} \qquad (۱۷)$$

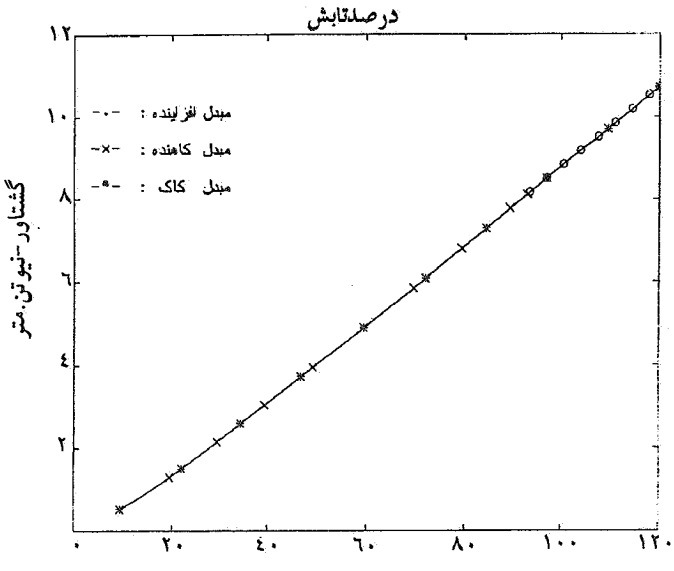
با حل دستگاهی متشکل از رابطه‌های (۱۰)، (۱۱)، (۱۲)، (۱۳) و (۱۷) تمام متغیرهای موتور ـ پمپ شامل ω، T_m، I_a، V_a و I_f به‌دست می‌آید. تنها مجهول باقیمانده، ضریب کار K، با استفاده از یکی از رابطه‌های (۶) و (۷) و رابطهٔ (۵) قابل محاسبه است. توجه کنید که ضرایب کار منفی و بزرگتر از واحد جزو مجموعهٔ جوابها 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 ـ پمپ تابعی مشخص برحسب سطح تابش در نظر گرفته شود (یعنی طرف راست رابطهٔ (۱۶) برای هر سطح تابش معین باشد مانند حالت بهره‌برداری بهینه و رابطهٔ (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.



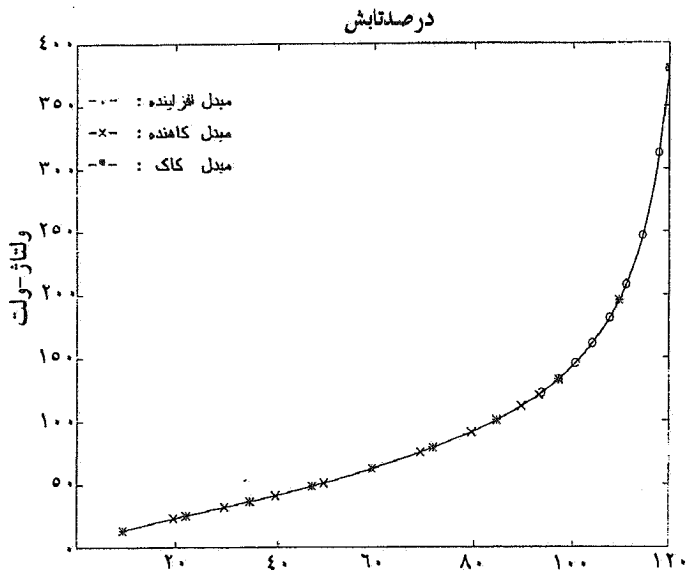
شکل ۴- سرعت موتورشنت برحسب تابش



شکل ۶- جریان موتور شنت برحسب تابش



شکل ۵- گشتاور موتور شنت برحسب تابش



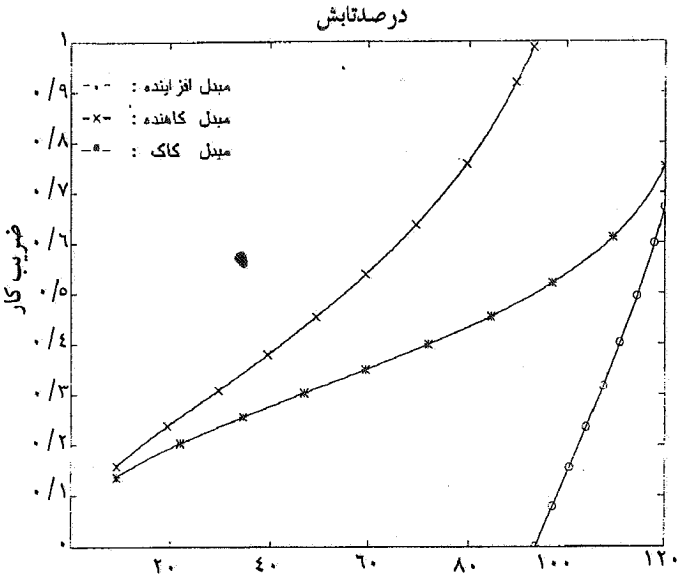
شکل ۷- ولتاژ موتور شنت برحسب تابش

شکل (۹) نیز بازده کل سیستم را نسبت به ترمینالهای ژنراتور که از رابطهٔ (۱۸) محاسبه می‌شود نشان می‌دهد. طرف راست رابطهٔ اخیر یک تابع اکیداً صعودی نسبت به سرعت است لذا با حداکثر کردن سرعت، بازده نیز حداکثر می‌شود. از طرفی طبق رابطهٔ (۱۵) بازده در هیچ حالتی بیشتر از R_{max} رابطهٔ (۱۹) نخواهد شد که در اینجا ۰/۹ است.

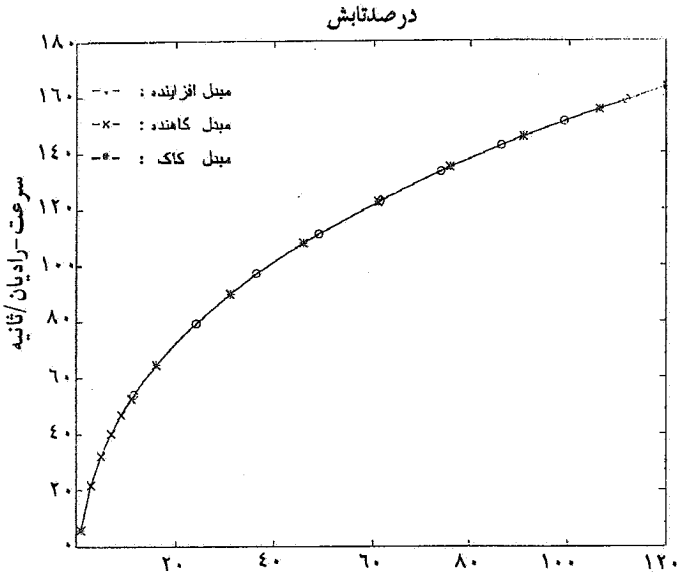
$$R=\frac{\omega T_p}{V_{pv} I_{pv}}=\frac{0/001 M_{af}/R_f \omega^{2/8}}{0/5+0/004\omega+0/001\omega^{1/8}} \qquad (18)$$

$$R_{max}=\frac{0/001(R_f/M_{af})^{1/8}}{0/5+0/004 R_f/M_{af}+0/001(R_f/M_{af})^{1/8}} \qquad (19)$$

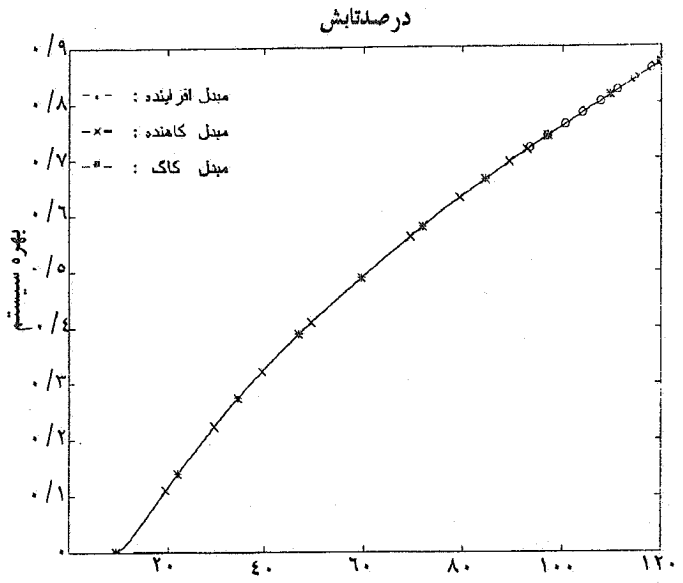
از شکلهای (۴) تا (۹) می‌توان دید که مبدلهای کاهنده و افزاینده در مجموع مکمل هم هستند و مجموعاً مانند مبدل کاک عمل می‌کنند در حالی که هیچکدام به تنهایی نمی‌تواند به گستردگی مبدل کاک



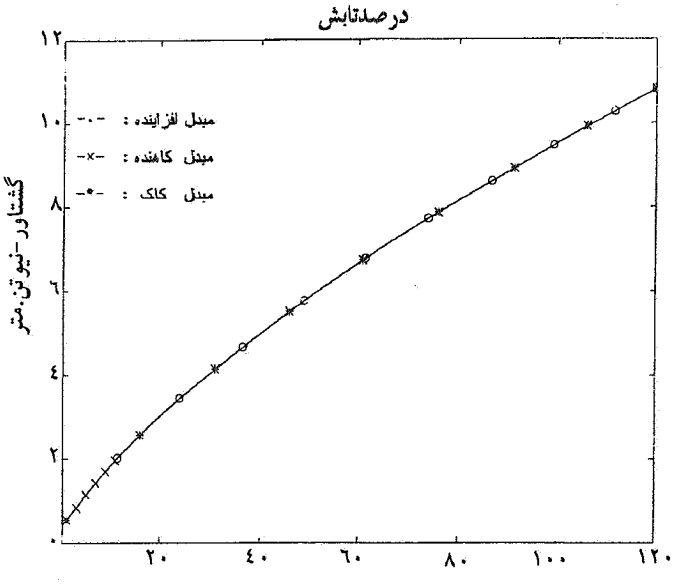
شکل ۸- ضریب کار مبدلها برحسب تابش برای موتور شنت



شکل ۱۰- سرعت موتورسری برحسب تابش



شکل ۹- بهره سیستم برحسب تابش برای موتور شنت



شکل ۱۱- گشتاور موتورسری برحسب تابش

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

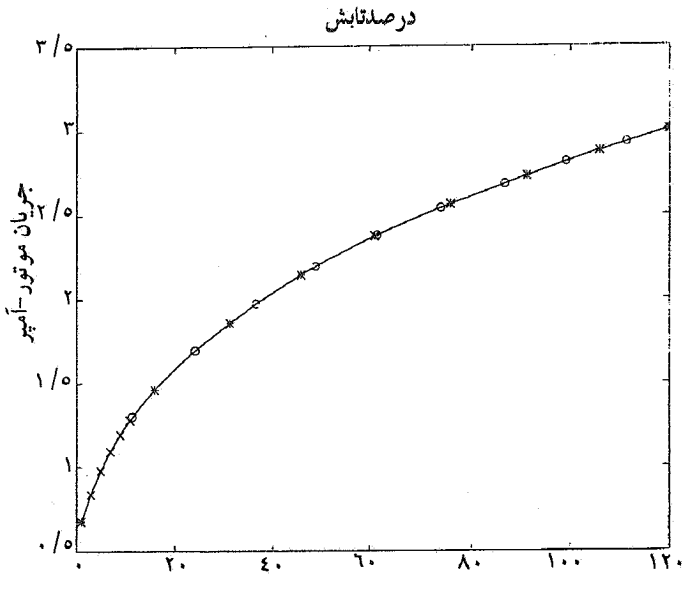
۶- مشخصه‌های حالت دائم سیستم با موتور سری

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

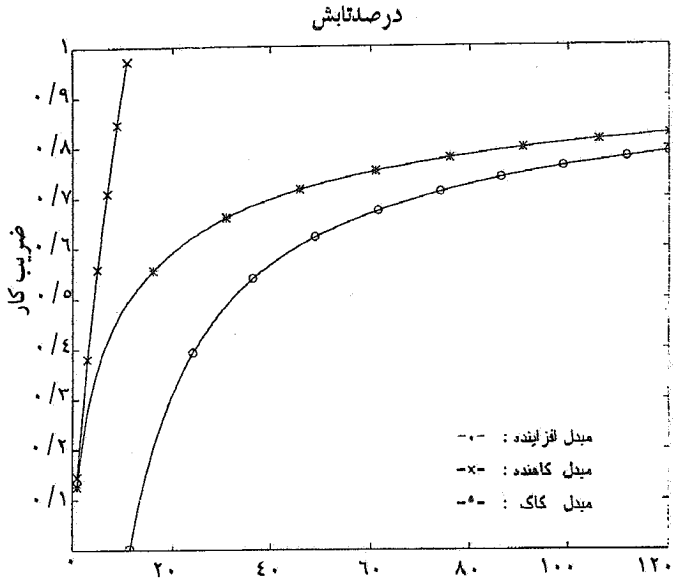
$$I_f = I_a \qquad (۲۰)$$

از این لحاظ

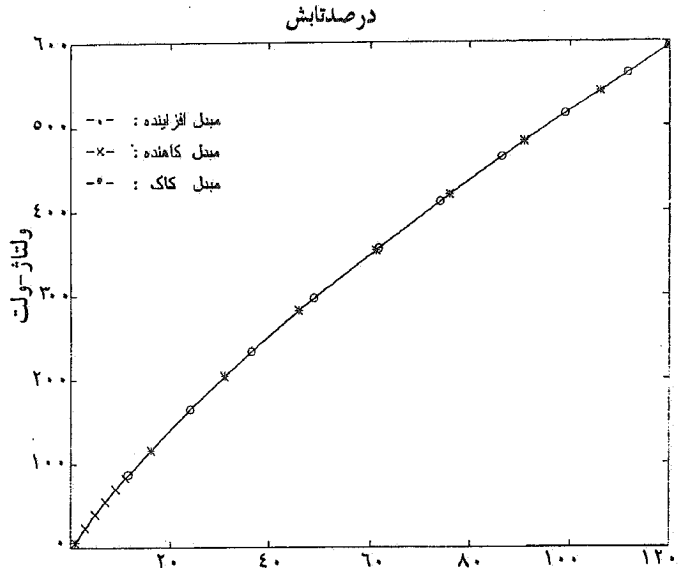
$$(۰/۵ + ۰/۰۰۴\omega + ۰/۰۰۱\omega^{۱/۸})(M_{af}\,\omega + R_a) = M_{af}\,V_{pv}\,I_{pv} \qquad (۲۱)$$



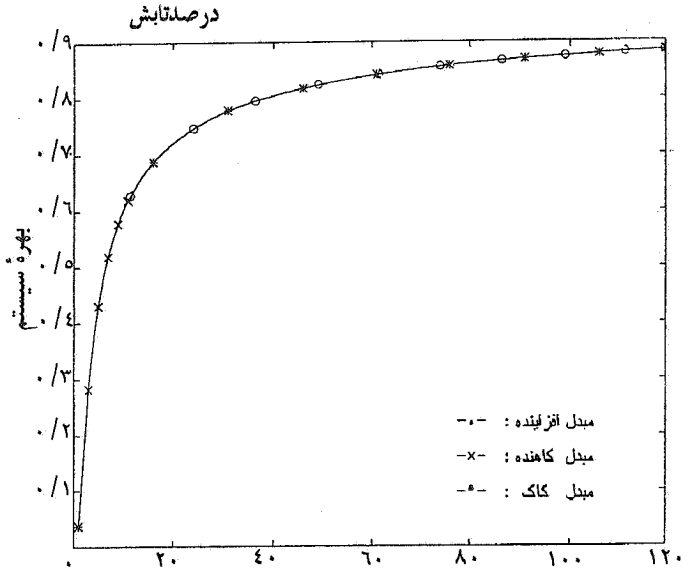
شکل ۱۲- جریان موتور سری برحسب تابش



شکل ۱۴- ضریب کار مبدلها برحسب سری برای موتور شنت



شکل ۱۳- ولتاژ موتورسری برحسب تابش



شکل ۱۵- بهرهٔ سیستم برحسب تابش برای موتور سری

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

$$(۰/۵+ ۰/۰۰۴\omega + ۰/۰۰۱\omega^{۱/۸})(M_{af}\omega + R_a) = M_{af} V_{mp} I_{mp} \qquad (۲۲)$$

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

$$R = \frac{\omega T_p}{V_{pv} I_{pv}} = \frac{۰/۰۰۱ M_{af}\omega^{۲/۸}}{(۰/۵+ ۰/۰۰۴\omega + ۰/۰۰۱\omega^{۱/۸})(M_{af}\omega + R_a)} \qquad (۲۳)$$

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

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

۷ـ 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 واسطهٔ 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.

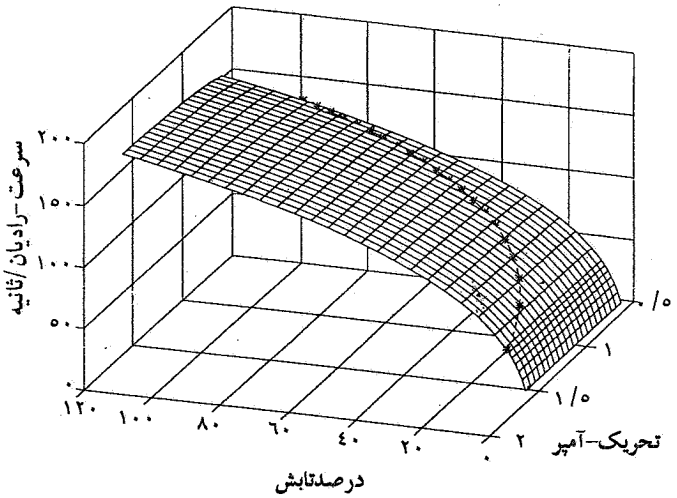
الف) جریان تحریک ثابت و بهره‌برداری بهینه با تنظیم ضریب کار مبدل

با مشخص بودن I_f می‌توان رابطهٔ (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 رابطهٔ (۲۵)

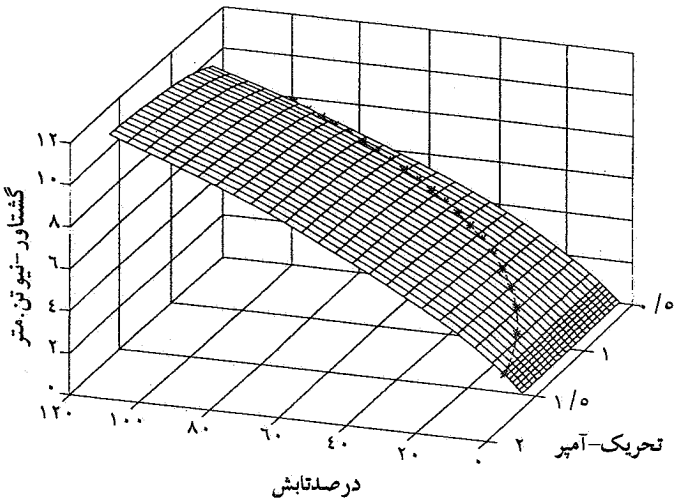
$$\omega(۰/۵ + ۰/۰۰۴\omega + ۰/۰۰۱\omega^{۱/۸}) + A(۰/۵ + ۰/۰۰۴\omega + ۰/۰۰۱\omega^{۱/۸})^{۲} = v_{PV} I_{PV} \qquad (۲۴)$$

$$\omega(۰/۵ + ۰/۰۰۴\omega + ۰/۰۰۱\omega^{۱/۸}) + A(۰/۵ + ۰/۰۰۴\omega + ۰/۰۰۱\omega^{۱/۸})^{۲} = v_{mp} I_{mp} \qquad (۲۵)$$

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 دربارهٔ نوع مبدل و ضریب کار آن در این حالت نیز برقرار است به جز اینکه مرز بین مبدل کاهنده و افزاینده 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



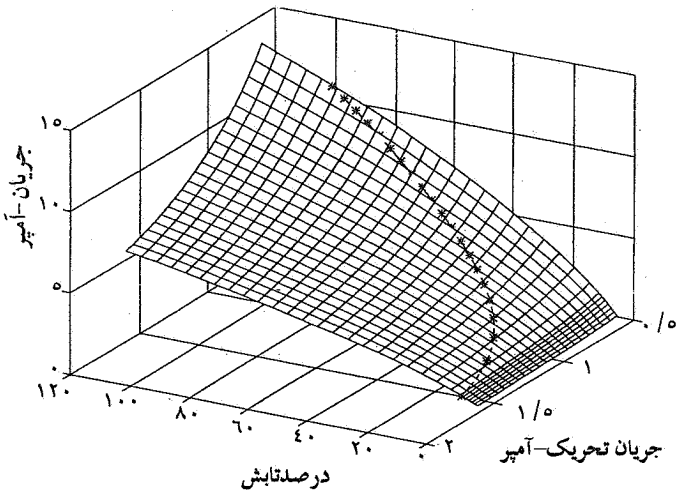
شکل ۱۶- سرعت موتور تحریک جداگانه همراه با مرز مبدلهای افزاینده و کاهنده: -۰-



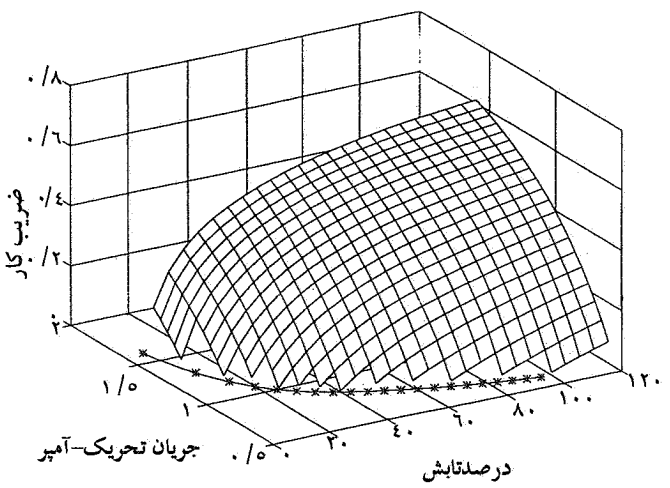
شکل ۱۷- گشتاور موتور تحریک جداگانه همراه با مرز مبدلهای افزاینده و کاهنده : -۰-

به ترتیب با سطوح عملکرد، مبدلهای کاهنده یا افزاینده 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 رابطهٔ (۲۶) حساب می‌شود ارائه می‌دهند. جز در شکلهای (۲۰) در این شکلها نیم سطحی که در جهت افزایش تابش قبل از علامت ـ * ـ تشکیل می‌شود مربوط به مبدل کاهنده، بعد از آن مربوط به مبدل افزاینده و در کل مربوط به مبدل کاک است.

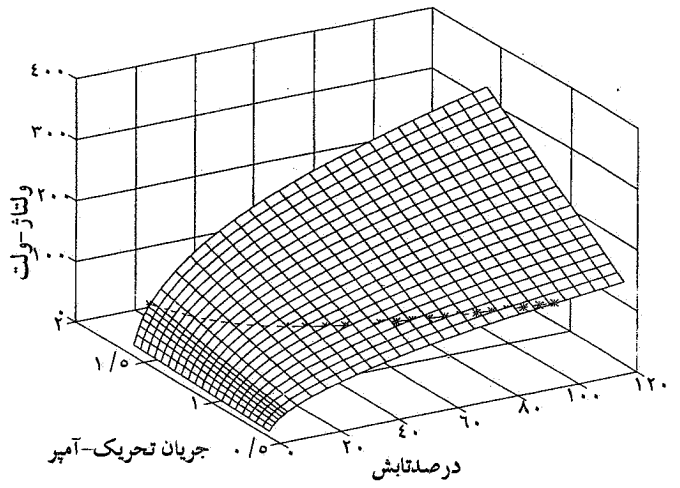
$$R = \frac{\omega T_p}{V_{pv} I_{pv}} = \frac{۰/۰۰۱\omega^{۲/۸}}{\omega(۰/۵ + ۰/۰۰۴\omega + ۰/۰۰۱\omega^{۱/۸}) + A(۰/۵ + ۰/۰۰۴\omega + ۰/۰۰۱\omega^{۱/۸})^{۲}} \qquad (۲۶)$$



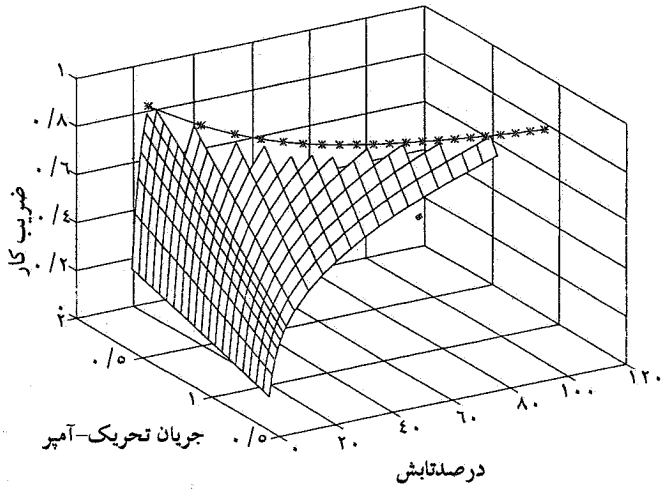
شکل ۱۸- جریان موتور تحریک جداگانه همراه با مرز مبدلهای افزاینده و کاهنده: -۰-



شکل ۲۰ -الف ضریب کار مبدل افزاینده در موتور تحریک جداگانه‌و حد پایین آن : -۰-



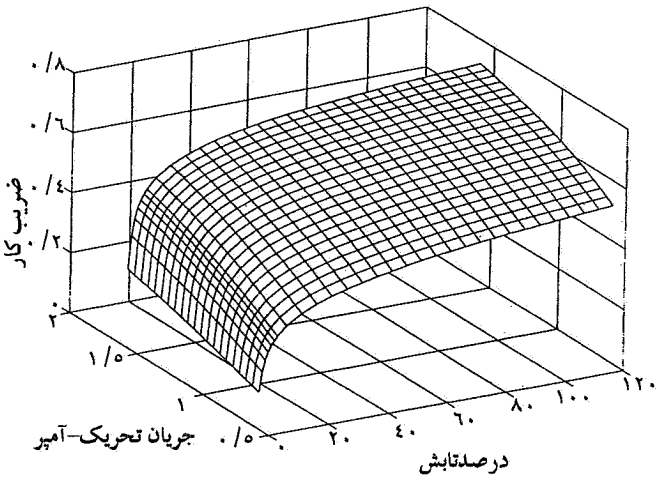
شکل ۱۹- ولتاژ موتور تحریک جداگانه همراه با مرز مبدلهای افزاینده و کاهنده : -۰-



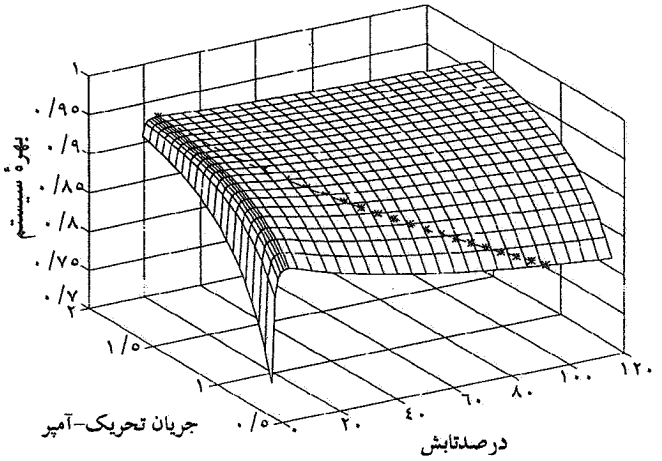
شکل ۲۰- ب ضریب کار مبدل کاهنده در موتور تحریک جداگانه و حد بالای آن: -۰-

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 ان بازده حداکثر است کاهش می‌یابد. در حالت ایده‌ال با صفر بودن A ($R_a \leq M_{af}{}^2 I_f{}^2$) حداکثر بازده یک است و در سرعت بینهایت قرار دارد و با بزرگ کردن A حتی می‌توان حداکثر بازده و سرعت مربوط به آن را به حدود صفر کاهش داد.

این مسئله باعث می‌شود تاحداکثر کردن بازده از بهره‌برداری بهینه منحرف شود. البته این انحراف از هنگامی‌است که بیشترین سرعت قابل دستیابی، از سرعتی که بازده در آن حداکثر است کمتر نباشد. در غیر این‌صورت مشابه با موتورهای شنت و سری باید با حداکثرکردن سرعت، بازده را تا می‌توان بالا برد. با این حال از شکل (۲۲) می‌توان دید که کاهش بازده بعد از حداکثرش بسیار آرام صورت می‌گیرد لذا با فرض حداکثر کردن سرعت، انحراف از بازده حداکثر، زیاد نخواهد بود، اما بایستی تا می‌توان 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 افزاینده یکسان شود.



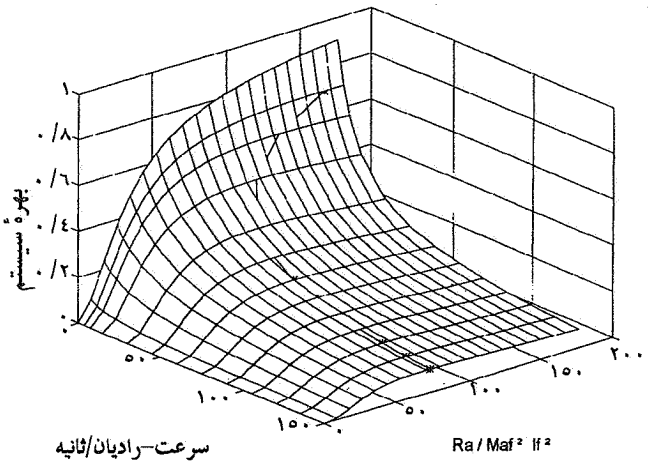
شکل ۲۰ - پ ضریب کار مبدل کاک در موتور تحریک جداگانه



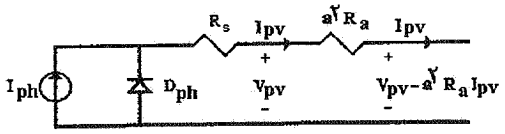
شکل ۲۱- بهرهٔ سیستم در موتور تحریک جداگانه همراه با مرز مبدلهای افزاینده و کاهنده : -ه-

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 رابطهٔ (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^2R_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 اندازهٔ



شکل۲۲-بهرهٔسیستم‌درموتورتحریک‌جداگانه‌وحداکثرآن‌درسرعت‌ثابت:-ه-



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

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

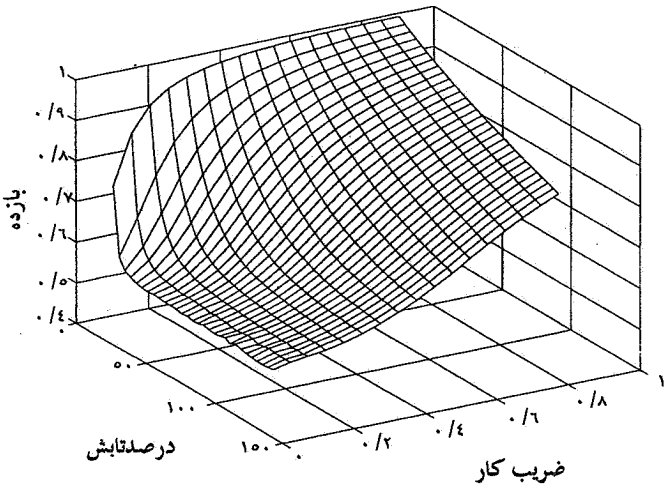
$$\omega(0/5+0/004\omega+0/001\omega^{1/8})=(V_{pv}-a^2R_a I_{pv})I_{pv} \quad (27)$$

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

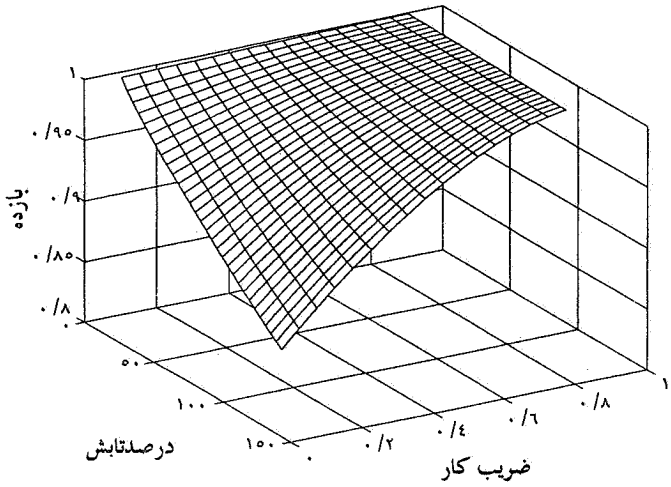
$$I_{pv}=I'_{mp} \quad (29)$$

از دستگاهی متشکل از رابطه‌های (۶)، (۷)، (۱۰)، (۱۱)، (۱۷) تا (۲۹) کلیه متغیرها مشخص می‌شود. صحبت کردن در مورد حداکثر کردن بازده، رابطهٔ (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.

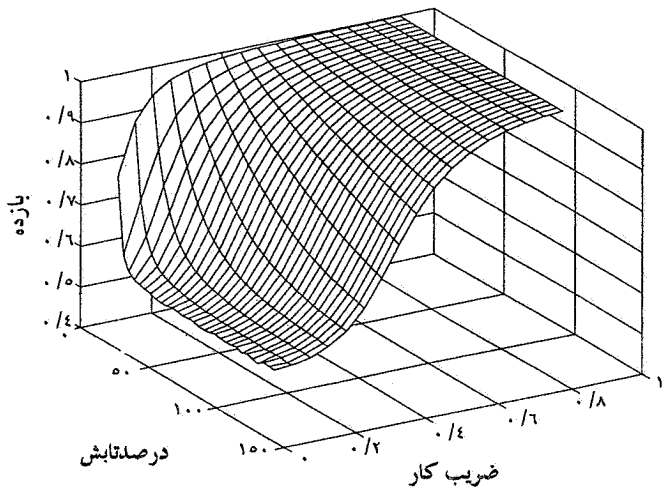
$$R=\frac{\omega T_p}{V_{pv}I_{pv}}=\frac{0/001\omega^{2/8}}{\omega(0/5+0/004\omega+0/001\omega^{1/8})+a^2R_a I_{pv}^2} \quad (30)$$



شکل ۲۴- الف بازده سیستم در مبدل افزاینده



شکل ۲۴- ب بازده سیستم در مبدل کاهنده



شکل ۲۴- پ بازده سیستم در مبدل کاک

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 براین 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 مشخصهٔ V-I موتور- پمپ با منحنی توان حداکثر ژنراتور قرار دارد. درموتور 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^2R_a اضافه شده‌است 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.

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 Tranaction 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.

۸. فرهمند، ف.، نیک خواجوئی، ح.و سقائیان نژاد، س. م.، "پیش‌بینی مشخصه‌های عملکرد حالت دائمی درایو موتور DC تغذیه‌شده از ژنراتور فتوولتایی،" مجموعه مقالات قدرت سومین کنفرانس مهندسی برق ایران، اردیبهشت ۷۴، ص ۴۲-۳۷.

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.