

فصل دوم:

کنترل سرعت موتورهای DC

- ☐ مروری بر موتورهای DC
- ☐ کنترل موتور DC با یکسوکننده‌های قابل کنترل
- ☐ کنترل موتور DC با برشگرها
- ☐ کنترل حلقه بسته محرکه‌های DC

➤ علل استفاده زیاد از محرکه‌های DC:

- ✓ سهولت در کنترل سرعت
- ✓ تنظیم سرعت مناسب
- ✓ سهولت دستیابی به عملکرد ترمزی، تغییر جهت گردش
- ✓ دارا بودن گشتاور نرم در بازه وسیعی از سرعت

➤ کاربردهای مهم محرکه‌های DC:

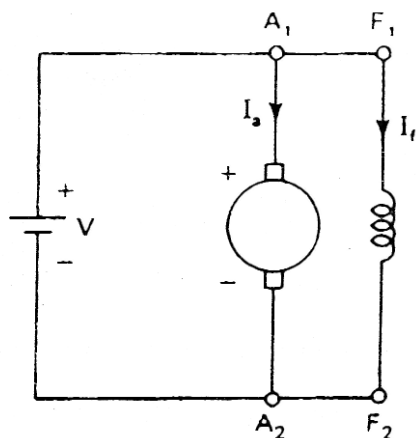
- ✓ غلطک‌های نورد در صنایع فولاد
- ✓ غلطک‌های کاغذ
- ✓ ماشین‌های ابزار
- ✓ موتورهای کششی نظیر قطارها، اتوبوس‌ها

➤ موتورهای DC مورد مطالعه در این درس:

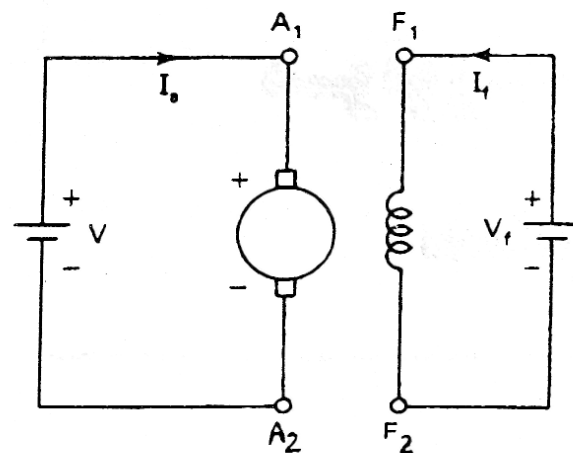
- ✓ موتور DC تحریک مستقل
- ✓ موتور DC تحریک سری

مروری بر موتورهای DC

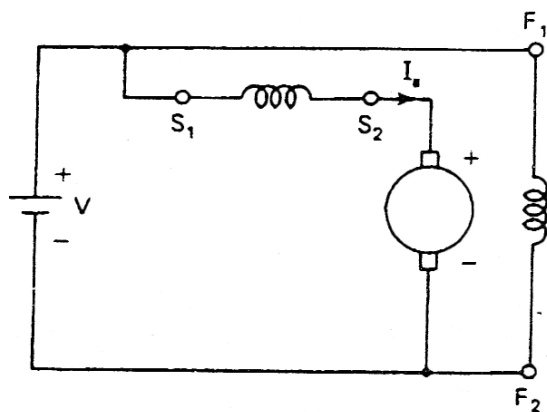
➤ مدار معادل موتور DC:



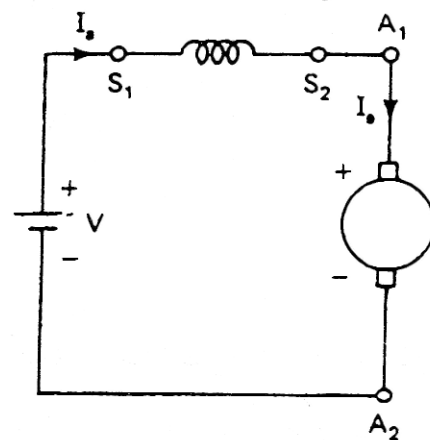
(ب) شنت



(الف) تحریک جداگانه



(د) کمپوند اضافی



(ج) سری

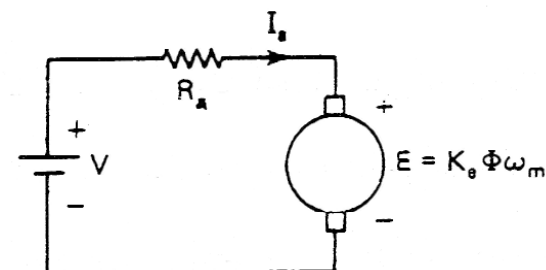
$$E = K_e \phi \omega_m \quad (1)$$

$$V = E + R_a I_a \quad (2)$$

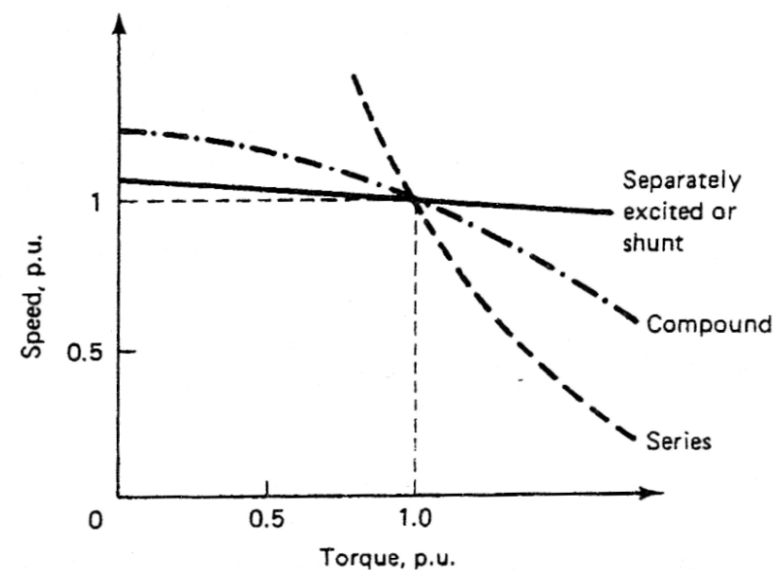
$$T = K_e \phi I_a \quad (3)$$

$$\omega_m = \frac{V}{K_e \phi} - \frac{R_a I_a}{K_e \phi} \quad (4)$$

$$= \frac{V}{K_e \phi} - \frac{R_a}{(K_e \phi)^2} T \quad (5)$$



مدار معادل آرمیچر موتور DC در حالت دائمی



مشخصه‌های سرعت-گشتاور انواع موتورهای DC

... روابط سرعت - گشتاور در حالت دائمی (موتور تحریک مستقل):

در موتور تحریک جداگانه، اگر ولتاژ تحریک ثابت نگهداشته شود، می توان شار را ثابت فرض نمود. لذا اگر:

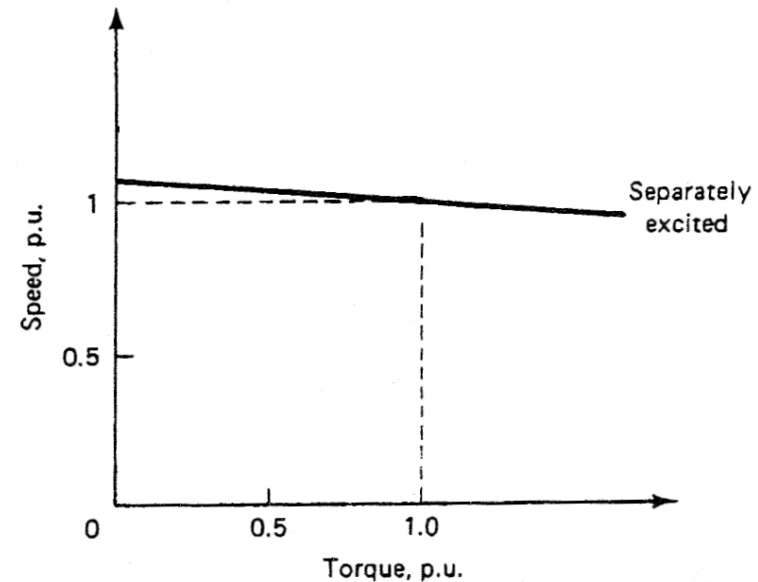
$$K_e \phi = K \text{ (ثابت)} \quad (6)$$

$$T = K_e \phi I_a \Rightarrow T = K I_a \quad (7)$$

$$E = K_e \phi \omega_m \Rightarrow E = K \omega_m \quad (8)$$

$$\omega_m = \frac{V}{K} - \frac{R_a}{K} I_a \quad (9)$$

$$= \frac{V}{K} - \frac{R_a}{K^2} T \quad (10)$$



مشخصه سرعت-گشتاور موتور DC تحریک مستقل

- افت سرعت از سرعت بی باری تا سرعت نامی به مقدار مقاومت آرمیچر بستگی دارد.
- مقدار آن در موتورهای با قدرت متوسط در حدود ۵٪ است.

... روابط سرعت - گشتاور در حالت دائمی (موتور تحریک سری):

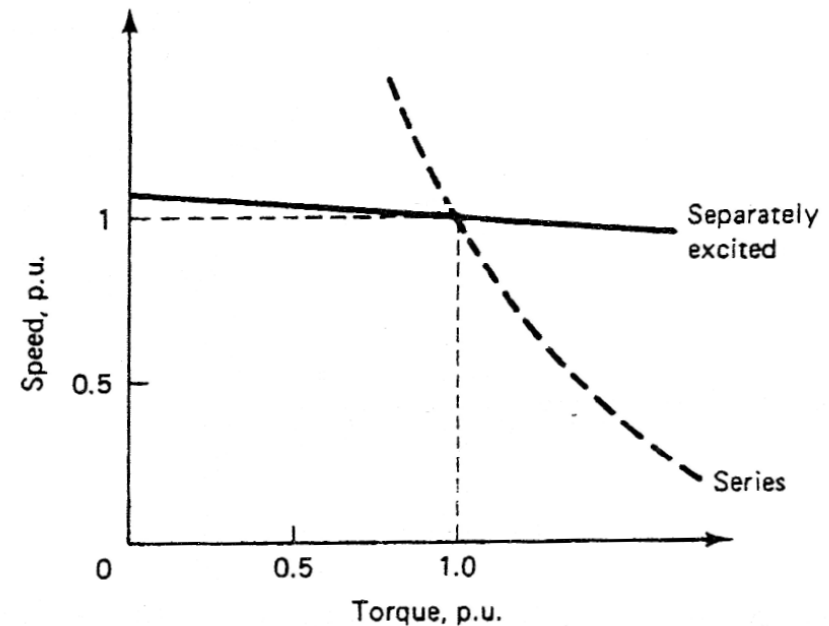
در موتور تحریک سری، شار تحریک تابعی از جریان آرمیچر است و در ناحیه غیر اشباع می توان فرض نمود:

$$\phi = K_f I_a \quad (11)$$

$$T = K_e \phi I_a \Rightarrow T = K_e K_f I_a^2 \quad (12)$$

$$\omega_m = \frac{V}{K_e K_f I_a} - \frac{R_a}{K_e K_f} \quad (13)$$

$$= \frac{V}{\sqrt{K_e K_f}} \frac{1}{\sqrt{T}} - \frac{R_a}{K_e K_f} \quad (14)$$



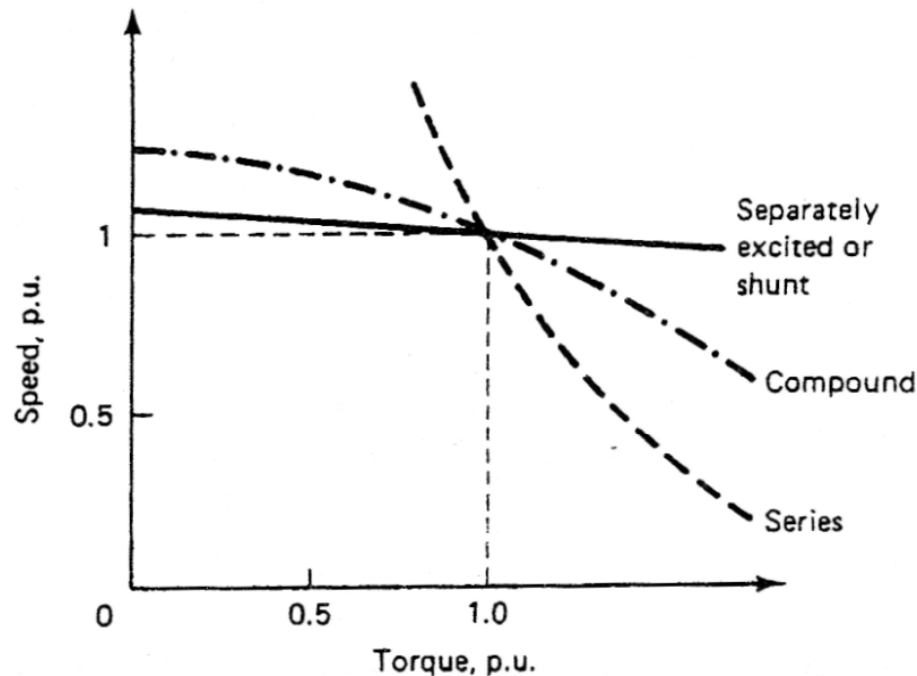
مشخصه‌های سرعت - گشتاور موتور DC تحریک مستقل و تحریک سری

- موتورهای سری برای کاربردهایی که با گشتاور راداندازی بالا و اضافه بارهای با گشتاور سنگین مواجه هستند، مناسب می باشند.
- با افزایش گشتاور، جریان و در نتیجه شار هم افزایش یافته و بنابراین با افزایش یکسان در گشتاور، افزایش جریان موتور سری نسبت به موتور تحریک مستقل کمتر است. لذا در اضافه بارهای با گشتاور سنگین، اضافه بار حرارتی موتور تا مقادیر قابل قبولی محدود می ماند.

... روابط سرعت - گشتاور در حالت دائمی (موتور کمپوند):

در موتور تحریک کمپوند، شار تحریک تابعی هم از جریان آرمیچر (تحریک سری) و هم از جریان تحریک (تحریک شنت) است.

- سرعت بی‌باری به شدت میدان تحریک شنت بستگی دارد و افت سرعت نیز به شدت میدان تحریک سری وابسته است.
- موتورهای کمپوند با شار اضافی در کاربردهایی استفاده می‌شود که به مشخصه موتور سری نیاز داشته باشند و همزمان با آن سرعت بی‌باری نیز به یک حد مطمئن محدود شود.
- از کاربردهای موتورهای کمپوند می‌تواند به بالا برها اشاره نمود.



مشخصه‌های سرعت-گشتاور موتور DC تحریک کمپوند و مقایسه با انواع دیگر

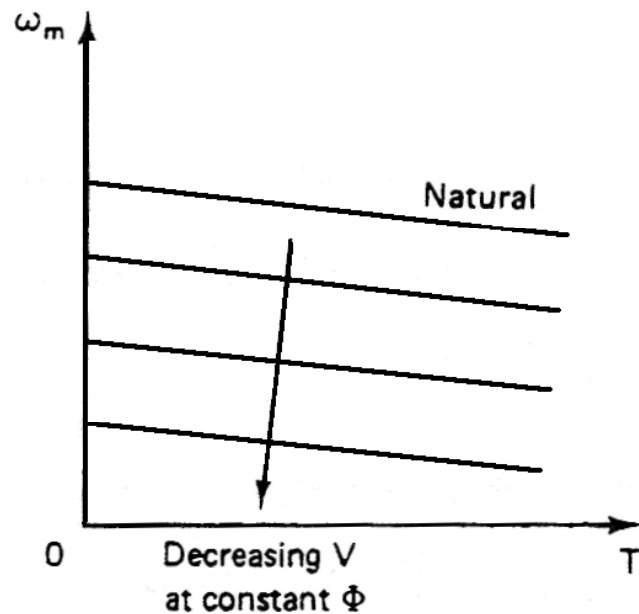
رابطه سرعت زیر نشان می‌دهد که سرعت موتور DC را می‌توان با هر کدام از روش‌های زیر کنترل نمود:

$$\omega_m = \frac{V}{K_e \phi} - \frac{R_a}{(K_e \phi)^2} T \quad (5)$$

(۱) کنترل ولتاژ آرمیچر

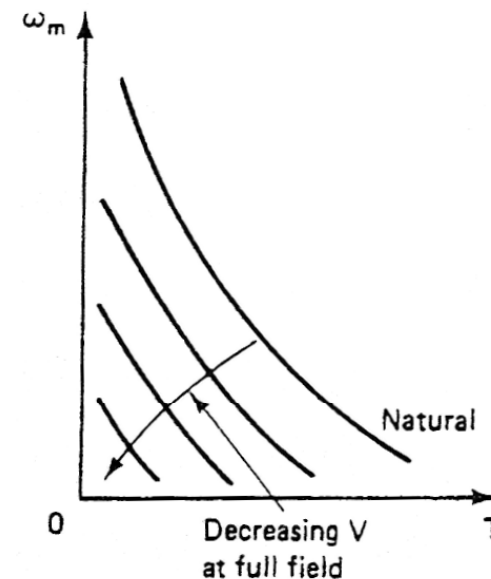
(۲) کنترل شار میدان تحریک

(۳) کنترل مقاومت آرمیچر



منحنی‌های سرعت - گشتاور موتور تحریک مستقل در حالت تغییر ولتاژ آرمیچر

$$\omega_m = \frac{V}{K_e \phi} - \frac{R_a}{(K_e \phi)^2} T$$

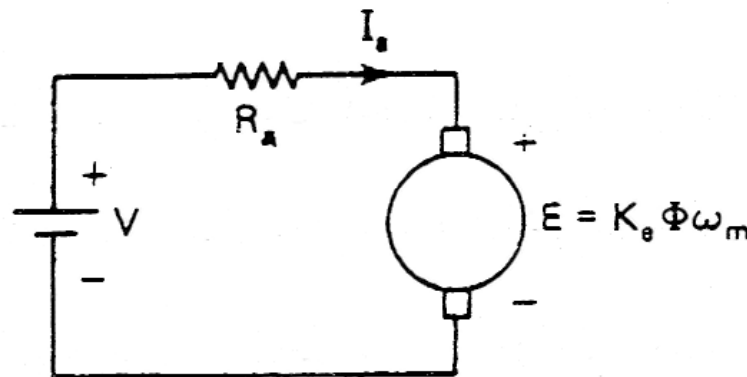


منحنی‌های سرعت - گشتاور موتور تحریک سری در حالت تغییر ولتاژ آرمیچر

روند تغییر سرعت در روش کنترل ولتاژ آرمیچر (تغییرات کم ولتاژ آرمیچر):

- (۱) اگر ولتاژ آرمیچر یک موتور DC تحریک مستقل یا تحریک سری که در یک سرعت پایدار کار می‌کند به مقدار کمی کاهش یابد، لذا جریان آرمیچر کاهش یافته و بنابراین گشتاور تولیدی کم می‌شود. چون گشتاور محرک از گشتاور بار کمتر می‌شود، شتاب موتور منفی خواهد شد و منجر به کاهش سرعت موتور می‌شود.
- (۲) کاهش سرعت منجر به کاهش ولتاژ ضدمحرکه و در نتیجه افزایش جریان آرمیچر به نحوی می‌گردد که جریان آرمیچر به مقدار اولیه قبل از تغییر باز می‌گردد. در این حالت موتور در سرعتی پائین تر از حالت قبل از تغییر ولتاژ اما با همان مقدار گشتاور مستقر خواهد شد.

... کنترل سرعت به روش کنترل ولتاژ آرمیچر:



روند تغییر سرعت در روش کنترل ولتاژ آرمیچر (تغییرات زیاد ولتاژ آرمیچر):

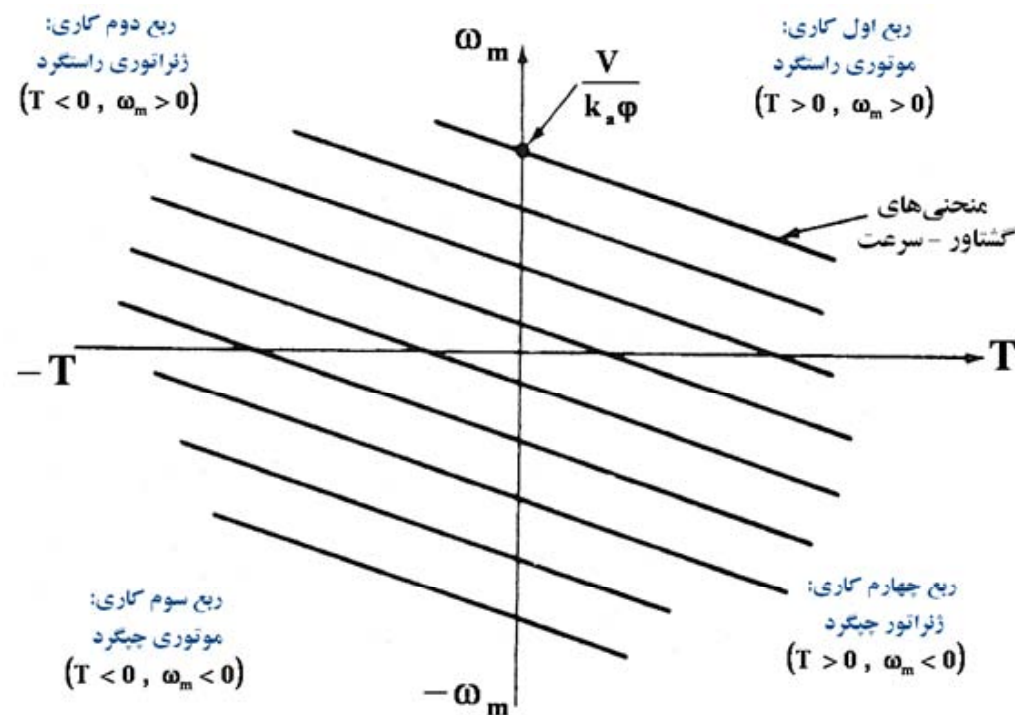
- (۱) اگر تغییر ولتاژ آرمیچر یک موتور DC تحریک مستقل بزرگ باشد، ممکن است ولتاژ آرمیچر (V) از ولتاژ ضدمحر که (E) کمتر گشته و جهت جریان معکوس گردد. در این حالت موتور همانند یک ژنراتور عمل نموده و گشتاور منفی تولید می کند. این وضعیت همراه با کاهش سرعت موتور تا وقتی ادامه می یابد که ولتاژ E از ولتاژ V کمتر شود. ادامه کار همانند حالت قبل است که توضیح داده شد.
- (۲) در مورد موتور سری، حتی اگر تغییرات ولتاژ آرمیچر بزرگ باشد، موتور به صورت ژنراتور کار نمی کند و کاهش سرعت فقط به علت آنست که گشتاور موتور از گشتاور بار کمتر می شود.



دانشگاه کاشان

□ مروری بر موتورهای DC

... کنترل سرعت به روش کنترل ولتاژ آرمیچر:



منحنی های سرعت-گشتاور موتور DC تحریک مستقل در حالت عملکرد چهار ربعی

■ **نکته مهم:** در روش کنترل ولتاژ آرمیچر، تغییرات ولتاژ آرمیچر تا حداکثر برابر با مقدار نامی ولتاژ آرمیچر قابل انجام است و در این روش

اعمال ولتاژی بیش از ولتاژ نامی به آرمیچر مجاز نمی باشد.

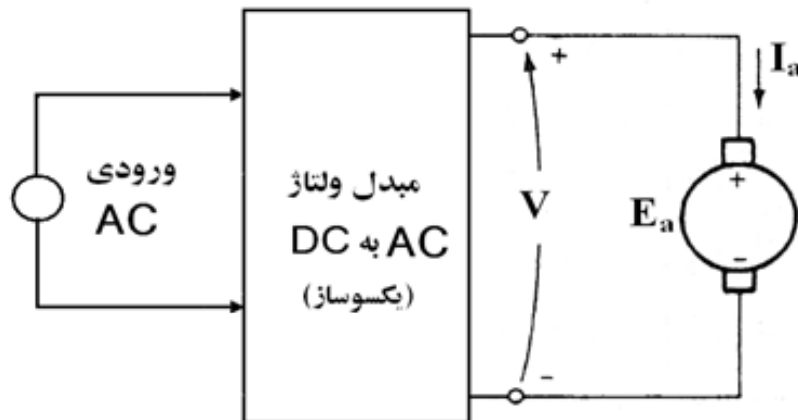
... کنترل سرعت به روش کنترل ولتاژ آرمیچر:

❖ انواع روش‌های کنترل ولتاژ آرمیچر:

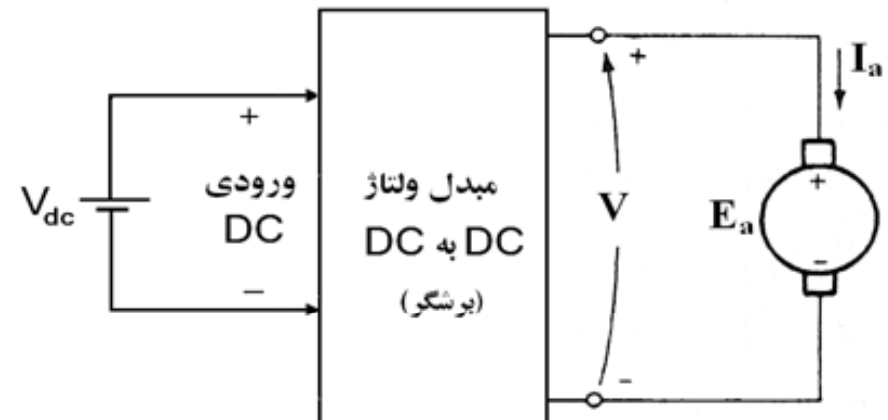
(۱) استفاده از کنترل کننده‌های حالت جامد شامل برشگرهای ولتاژ (Chopper)

(۲) استفاده از یکسوسازهای ولتاژ (Rectifier)

برشگرها می‌توانند در جایی استفاده شوند که منبع تغذیه توان DC وجود داشته باشد و اگر منبع AC موجود باشد از یکسوسازها استفاده می‌شود.



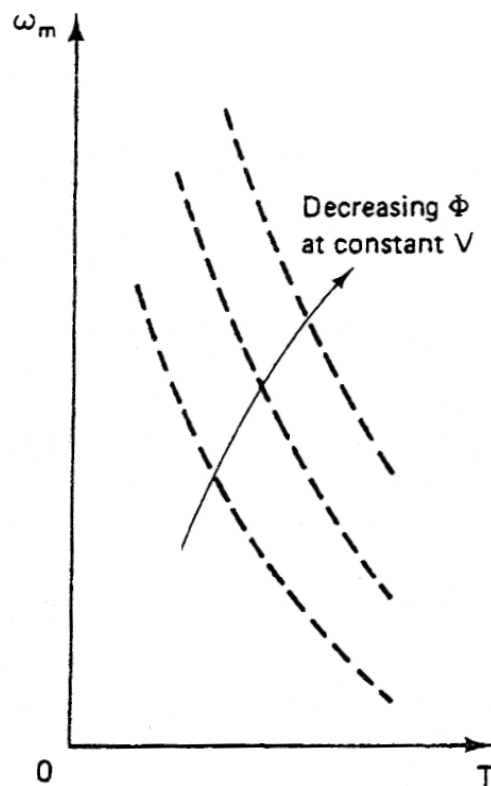
(ب) کنترل ولتاژ آرمیچر موتور DC توسط یکسوساز



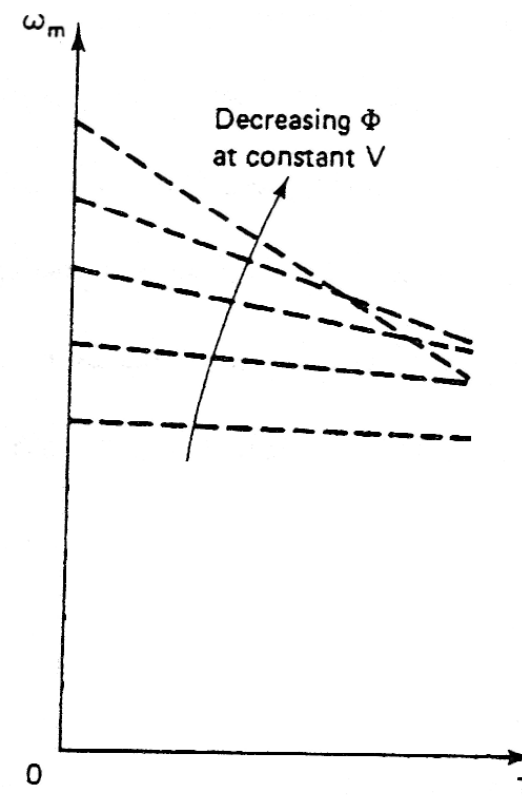
(الف) کنترل ولتاژ آرمیچر موتور DC توسط برشگر

➤ کنترل سرعت به روش کنترل میدان (کاهش شار):

- **نکته کلیدی:** روش کنترل میدان (کاهش شار میدان) برای سرعت‌های بالاتر از سرعت نامی قابل استفاده است که در آنجا روش کنترل ولتاژ آرمیچر به دلیل بیشتر شدن ولتاژ آرمیچر از مقدار نامی آن قابل کاربرد نیست.



(ب) روش کاهش شار در موتور سری



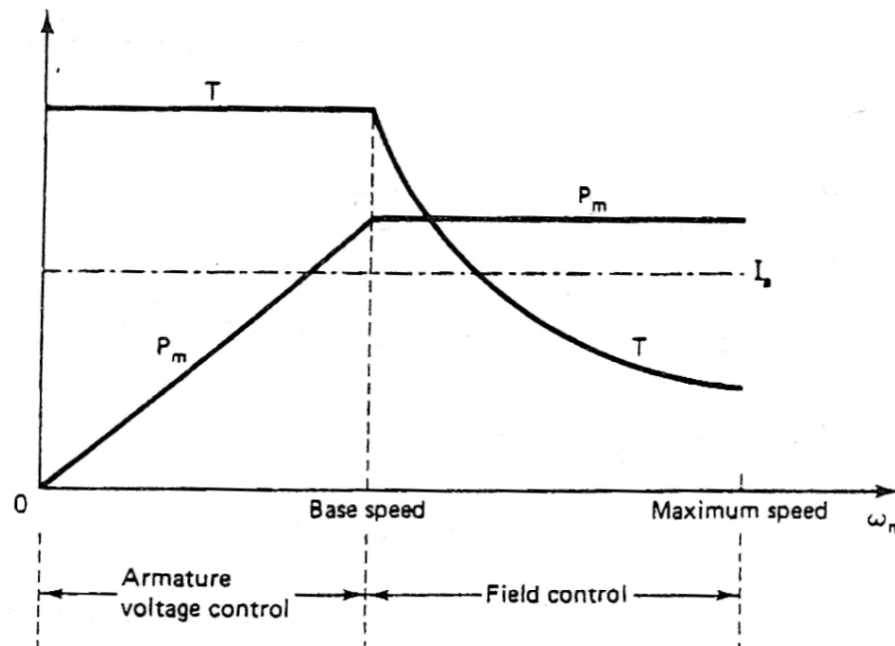
(الف) روش کاهش شار در موتور تحریک مستقل

...کنترل سرعت به روش کنترل میدان (کاهش شار):

- **منطق مورد استفاده در روش کنترل میدان:** اگر در یک موتور تحریک مستقل یا سری که در سرعت خاصی در حال چرخش است، میدان تضعیف شود، نیروی ضدمحر که القایی آن کاهش می‌یابد. به دلیل کوچک بودن مقاومت آرمیچر، مقدار افزایش در جریان آرمیچر نسبت به مقدار کاهش میدان، بسیار بزرگتر خواهد بود. در نتیجه با وجود تضعیف میدان، گشتاور بطور قابل ملاحظه‌ای افزایش می‌یابد و از مقدار گشتاور بار بیشتر می‌شود. در نتیجه موتور شتاب گرفته و سرعت آن زیاد می‌شود.
- **حداکثر سرعت قابل دستیابی در روش کاهش شار:** حداکثر سرعت توسط ناپایداری ناشی از اثر عکس‌العمل آرمیچر در یک میدان تحریک ضعیف و همچنین تحمل مکانیکی موتور محدود می‌شود. در موتورهای DC با طراحی عادی، رساندن سرعت به $1/5$ تا 2 برابر سرعت نامی و در موتورهای با طراحی مخصوص، رساندن سرعت به 6 برابر سرعت نامی امکان‌پذیر است.
- **ناحیه کنترل میدان یا ناحیه توان ثابت:** در کنترل میدان موتور تحریک مستقل، فرض می‌شود که حداکثر مجاز جریان آرمیچر ($I_{a,max}$) هنگامیکه میدان تضعیف می‌شود، عوض نمی‌شود. از طرفی دیگر ولتاژ آرمیچر نیز ثابت است. لذا ولتاژ ضدمحر که E نیز ثابت مانده و در نتیجه حداکثر توان فاصله هوایی یعنی $E \times I_{a,max}$ ثابت باقی می‌ماند. لذا این ناحیه به ناحیه توان ثابت معروف است. در این حالت حداکثر مقدار گشتاور بطور معکوس با سرعت تغییر می‌کند.
- **چگونگی کاهش شار تحریک:** در موتور تحریک مستقل از برشگر و یا یکسوساز کنترل شده در مدار تحریک استفاده می‌شود. اما در موتور سری، با وارد کردن یک مقاومت موازی با سیم‌پیچ تحریک سری و یا تغییر تعداد دور سیم‌پیچ تحریک سری، شار کاهش می‌یابد.

ترکیب روش‌های کنترل ولتاژ آرمیچر و کنترل میدان:

- **کاربرد:** در محرکه‌هایی که کنترل سرعت در محدوده وسیع ضروری است، دو روش کنترل ولتاژ آرمیچر و میدان با هم ترکی می‌شوند.
- در ناحیه کنترل ولتاژ، از حداکثر گشتاور مجاز موتور می‌توان استفاده نمود و در ناحیه کنترل شار، از حداکثر توان موتور می‌توان بهره برد.
- از روش کنترل میدان بندرت در سرعت‌های زیر سرعت نامی استفاده می‌شود. در برخی محرکه‌ها که چند موتور از یک منبع ولتاژ مشترک برای تغذیه آرمیچرشان استفاده می‌کنند، از روش کنترل ولتاژ آرمیچر برای تنظیم همزمان سرعت‌های موتورها در زیر سرعت نامی استفاده می‌شود. در صورتیکه سرعتها با یک ولتاژ مشترک برابر نبوندند، می‌توان برای تنظیم دقیق‌تر سرعت از کنترل میدان استفاده نمود.



محدوده‌های گشتاور و قدرت (توان) در روش کنترل ترکیبی ولتاژ آرمیچر و میدان

■ منطق این روش: مطابق رابطه روبرو، افزایش مقاومت آرمیچر، سبب کاهش سرعت می گردد.

$$\omega_m = \frac{V - R_a I_a}{K_e \phi} \quad (4)$$

■ اشکال این روش: بازده کم و اتلاف زیاد انرژی (برای بارهای با گشتاور ثابت)

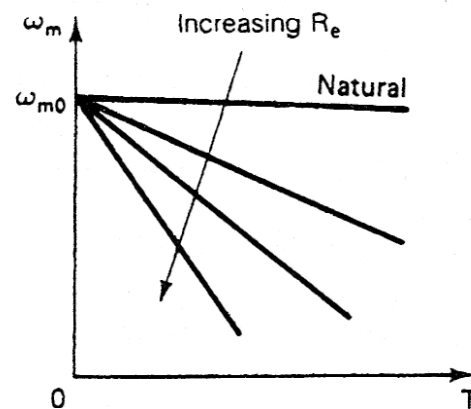
$$= \frac{V}{K_e \phi} - \frac{R_a}{(K_e \phi)^2} T \quad (5)$$

■ مزیت: امکان کاهش سرعت موتور حتی در نزدیکی های سرعت صفر (سرعت پا یا سرعت خزشی) و ایجاد گشتاور نرم.

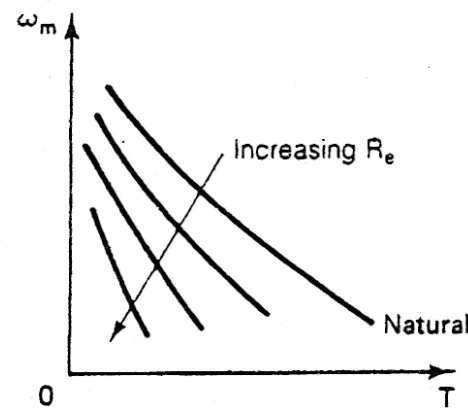
■ کاربرد: ۱- برای بارهایی که کاهش سرعت در آنها کوتاه مدت و تکراری است و از موتورهای سری استفاده می کنند کاملاً اقتصادی است.

۲- این روش برای بارهایی اقتصادی و مفید است که در آنها، گشتاور بار تابعی از توان دوم و یا سوم سرعت است. در این بارها، حتی

با کاهش سرعت راندمان افزایش نیز می یابد.



(الف) تحریک جداگانه



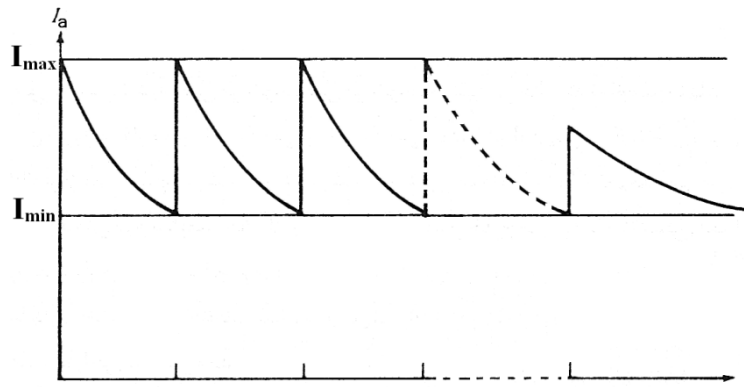
(ب) سری

مشخصه های سرعت-گشتاور موتورهای DC با کنترل مقاومت آرمیچر

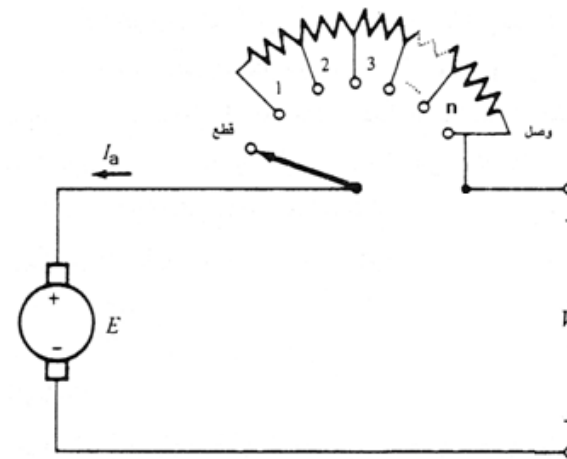
- اگر یک موتور DC با ولتاژ نامی راه اندازی شود، برای یک موتور با اندازه متوسط، جریان به حدود ۲۰ برابر جریان نامی خواهد رسید که منجر به ایجاد جرقه های شدید در کموتاتورها و گرم شدن سیم پیچ های موتور می گردد. لذا محدود نمودن جریان راه اندازی، یک اصل مهم در محرکه های DC است.

■ روش های محدود نمودن جریان راه اندازی:

- (۱) در کاربردهای سرعت ثابت: استفاده از جعبه مقاومت راه انداز
- (۲) در کاربردهای سرعت متغیر: کاهش ولتاژ آرمیچر در لحظه راه اندازی و افزایش تدریجی آن همزمان با افزایش سرعت



(ب) تغییرات جریان آرمیچر طی راه اندازی موتور DC



(الف) راه انداز مقاومتی n مرحله ای برای موتور شنت

- در بسیاری از کاربردها لازم است تا موتور سریعاً به ایست کامل برسد.
- ساده‌ترین روش برای ایست موتور آنست که ولتاژ تغذیه آرمیچر قطع گردد. اما در این روش، موتور با توجه به انرژی جنبشی خود به حالت توقف کامل خواهد رسید. لذا برای توقف موتور در زمان دلخواه از روش‌های زیر می‌توان استفاده نمود:

۱- ترمز موتور با استفاده از لنت ترمز (Mechanical Braking)

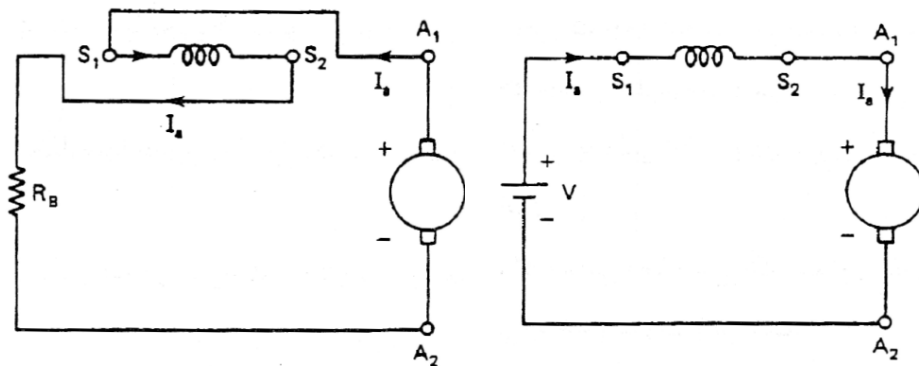
۲- ترمز دینامیکی (Dynamic Braking)

۳- ترمز با تغذیه معکوس (Plugging Braking)

۴- ترمز به روش بازیاب انرژی (Regenerative Braking)

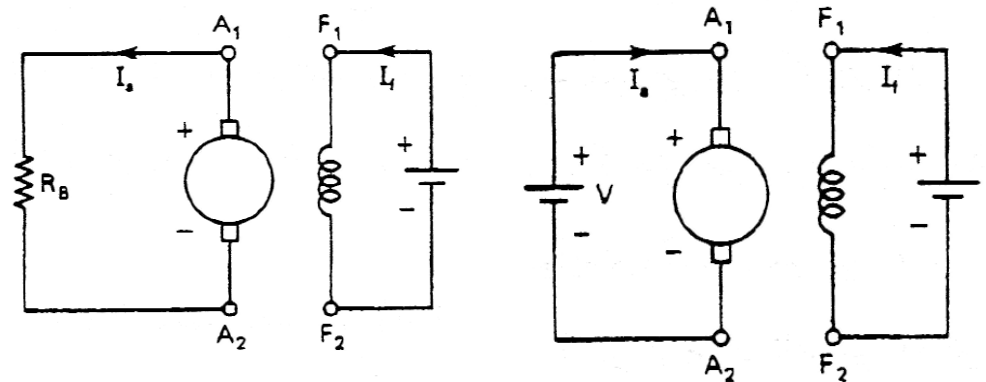
- در کاربردهایی که توقف خیلی سریع نیاز نیست و اطلاق انرژی نیز اهمیت زیادی ندارد، از ترمز مکانیکی استفاده می‌شود.

- **اصول این روش:** در این روش، موتور DC در حال چرخش، از منبع تغذیه جدا شده و مدار آرمیچر به مقاومت مناسبی متصل می‌شود. لذا جهت جریان معکوس شده و موتور بصورت یک ژنراتور عمل نموده و گشتاور منفی (ترمزی) ایجاد می‌کند.
- **در حالت ترمز دینامیکی موتور سری:** در حالت کار ژنراتوری، جهت میدان تحریک باید با جهت پسماند یکی باشد. لذا ورودی‌های تحریک (یا آرمیچر) باید معکوس شوند.
- **عیب این روش:** به دلیل اقلاف حرارتی انرژی جنبشی این روش علیرغم سادگی روشی بی‌بازده است.



(ب) حالت ترمزی

(الف) حالت موتوری



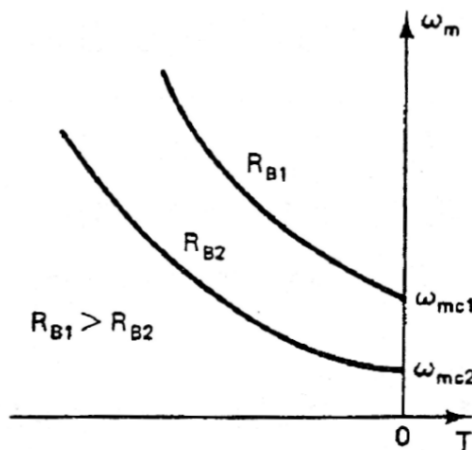
(ب) حالت ترمزی

(الف) حالت موتوری

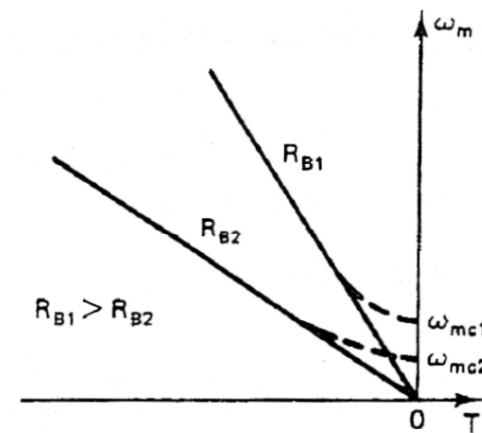
(۲) ترمز دینامیکی موتور تحریک سری

(۱) ترمز دینامیکی موتور تحریک مستقل

- مدت زمان رسیدن به حالت توقف: این زمان به اصطکاک موتور، ممان اینرسی روتور و بار و گشتاور ترمزی (مقدار مقاومت) وابسته است.
- انتخاب مقدار مقاومت R_B :
 - (۱) هر چه مقدار مقاومت کمتر باشد، جریان و گشتاور ترمزی بیشتر شده و موتور زودتر متوقف می شود.
 - (۲) حداکثر مقدار مقاومت به نحوی انتخاب می شود که جریان در شروع ترمز و در بیشترین سرعت برابر با بیشترین مقدار مجاز جریان باشد و با کاهش سرعت، مقدار مقاومت کاهش می یابد تا گشتاور ترمز در بیشترین مقدار باقی بماند. در نهایت این مقاومت به مقدار صفر می رسد.
- مشکل اصلی ترمز دینامیکی موتور سری: برای هر مقدار مقاومت ترمزی، یک سرعت حداقلی (بحرانی) وجود دارد که در زیر این سرعت گشتاور ترمزی صفر می شود. دلیل آن بخاطر آنست که ماشین نمی تواند خود را تحریک کند.



(ب) موتور تحریک سری

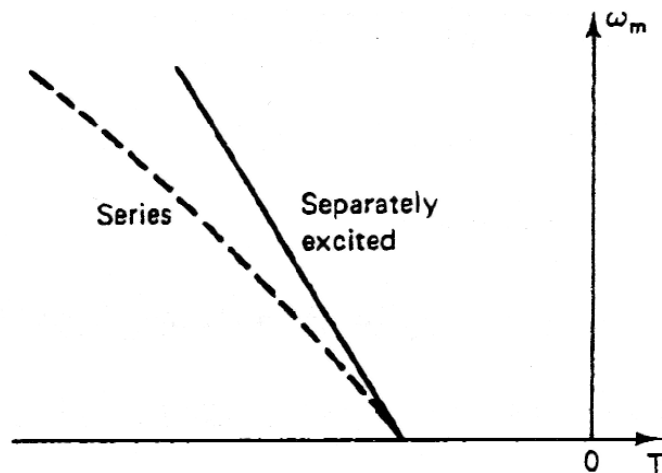


(الف) موتور تحریک مستقل

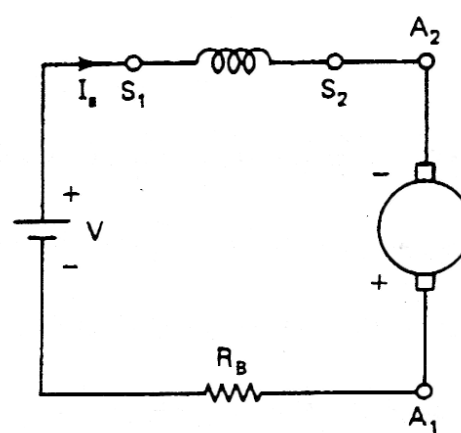
منحنی های سرعت-گشتاور موتورهای DC در شرایط ترمز دینامیکی

ترمز با تغذیه معکوس:

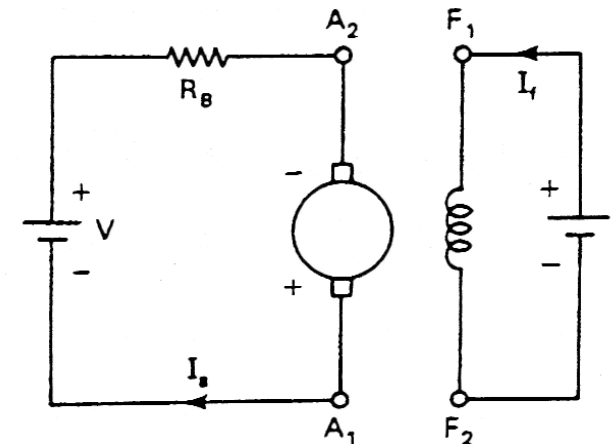
- **اصول این روش:** اگر سرهای ورودی آرمیچر یک موتور تحریک جداگانه در حالتی که می چرخد عوض شوند، ولتاژ منبع و ولتاژ ضد محرکه هم جهت شده و جهت جریان موتور معکوس شده و در نتیجه گشتاور ترمزی تولید می شود.
- **در حالت ترمز Plugging:** از مقاومت محدود ساز جریان برای محدود نمودن جریان آرمیچر استفاده می شود که مقدار آن دو برابر مقاومت راه اندازی است.
- **ویژگی های این روش:** اتلاف انرژی بالا - بازده پائین - لزوم جداسازی موتور از منبع در نزدیکی های سرعت صفر جهت توقف موتور.



منحنی های سرعت - گشتاور موتورهای DC در شرایط ترمز با تغذیه معکوس



(ب) موتور تحریک سری

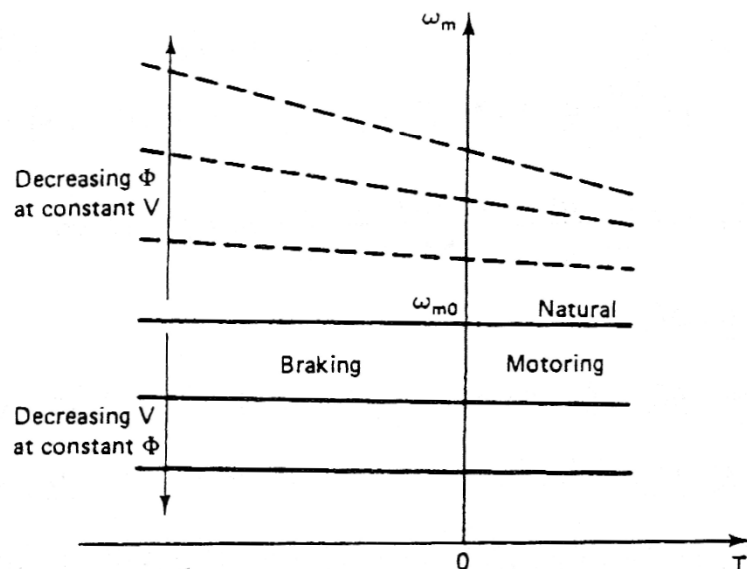


(الف) موتور تحریک مستقل

ترمز موتور DC به روش تغذیه معکوس

ترمز ژنراتوری یا بازایاب انرژی (Regenerative):

- ایده این روش: در این روش، انرژی جنبشی ماشین به انرژی الکتریکی تبدیل شده و به منبع تغذیه تحویل داده می‌شود. در صورتی می‌توان از این روش استفاده نمود که منبع بتواند انرژی بازایاب را جذب و ذخیره نماید و یا بار دیگری برای مصرف انرژی بازایاب وجود داشته باشد.
- بازایاب انرژی در موتور تحریک مستقل: می‌توان با تنظیم V به نحوی که همواره از E کوچکتر باشد، جهت جریان را معکوس نمود و انرژی را بازایاب نمود. اما در برخی کاربردها که چندین تغذیه از V استفاده می‌کنند، کاهش V مقدور نمی‌باشد. در این کاربردها، فقط تا وقتی که E از V بزرگتر است، بازایاب انرژی ممکن است. البته در حالت کار با منبع ولتاژ ثابت، با استفاده از برشگر می‌توان ولتاژ V را تغییر داد تا همواره $V < E$ باشد.
- ترمز ژنراتوری موتور سری به راحتی موتور تحریک مستقل نمی‌باشد و باید آنرا بصورت موتور شنت در آورده و سپس ترمز بازایاب نمود.

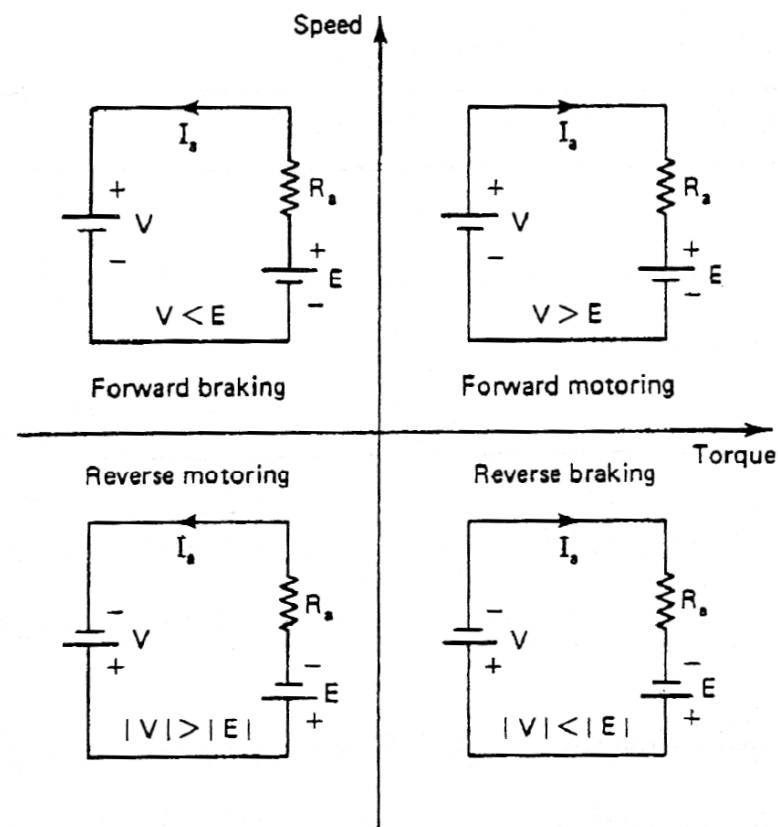


منحنی‌های سرعت-گشتاور موتور تحریک مستقل در حالت ترمز ژنراتوری

□ مروری بر موتورهای DC

➤ عملکرد چند ربعی موتور DC:

■ در اغلب محرکه‌هایی که از مبدل‌های نیمه‌هادی قدرت استفاده می‌کنند، ترمز ژنراتوری به منظور صرفه‌جویی در انرژی بکار گرفته می‌شود.



ربع کار	جهت ولتاژ منبع	جهت جریان منبع
موتوری مستقیم (ربع I)	مثبت	مثبت
ترمزی مستقیم (ربع II)	مثبت	منفی
موتوری معکوس (ربع III)	منفی	منفی
ترمزی معکوس (ربع IV)	منفی	مثبت

علامت ولتاژ منبع، جریان موتور و ولتاژ ضد محرکه در ربع‌های مختلف کاری موتور DC

➤ تابع تبدیل کنترلی موتور تحریک جداگانه (با کنترل ولتاژ آرمیچر):

- برای بررسی پایداری و طراحی سیستم کنترل حلقه بسته یک محرکه نیاز به داشتن بلوک دیاگرام و تابع تبدیل می‌باشیم.
- از محرکه‌های حلقه بسته DC برای کنترل گشتاور، سرعت و یا موقعیت استفاده می‌شود.
- در درس کنترل هم با روش کنترل ولتاژ آرمیچر و هم با روش کنترل میدان تحریک آشنا شدیم.

$$v = R_a i_a + L_a \frac{di_a}{dt} + K \omega_m \quad (15)$$

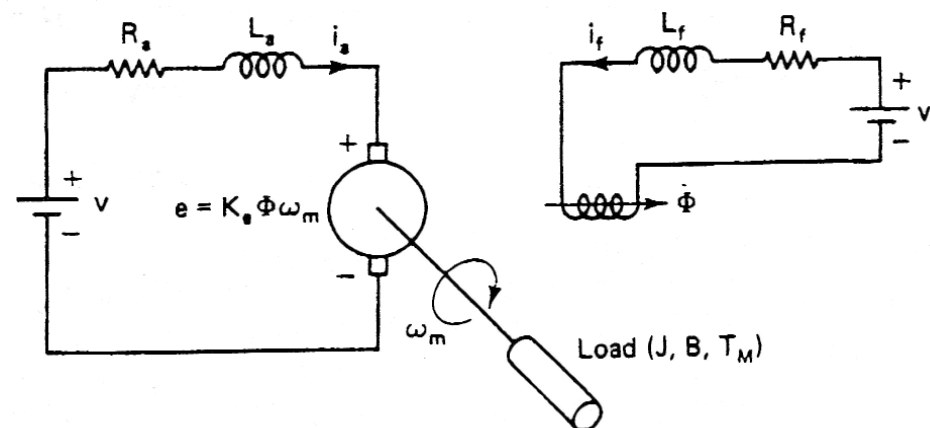
$$J \frac{d\omega_m}{dt} = T - T_M - B \omega_m \quad (16)$$

$$T = K i_a \quad (17)$$

با گرفتن تبدیل لاپلاس از معادلات و ساده‌سازی داریم:

$$sL_a I_a(s) + R_a I_a(s) + K \omega_m = V(s) \quad (18)$$

$$sJ \omega_m(s) + B \omega_m(s) + T_M(s) = K I_a(s) \quad (19)$$



مدار معادل دینامیکی موتور DC تحریک مستقل

... تابع تبدیل کنترلی موتور تحریک جداگانه (با کنترل ولتاژ آرمیچر):

با ساده‌سازی داریم:

$$I_a(s) = \frac{V(s) - K\omega_m}{R_a(1 + s\tau_a)}, \quad \tau_a = \frac{L_a}{R_a} \quad (20)$$

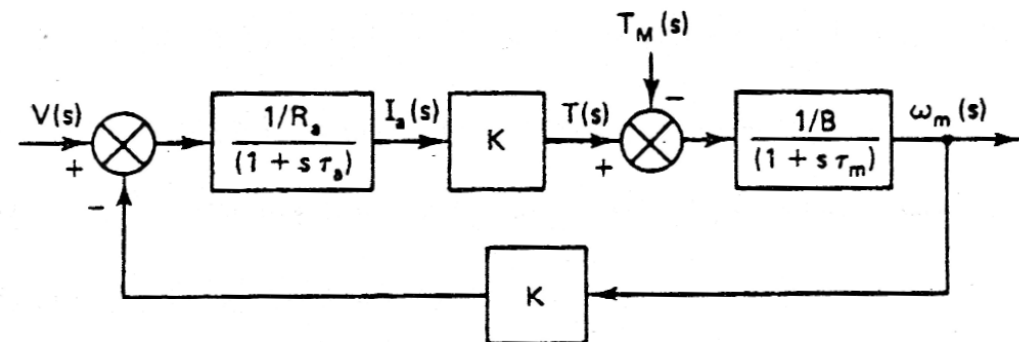
$$\omega_m(s) = \frac{1}{B} \frac{T(s) - T_M(s)}{(1 + s\tau_m)}, \quad \tau_m = \frac{J}{B} \quad (21)$$

با صفر قرار دادن گشتاور بار T_M نسبت تبدیل جریان به ولتاژ آرمیچر به راحتی بدست می‌آید:

$$\frac{I_a(s)}{V(s)} = \frac{K_{m_2}(1 + s\tau_m)}{s^2 + (1/\tau_a + 1/\tau_m)s + 1/(\tau_{m_1}\tau_a)} \quad (22)$$

$$\tau_{m_1} = JR_a / (BR_a + K^2) \quad (23)$$

$$K_{m_2} = 1/(\tau_a\tau_m R_a) \quad (24)$$

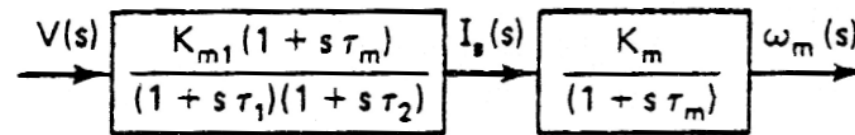


نمودار بلوکی موتور DC تحریک جداگانه با کنترل ولتاژ آرمیچر

... تابع تبدیل کنترلی موتور تحریک جداگانه (با کنترل ولتاژ آرمیچر):

$$\frac{I_a(s)}{V(s)} = \frac{K_{m1}(1+s\tau_m)}{(1+s\tau_1)(1+s\tau_2)} \quad (25)$$

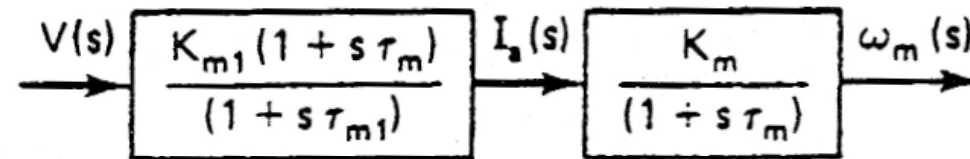
همچنین با ساده‌سازی تابع تبدیل داریم:



نمودار بلوکی موتور DC تحریک جداگانه با کنترل ولتاژ آرمیچر

$$\frac{I_a(s)}{V(s)} = \frac{K_{m1}(1+s\tau_m)}{(1+s\tau_{m1})} \quad (26)$$

در یک موتور DC معمولاً $\tau_a \ll \tau_m$ ، لذا خواهیم داشت:



نمودار بلوکی ساده شده موتور DC تحریک جداگانه با کنترل ولتاژ آرمیچر

➤ تابع تبدیل کنترلی موتور تحریک جداگانه (کنترل میدان تحریک):

در روش کنترل میدان تحریک از کاهش شار برای افزایش سرعت استفاده می‌شود:

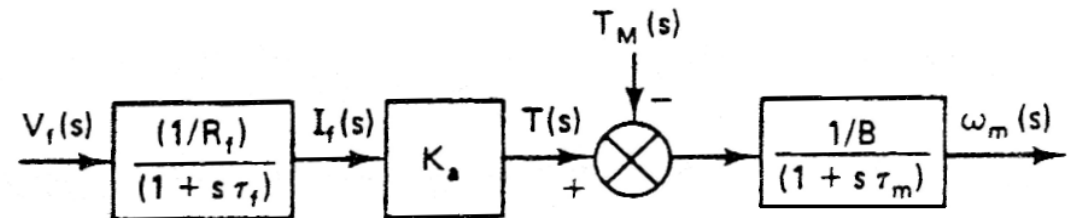
$$v_f = R_f i_f + L_f \frac{di_f}{dt} \quad (27)$$

$$T = K_a i_f \quad (28)$$

$$J \frac{d\omega_m}{dt} = K_a i_f - T_M - B\omega_m \quad (29)$$

$$\Rightarrow I_f(s) = \frac{V_f(s)}{R_f(1 + s\tau_f)} \quad (30)$$

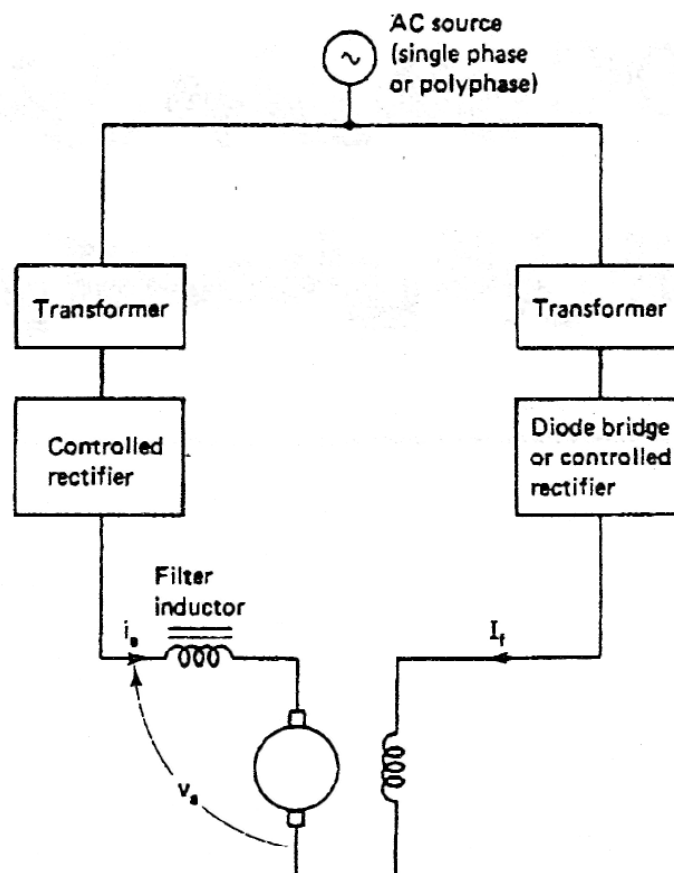
$$\omega_m(s) = \frac{T(s) - T_M(s)}{B(1 + s\tau_m)} \quad (31)$$



نمودار بلوکی موتور DC تحریک جداگانه با کنترل میدان تحریک

□ کنترل موتورهای DC با یکسوکننده های قابل کنترل

کاربرد: در مواردی که یک محدوده وسیع کنترل سرعت و یا راه اندازیهای مکرر و تعویض جهت چرخش مورد نیاز است.



شکل ۳-۱ نمودار خطی یک محرکه موتور dc تغذیه شده با یک یکسوکننده قابل کنترل

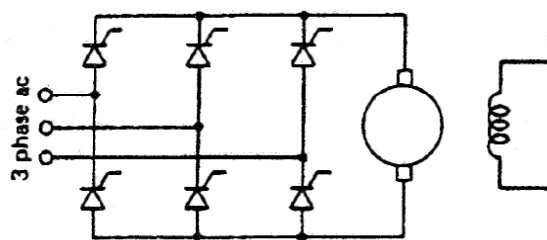
□ کنترل موتورهای DC با یکسوکننده های قابل کنترل

➤ مدارهای یکسوکننده قابل کنترل:

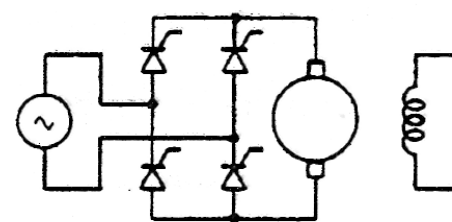
❖ انواع یکسوکننده ها از نظر تغذیه: با منبع تکفاز، با منبع سه فاز

• یکسوکننده های تکفاز: تا محدوده توان ۱۰ kW از آنها استفاده می گردد.

• یکسوکننده های سه فاز: قدرت های بالاتر از ۱۰ kW

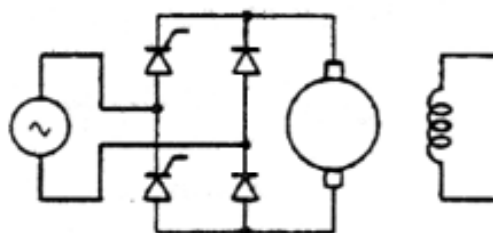


(ب) یکسوساز سه فاز

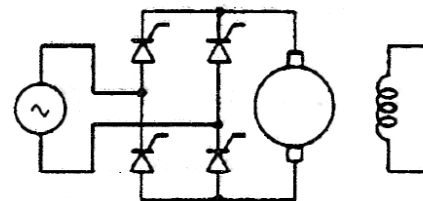


(الف) یکسوساز تکفاز

❖ انواع یکسوکننده ها از نظر قابلیت کنترلی: تمام کنترل شده، نیمه کنترل شده



(ب) یکسوساز نیمه کنترل شده



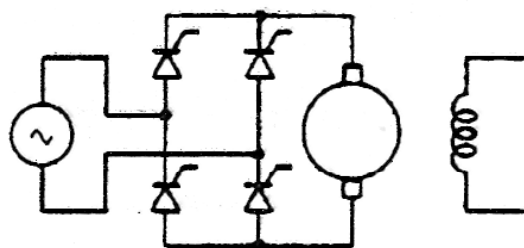
(الف) یکسوساز تمام کنترل شده



دانشگاه کاشان

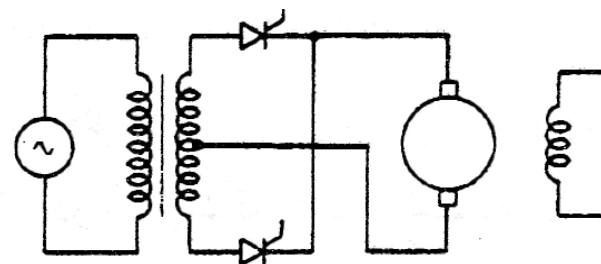
□ کنترل موتورهای DC با یکسوکننده های قابل کنترل

➤ مدارهای یکسوکننده تمام کنترل شده:

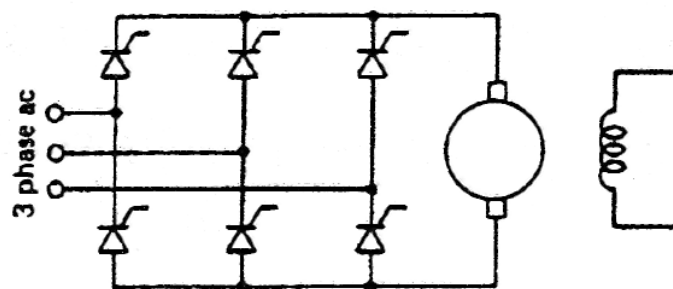


(ب) یکسوساز ۲ پالسه پل

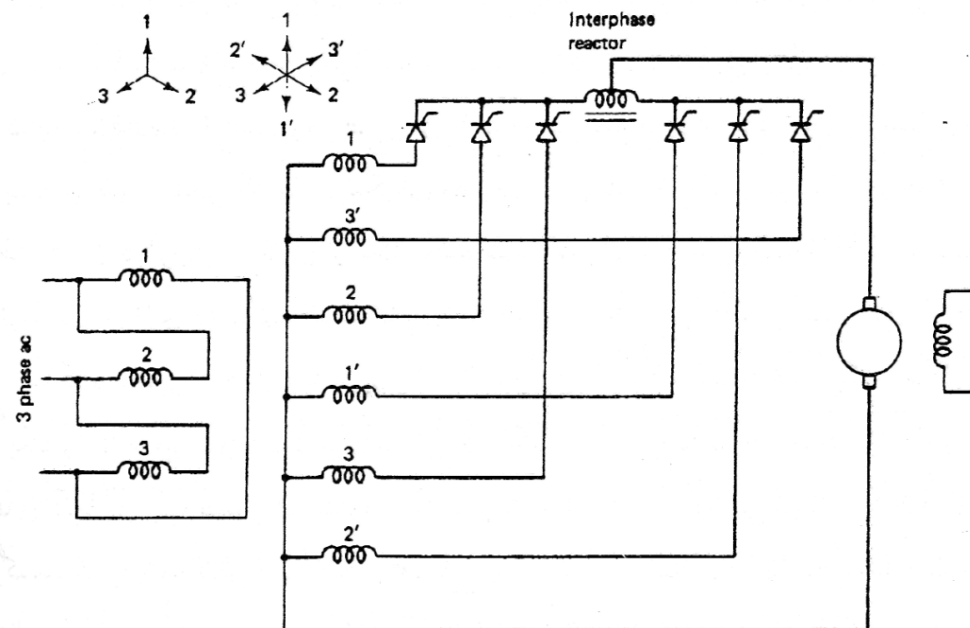
دلیل استفاده از ترانس: تطبیق ولتاژ
عیب استفاده از ترانس: حجم و قیمت زیاد



(الف) یکسوساز ۲ پالسه با ترانس سر وسط



(ج) یکسوساز ۶ پالسه پل

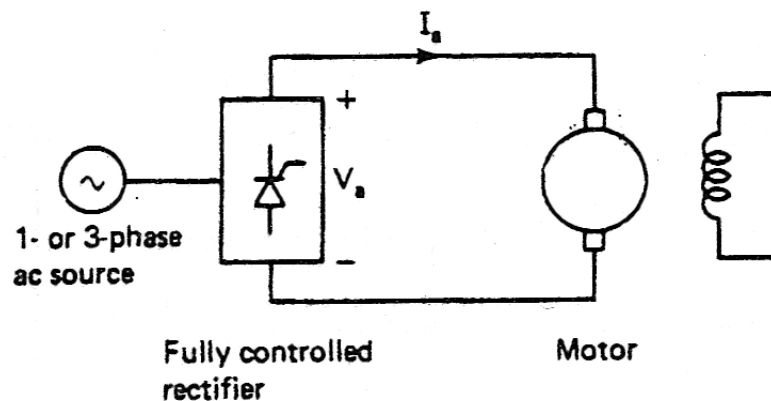


(د) یکسوساز ۶ پالسه با ترانس سر وسط

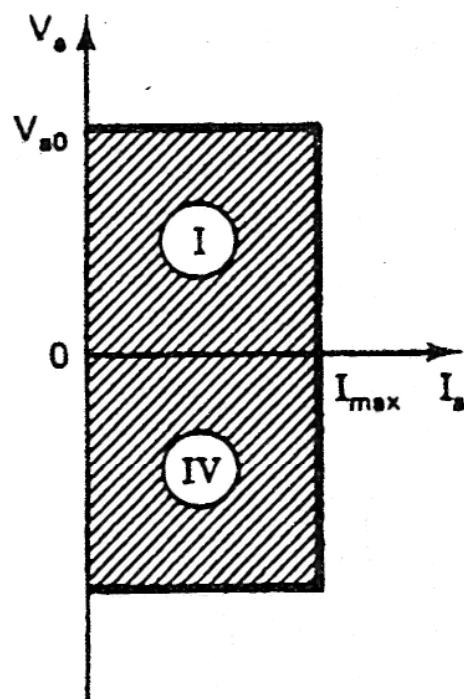
عملکرد ۱۲ پالسه: از موازی کردن کردن دو مبدل ۶ پالسه با ترانس سروسط بدست می آید. سیم پیچهای اولیه این دو ترانس یکی ستاره و دیگری مثلث هستند.

□ کنترل موتورهای DC با یکسوکننده های قابل کنترل

... مدارهای یکسوکننده تمام کنترل شده:

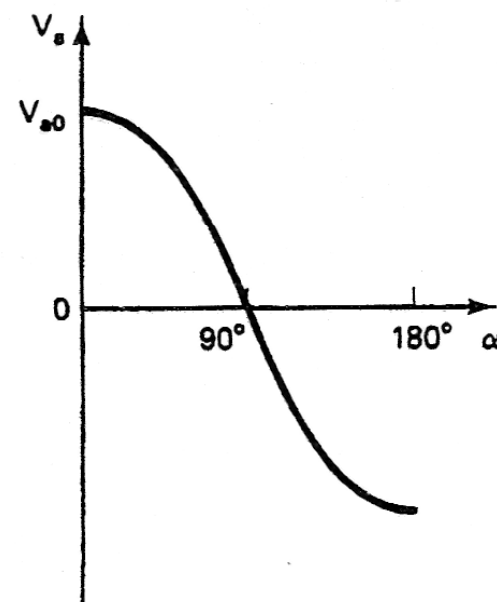


(الف) نمودار خطی یکسوساز تمام کنترل شده



(ج) نواحی کار یکسوساز تمام کنترل شده

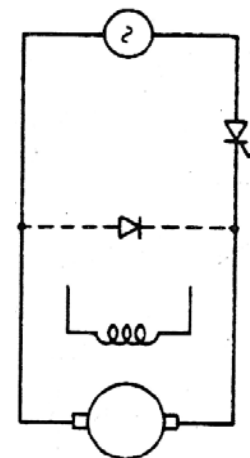
حالت هدایت پیوسته: حالتی که جریان آرمیچر هیچگاه صفر نمی گردد.
مقدار α : در عمل بین ۰ تا ۱۷۰ درجه محدود می شود تا از ایجاد خطای کموتاسیون ترستورها جلوگیری شود.



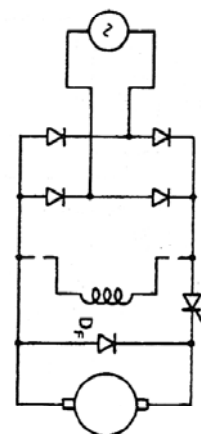
(ب) منحنی ولتاژ خروجی بر حسب زاویه آتش α
در حالت هدایت پیوسته

□ کنترل موتورهای DC با یکسوکننده های قابل کنترل

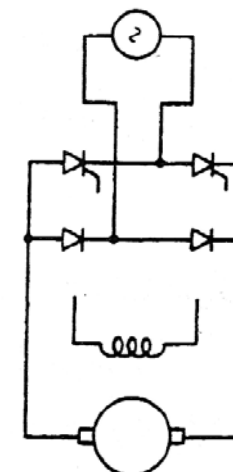
➤ مدارهای یکسوکننده نیمه کنترل شده:



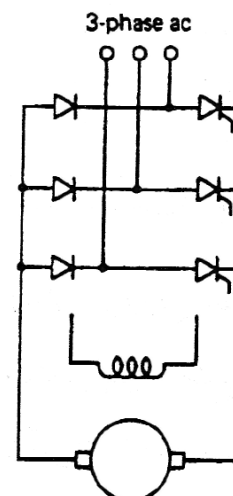
(الف) یکسوساز ۱ پالسه



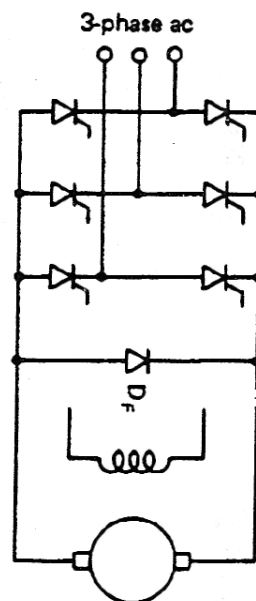
(ج) یکسوساز ۲ پالسه با یک تریستور



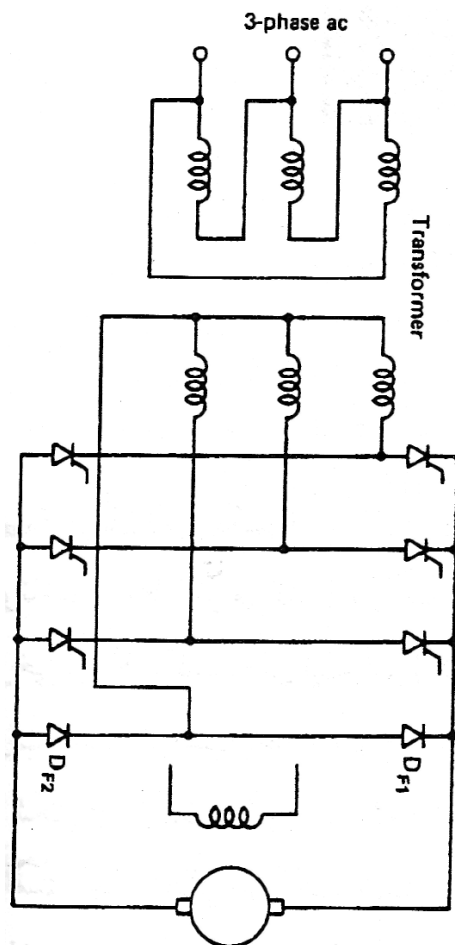
(ب) یکسوساز ۲ پالسه



(د) یکسوساز ۳ پالسه



(و) یکسوساز ۶ پالسه با دیود هرزه گرد



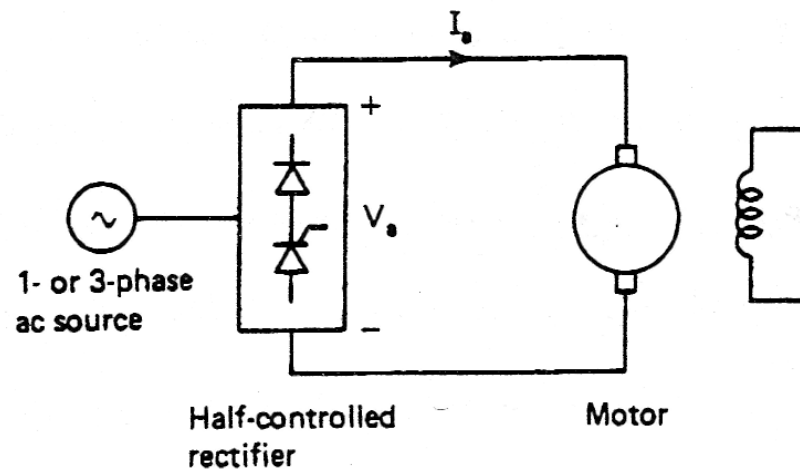
(ه) یکسوساز ۶ پالسه با دو دیود هرزه گرد



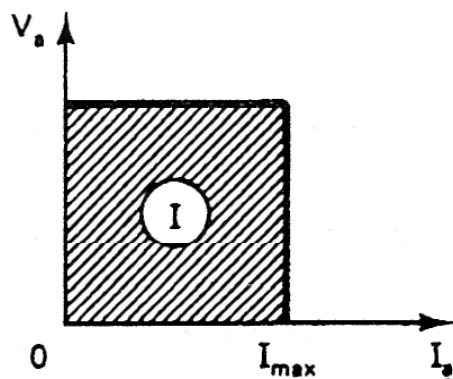
دانشگاه کاشان

□ کنترل موتورهای DC با یکسوکننده های قابل کنترل

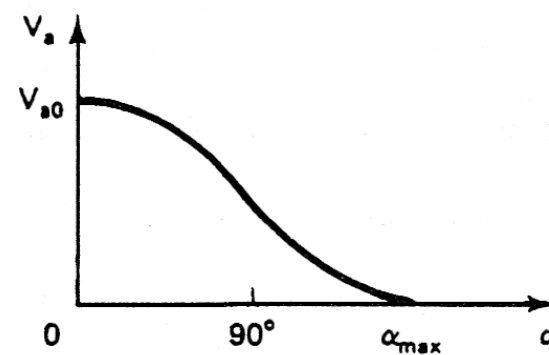
... مدارهای یکسوکننده نیمه کنترل شده:



(الف) نمودار خطی یکسوساز نیمه کنترل شده



(ج) نواحی کار یکسوساز نیمه کنترل شده

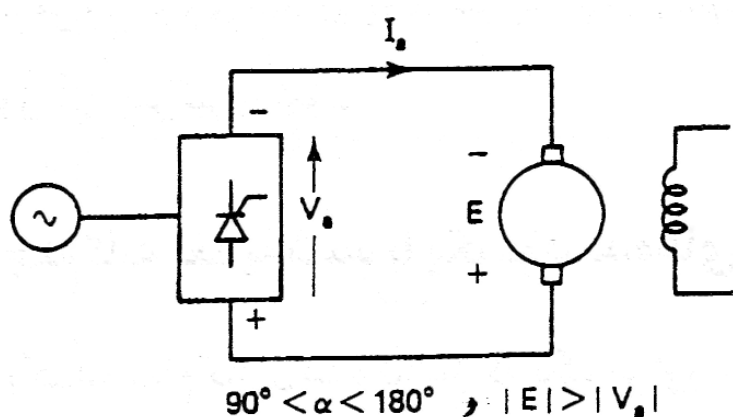


(ب) منحنی ولتاژ خروجی بر حسب زاویه آتش α

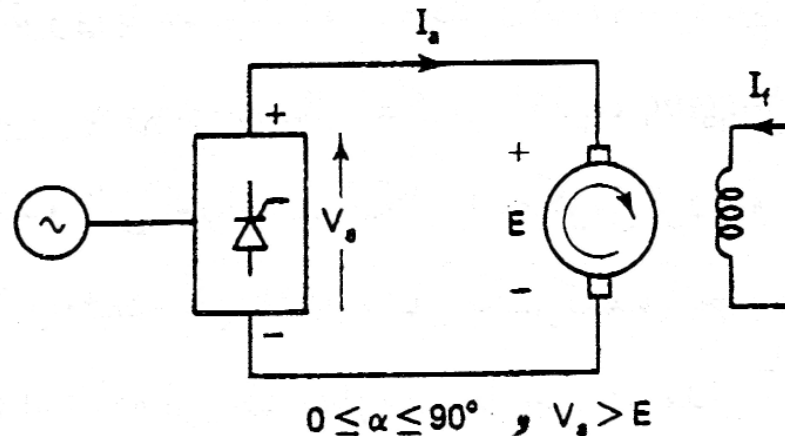
در حالت هدایت پیوسته

□ کنترل موتورهای DC با یکسوکننده های قابل کنترل

➤ کار ترمزی موتور تحریک مستقل با یکسوسازها:



(ب) عملکرد ترمز ژنراتوری در حالت استفاده از یکسوساز تمام کنترل شده



(الف) عملکرد موتوری در حالت استفاده از یکسوساز تمام کنترل شده

✓ چگونگی ایجاد عملکرد ترمز ژنراتوری: برای این منظور جهت جریان باید عوض شود، اما در یکسوساز این کار غیرممکن است. لذا با تنظیم زاویه α بین ۹۰ تا ۱۸۰ درجه، به نحوی که شرط $E > V$ همواره صادق باشد، توان dc وارد شده به مدار یکسوساز به منبع ac منتقل می شود.

✓ چگونگی معکوس نمودن ولتاژ القایی E: (۱) ممکن است یک بار فعال متصل شده به محور موتور آنرا در جهت معکوس بچرخاند. (۲) ممکن است جریان تحریک معکوس شود (حالت ژنراتوری مستقیم)، (۳) معکوس نمودن اتصالات آرمیچر به سرهای یکسوساز

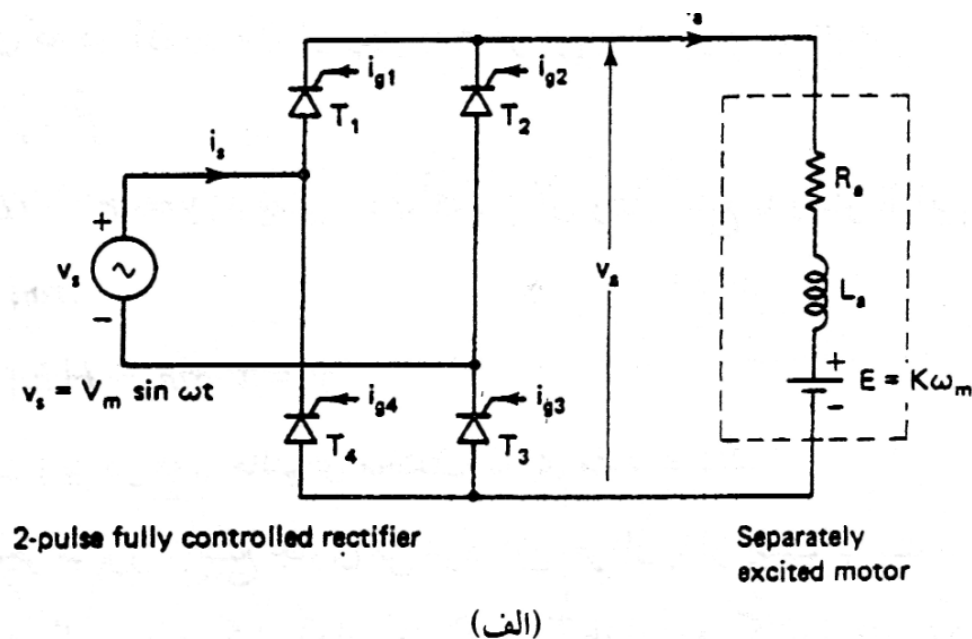
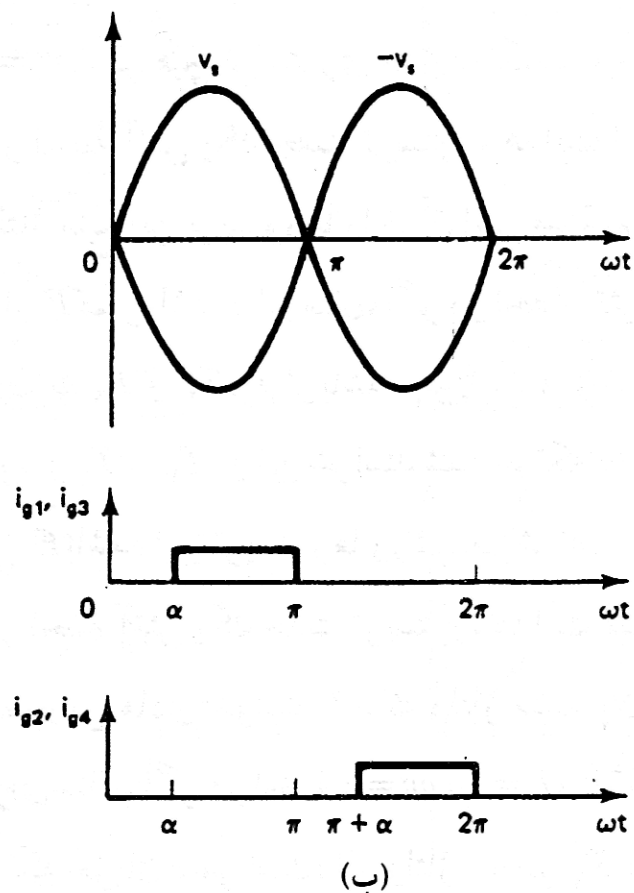
✓ ترمز ژنراتوری در یکسوساز نیمه کنترل شده: امکان پذیر نمی باشد، چون ولتاژ خروجی را نمی توان معکوس نمود. ترمز به روش اتصال معکوس تغذیه (Plugging) قابل اجراست. این کار با معکوس نمودن ولتاژ E به هریک از روش های فوق و مثبت نگهداشتن V قابل انجام است.



دانشگاه کاشان

□ کنترل موتورهای DC با یکسوکننده های قابل کنترل

➤ تحلیل موتور تحریک مستقل تغذیه شده با یکسوساز تمام کنترل شده تکفاز:



✓ ترستورهای ۱ و ۳ از α تا π و ترستورهای ۲ و ۴ از $\alpha + \pi$ تا 2π پالسهای فرمان را دریافت می کنند.



دانشگاه کاشان

□ تحلیل موتور تحریک مستقل تغذیه شده با یکسوساز تمام کنترل شده تکفاز

➤ چند اصطلاح و علامت:

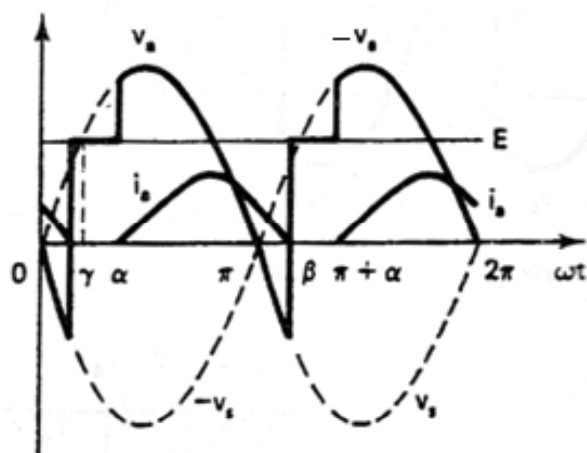
✓ حالت ناپیوسته جریان: اگر جریان آرمیچر i_a برای یک مدت زمان محدود در هر سیکل صفر شود.

β = زاویه ای است که در آن جریان آرمیچر به صفر می رسد.

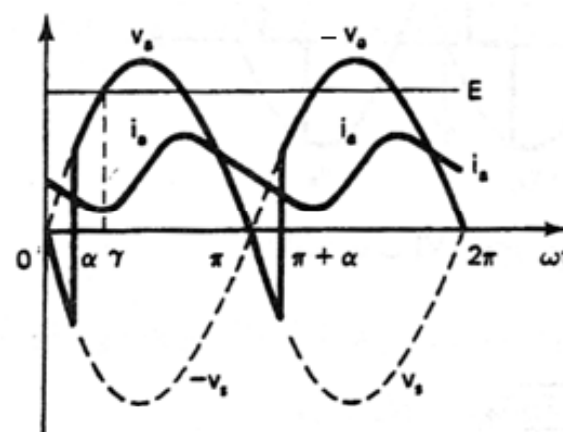
$$\beta' = \beta - \pi = \text{مکمل } \beta.$$

$\gamma = \sin^{-1}(E/V_m) =$ زاویه ای است که در آن ولتاژ منبع با ولتاژ القایی E برابر می شود.

$$\gamma' = \pi - \gamma = \text{مکمل } \gamma.$$



(ب) حالت ناپیوسته جریان

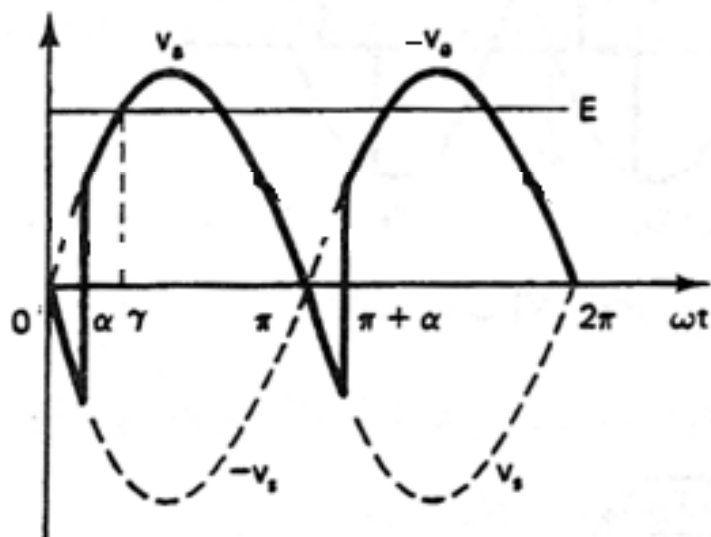


(الف) حالت پیوسته جریان

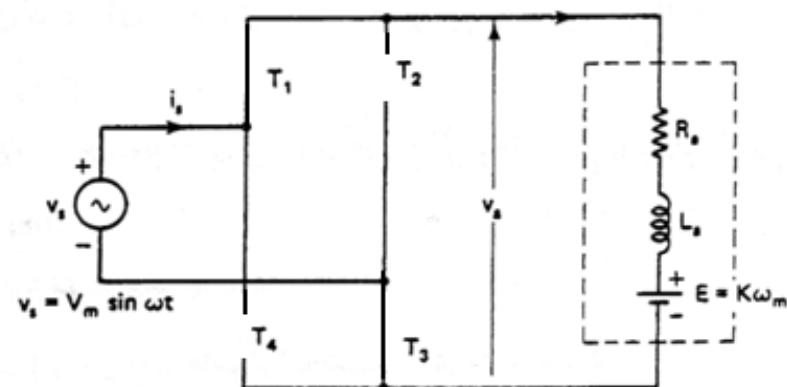
تحلیل موتور تحریک مستقل تغذیه شده با یکسوساز تمام کنترل شده تکفاز

چند نکته:

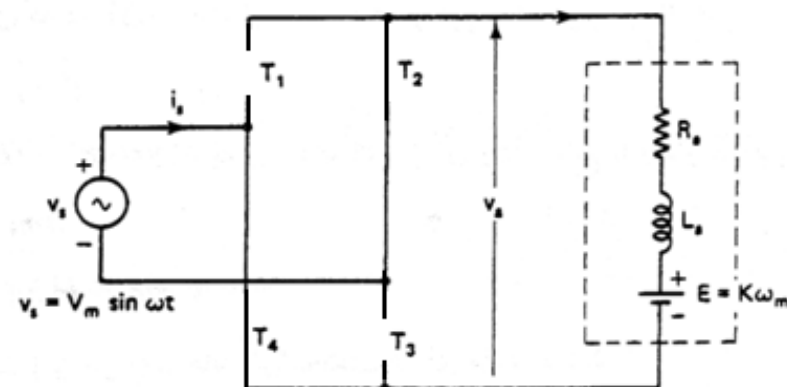
۱- مقدار ولتاژ آرمیچر V_a : در صورت هدایت ترستورهای T_1 و T_3 ، $V_a = -V_s$ است و اگر T_2 و T_4 هدایت کنند، $V_a = -V_s$ می باشد.



✓ اگر هیچ ترستوری هدایت نکند، $i_a = 0$ و $V_a = E$ خواهد بود.



(الف) هدایت T_1 و T_3



(ب) هدایت T_2 و T_4

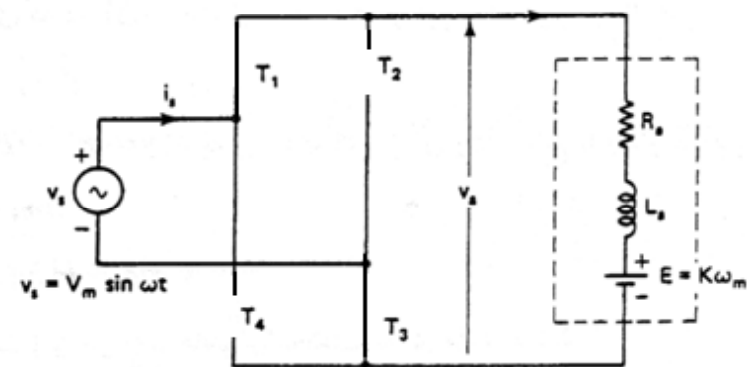
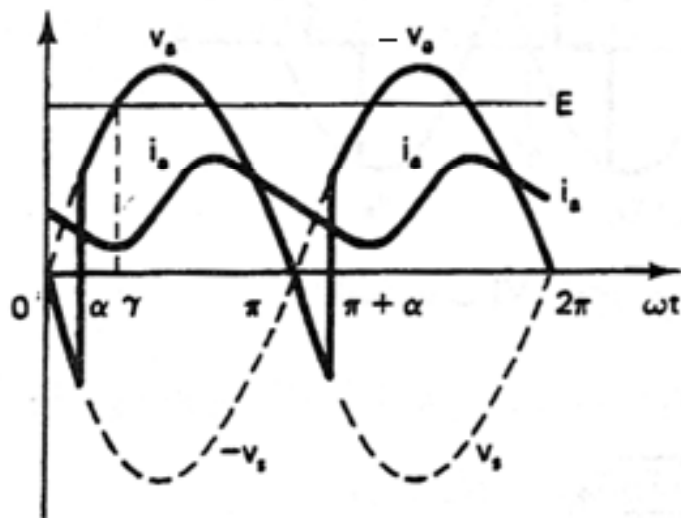


دانشگاه کاشان

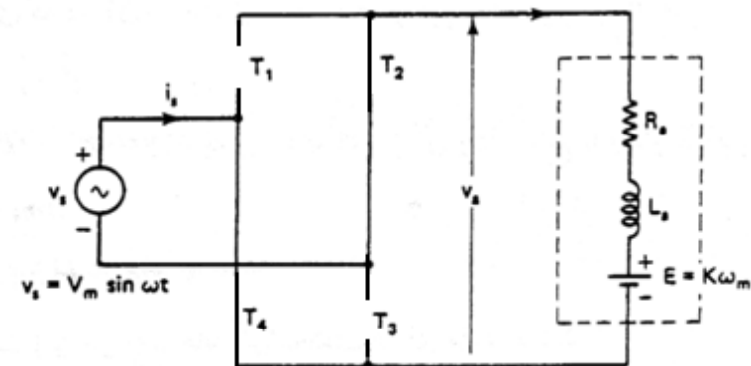
□ تحلیل موتور تحریک مستقل تغذیه شده با یکسوساز تمام کنترل شده تکفاز

... چند نکته:

۲- هدایت ترستورها اگر $i_a > 0$: هنگامیکه $i_a > 0$ است، در لحظه آتش یک جفت ترستور، هدایت ترستورها فقط به ولتاژ منبع V_s بستگی دارد. اگر ولتاژ منبع، این ترستورها را در گرایش مستقیم قرار دهد، آنها هادی می شوند حتی اگر ولتاژ منبع از E کمتر شود.



(الف) هدایت T_1 و T_3



(ب) هدایت T_2 و T_4



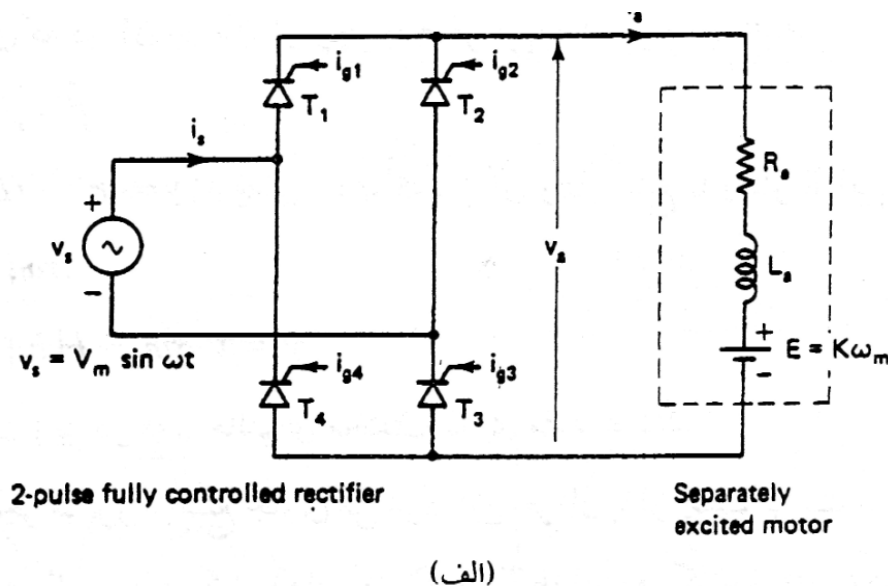
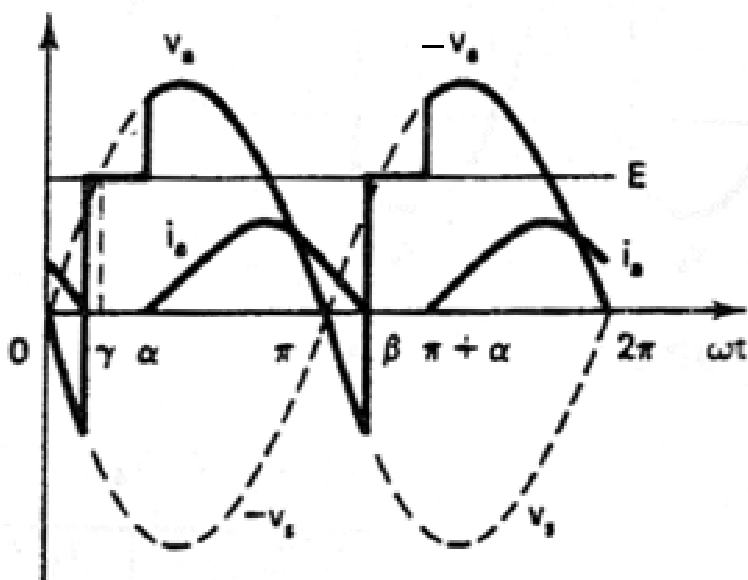
دانشگاه کاشان

□ تحلیل موتور تحریک مستقل تغذیه شده با یکسوساز تمام کنترل شده تکفاز

... چند نکته:

۳- شرط هدایت تریستورها اگر $i_a = 0$ (حالت هدایت ناپیوسته): هنگامیکه $i_a = 0$ است، در لحظه آتش یک جفت تریستور، هدایت آنها به ولتاژ منبع v_s و E بستگی دارد. اگر ولتاژ منبع از E بزرگتر باشد، این تریستورها وصل خواهند شد.

شرط فوق به این معناست که برای زوایای $\alpha > \gamma$ یعنی $v_s > E$ تریستورهای T_3 و T_1 هدایت خواهند نمود.





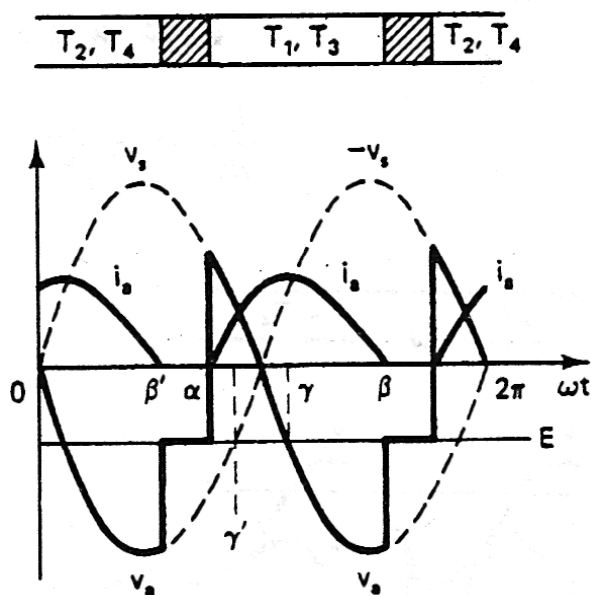
دانشگاه کاشان

□ تحلیل موتور تحریک مستقل تغذیه شده با یکسوساز تمام کنترل شده تکفاز

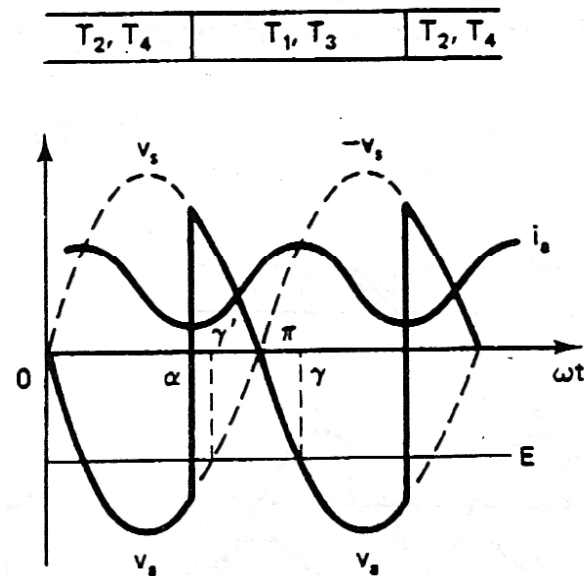
... چند نکته:

۴- **حالت ترمز ژنراتوری:** با تغییر جهت E توسط هر کدام از روش های بیان شده در اسلاید ۳۴ و تنظیم زاویه α بنحویکه متوسط ولتاژ خروجی مبدل V_a منفی شود، بدست می آید.

(در شکلهائی که ولتاژ ضدمحر که E مثبت است، مربوط به حالت موتوری و در شکلهائی که E منفی است، حالت ژنراتوری است.)



(ب) حالت ناپیوسته جریان در شرایط ترمز ژنراتوری



(الف) حالت پیوسته جریان در شرایط ترمز ژنراتوری



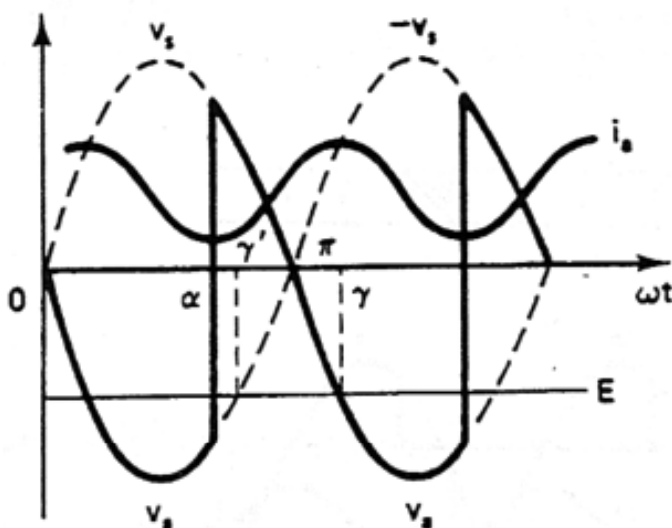
تحلیل موتور تحریک مستقل تغذیه شده با یکسوساز تمام کنترل شده تکفاز

... چند نکته:

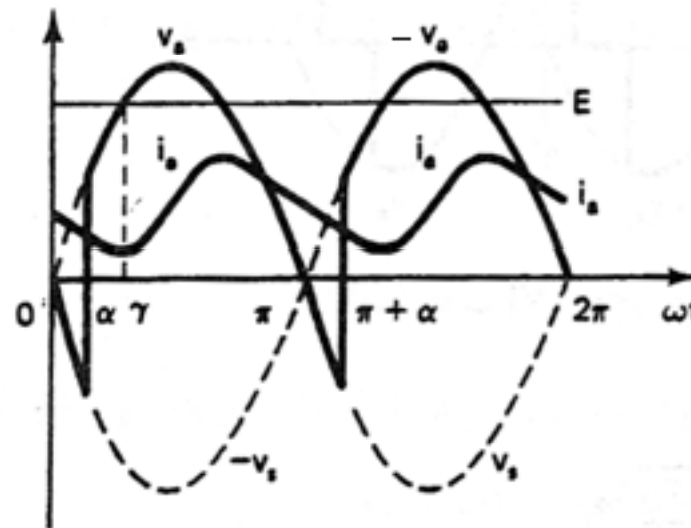
۵- نرخ تغییرات جریان: توسط معادله روبرو بدست می آید:

$$\frac{di_a}{dt} = \frac{1}{L_a} [v_a - (E + i_a R_a)] \quad (32)$$

اگر از افت ولتاژ آرمیچر صرف نظر شود، هرگاه $V_a > E$ باشد، شیب جریان مثبت و در غیر این صورت منفی است. حداکثر مقدار i_a برای کار موتوری در لحظه $\omega t = \pi - \gamma$ و برای کار ژنراتوری در لحظه $\omega t = \gamma$ اتفاق می افتد.



(ب) حالت پیوسته جریان در شرایط ژنراتوری



(الف) حالت پیوسته جریان در شرایط موتوری

اگر افت ولتاژ روی مقاومت آرمیچر در نظر گرفته شود، حداکثر جریان i_a کمی زودتر از لحظات فوق اتفاق می افتد.

□ تحلیل موتور تحریک مستقل تغذیه شده با یکسوساز تمام کنترل شده تکفاز

➤ حالت های کاری در شرایط موتوری:

حالت I: این یک حالت پیوسته جریان است. ممکن است α بزرگتر یا کوچکتر از γ باشد.

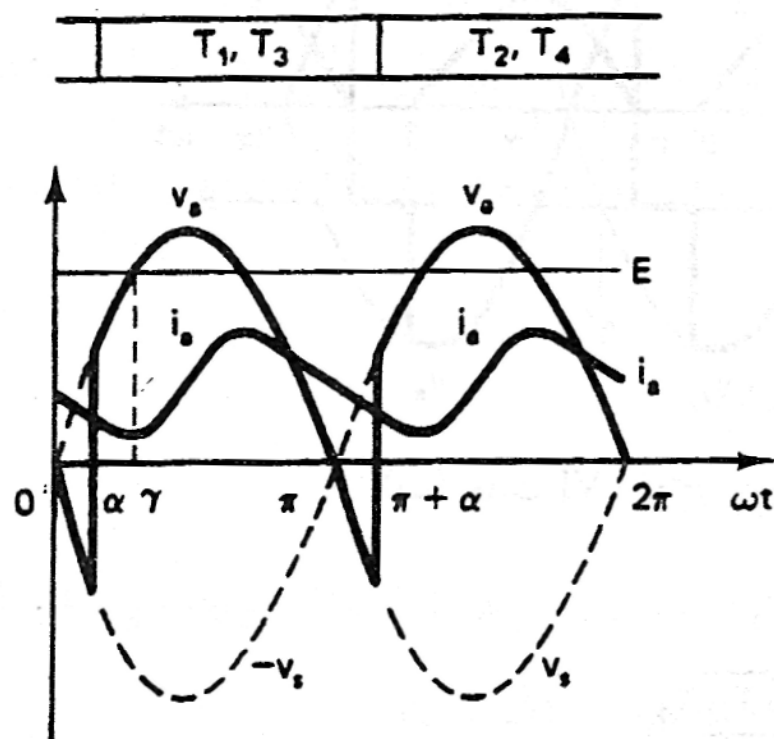
$$v_s = E + i_a R_a + L_a \frac{di_a}{dt} \quad (33)$$

با ضرب طرفین در $i_a \Delta t$ داریم:

$$v_s i_a \Delta t = E i_a \Delta t + i_a^2 R_a \Delta t + L_a i_a \left(\frac{di_a}{dt} \right) \Delta t \quad (34)$$

توزیع انرژی دریافتی از منبع:

- ۱- کار مکانیکی
- ۲- اتلاف حرارتی مقاومت آرمیچر
- ۳- انرژی الکترومغناطیسی ذخیره شده در سیم پیچ



(الف) حالت I، $\alpha < \gamma$ یا $\alpha > \gamma$

برای حالت $\alpha < \gamma$ ، چون در زاویه $\omega t = \alpha$ ، $i_a > 0$ است، حتی اگر $V_s < E$ باشد، می توان T_1 و T_3 را هادی نمود.



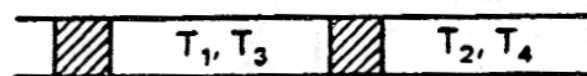
دانشگاه کاشان

□ تحلیل موتور تحریک مستقل تغذیه شده با یکسوساز تمام کنترل شده تکفاز

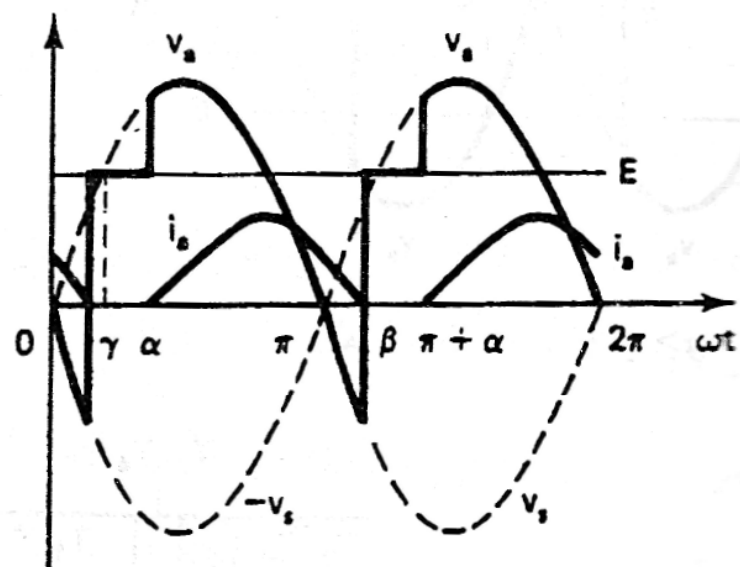
... حالت های کاری در شرایط موتوری:

غیر از حالت هدایت پیوسته، سه حالت هدایت ناپیوسته II، III یا IV می تواند اتفاق بیفتد که در ادامه شرح داده می شوند.

حالت II: حالت هدایت ناپیوسته که $\alpha > \gamma$ است.



جریان در فاصله α تا β جاری است و در فاصله β تا $\pi + \alpha$ قطع صفر باقی می ماند.



(ب) حالت II، $\alpha > \gamma$

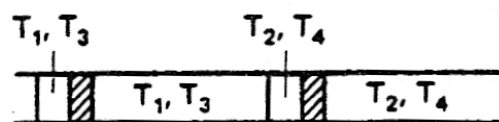
این حالت کاری هنگامی اتفاق می افتد که L_a کوچک باشد و در نتیجه اندوکتانس توانائی لازم برای برقرار نگهداشتن جریان آرمیچر را ندارد.

□ تحلیل موتور تحریک مستقل تغذیه شده با یکسوساز تمام کنترل شده تکفاز

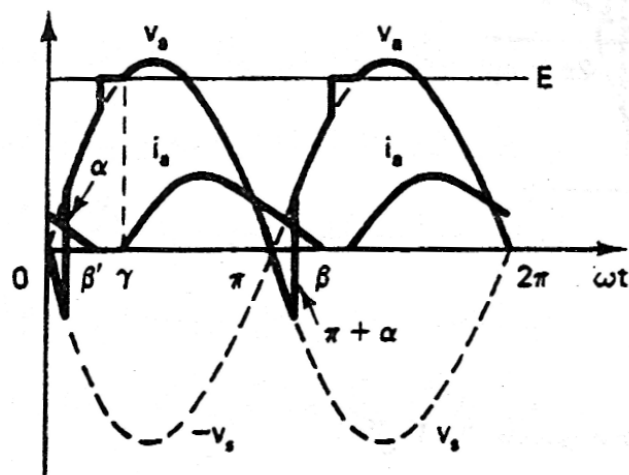
... حالت های کاری در شرایط موتوری:

حالت III: حالت هدایت ناپیوسته که $\alpha < \gamma$ است.

- چون در لحظه $\omega t = \alpha$ ، جریان $i_a > 0$ است، ترستورهای T_1 و T_3 حتی اگر $v_s < E$ باشد، هادی می شوند.
- بعد از صفر شدن جریان در زمان β' چون $v_s < E$ است، ترستورهای فوق قطع می شوند.
- وصل مجدد این ترستورها وقتی اتفاق می افتد که $v_s > E$ شود. در این حالت، هنوز فرمان ترستورها برقرار است.



- این حالت کاری در مقادیر کم گشتاور و α رخ می دهد.



(ج) حالت III، $\alpha < \gamma$



دانشگاه کاشان

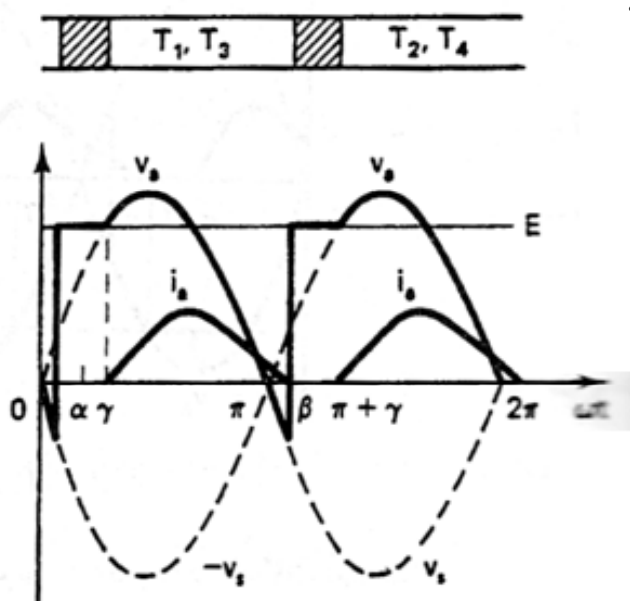
□ تحلیل موتور تحریک مستقل تغذیه شده با یکسوساز تمام کنترل شده تکفاز

... حالت های کاری در شرایط موتوری:

حالت IV: حالت دیگر هدایت ناپیوسته که $\alpha < \gamma$ است.

- چون در لحظه $\omega t = \alpha$ ، جریان $i_a = 0$ است، ترستورهای T_1 و T_3 تا زمانیکه $v_s < E$ است، روشن نمی شوند.
- این دو پس از ایجاد $v_s > E$ (یعنی قرار گرفتن در گرایش مستقیم) روشن می شوند.

- این حالت کاری در مقادیر کم گشتاور و α و هنگامیکه L_a کوچک است، رخ می دهد.



(د) حالت IV، $\alpha < \gamma$



دانشگاه کاشان

تحلیل موتور تحریک مستقل تغذیه شده با یکسوساز تمام کنترل شده تکفاز

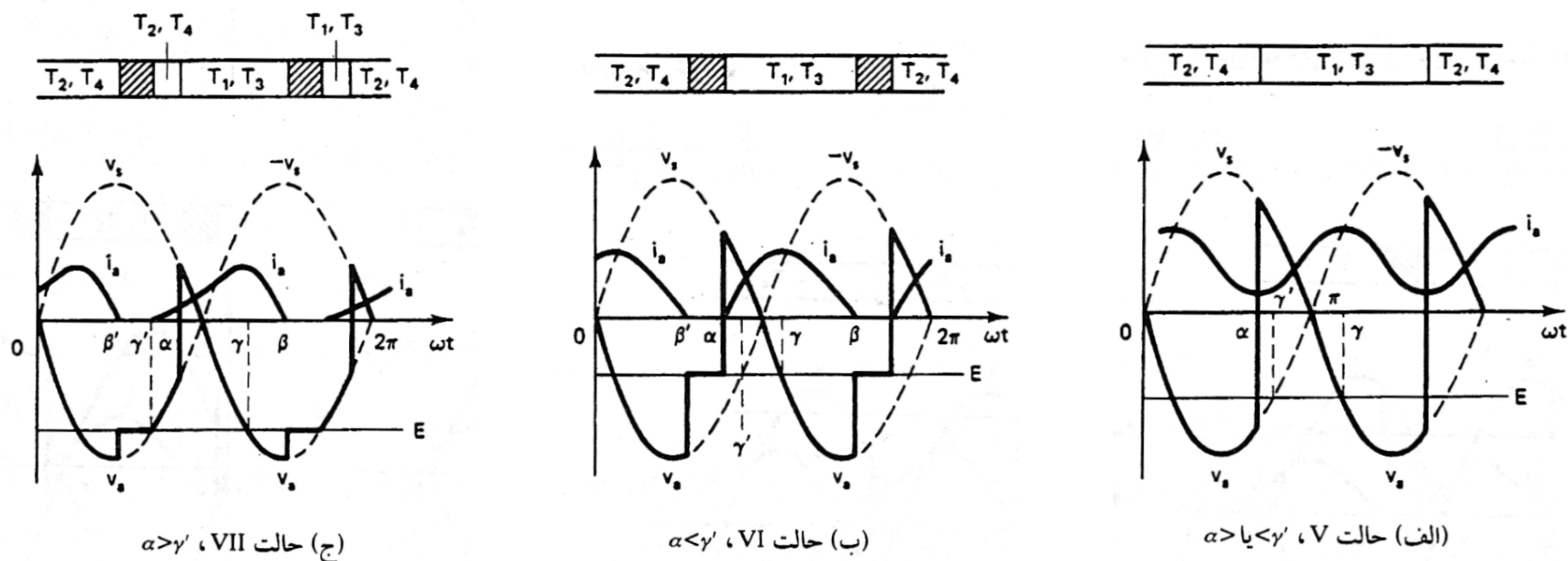
➤ حالت های کاری در شرایط ترمز ژنراتوری:

حالت V: حالت هدایت پیوسته در شرایط ترمزی است که دوگان حالت I می باشد.

حالت VI: یک حالت هدایت ناپیوسته است که دوگان حالت II می باشد.

حالت VII: حالت دیگر هدایت ناپیوسته است و فقط وقتی بوجود می آید که از پالسهای گیت پهن استفاده شود.

توجه: در شرایط ترمز ژنراتوری، ولتاژ ضدمحرکه منفی است که با منفی کردن علامت K و یا ω_m بدست می آید. منفی کردن K با معکوس کردن تحریک حاصل می شود.





دانشگاه کاشان

□ تحلیل موتور تحریک مستقل تغذیه شده با یکسوساز تمام کنترل شده تکفاز

➤ معادلات موتور در حالت دائمی:

❖ چند فرض ساده کننده:

(۱) ترستورها کلیدهای ایده آل هستند. یعنی افت ولتاژ حالت هدایت ندارند و در حالت قطع نیز جریان ناشی ندارند.

(۲) مقاومت و اندوکتانس آرمیچر مقادیر ثابتی هستند.

(۳) از نوسانات سرعت ناشی از تغییر گشتاور صرفنظر شده و سرعت موتور ثابت در نظر گرفته می شود.

❖ چند تعریف:

(۱) دوره وظیفه (Duty Cycle): در این دوره یکی از دو زوج ترستورها هادی هستند و ولتاژ V_s منبع ac به موتور متصل است.

(۲) دوره زمانی جریان صفر: در این دوره جریان آرمیچر صفر است و ولتاژ ترمینال موتور برابر با E است.

□ تحلیل موتور تحریک مستقل تغذیه شده با یکسوساز تمام کنترل شده تکفاز

... معادلات موتور در حالت دائمی:

❖ معادلات در دوره وظیفه:

$$v_a = L_a \frac{di_a}{dt} + i_a R_a + K\omega_m = V_m \sin \omega t \quad (35)$$

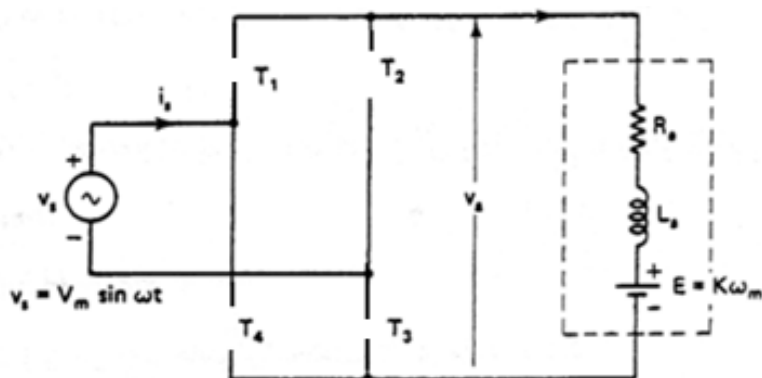
وقتی T_1 و T_3 هدایت می کنند:

$$v_a = L_a \frac{di_a}{dt} + i_a R_a + K\omega_m = -V_m \sin \omega t \quad (36)$$

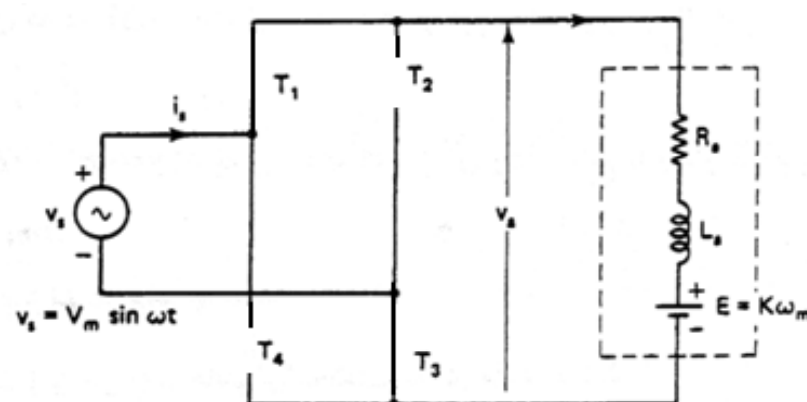
وقتی T_2 و T_4 هدایت می کنند:

$$\begin{aligned} i_a &= 0 \\ v_a &= K\omega_m \end{aligned} \quad (37)$$

❖ معادلات در دوره زمانی جریان صفر:



(الف) دوره زمانی جریان صفر



(الف) دوره وظیفه

□ تحلیل موتور تحریک مستقل تغذیه شده با یکسوساز تمام کنترل شده تکفاز

... معادلات موتور در حالت دائمی:

❖ معادلات حالت I (جریان پیوسته):

$$L_a \frac{di_a}{dt} + i_a R_a + K\omega_m = V_m \sin \omega t \quad (38)$$

$$L_a \frac{di_a}{dt} + i_a R_a = V_m \sin \omega t - K\omega_m \quad (39)$$

پاسخ جریان ناشی از دو منبع سینوسی و E را باید بدست آورد
یعنی معادله روبرو را حل کرد:

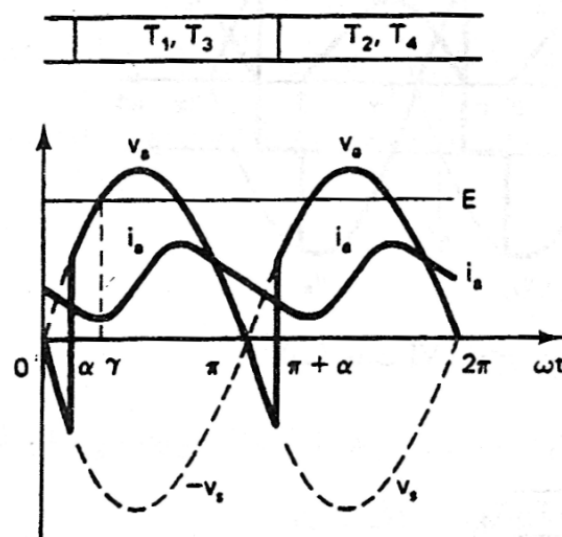
از حل معادله فوق و با فرض $i_a(\alpha) = i_a(\pi + \alpha)$ بدست می آوریم:

$$i_a(\omega t) = \frac{V_m}{Z} \left[\sin(\omega t - \psi) - \frac{2 \sin(\alpha - \psi)}{1 - e^{-\pi \cot \psi}} e^{(\alpha - \omega t) \cot \psi} \right] - \frac{K\omega_m}{R_a} \quad (40)$$

$$\therefore \alpha \leq \omega t \leq (\pi + \alpha)$$

$$\begin{cases} \psi = \tan^{-1}(\omega L_a / R_a) \\ Z = \sqrt{R_a^2 + (\omega L_a)^2} \end{cases} \quad (41)$$

که در معادله فوق داریم:



(الف) حالت I، $\alpha > \gamma$

□ تحلیل موتور تحریک مستقل تغذیه شده با یکسوساز تمام کنترل شده تکفاز

... معادلات موتور در حالت دائمی:

نکته: چون شار ثابت است، مقدار متوسط گشتاور فقط به مولفه dc جریان آرمیچر بستگی دارد و بخشهای سینوسی فقط گشتاور ضربانی ایجاد می کنند. لذا مقدار متوسط جریان را در نظر می گیریم.

$$I_a = \frac{1}{\pi} \int_{\alpha}^{\pi+\alpha} i_a(\omega t) d(\omega t)$$

$$I_a = \frac{(2V_m / \pi) \cos \alpha - K \omega_m}{R_a} \quad (42)$$

با محاسبه انتگرال فوق خواهیم داشت:

$$\omega_m = \frac{2V_m}{K\pi} \cos \alpha - \frac{R_a}{K^2} T_a \quad (43)$$

با جایگزینی رابطه فوق در رابطه KVL ولتاژ می توانیم بدست آوریم:

معادله فوق، رابطه سرعت و گشتاور را در حالت هدایت جریان پیوسته نشان می دهد.

تحلیل موتور تحریک مستقل تغذیه شده با یکسوساز تمام کنترل شده تکفاز

... معادلات موتور در حالت دائمی:

❖ معادلات حالت ناپیوسته II:

برای هر سیکل ولتاژ خروجی از α تا $\pi + \alpha$ دوره وظیفه از α تا β و دوره جریان صفر از β تا $\pi + \alpha$ است. با شرط اولیه $i_a(\alpha) = 0$ جریان i_a از رابطه زیر بدست می آید:

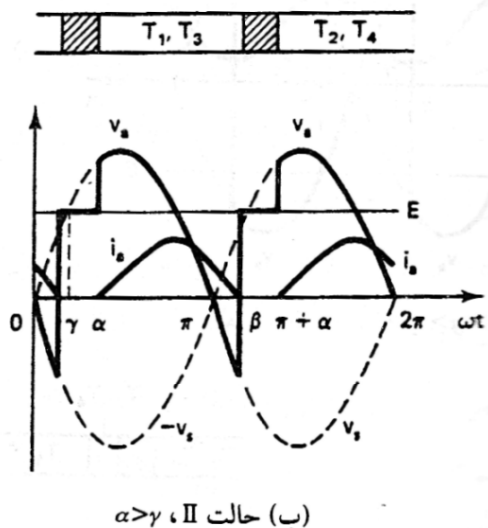
$$i_a(\omega t) = \frac{V_m}{Z} [\sin(\omega t - \psi) - \sin(\alpha - \psi)e^{(\alpha - \omega t)\cot\psi}] - \frac{K\omega_m}{R_a} [1 - e^{(\alpha - \omega t)\cot\psi}] \quad \therefore \alpha \leq \omega t \leq \beta \quad (44)$$

با شرط $i_a(\beta) = 0$ زاویه β از حل معادله غیرخطی زیر به روش سعی و خطا بدست می آید:

$$\frac{V_m}{Z} \sin(\beta - \psi) - \frac{K\omega_m}{R_a} + \left[\frac{K\omega_m}{R_a} - \frac{V_m}{Z} \sin(\alpha - \psi) \right] e^{(\alpha - \beta)\cot\psi} = 0 \quad (45)$$

در نتیجه آن جریان و گشتاور از روابط زیر قابل محاسبه اند:

$$\begin{cases} I_a = \frac{V_m (\cos \alpha - \cos \beta) - (\beta - \alpha) K \omega_m}{\pi R_a} \\ \omega_m = \frac{V_m (\cos \alpha - \cos \beta)}{K (\beta - \alpha)} - \frac{\pi R_a}{K^2 (\beta - \alpha)} T_a \end{cases} \quad (46)$$





دانشگاه کاشان

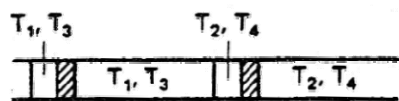
□ تحلیل موتور تحریک مستقل تغذیه شده با یکسوساز تمام کنترل شده تکفاز

... معادلات موتور در حالت دائمی:

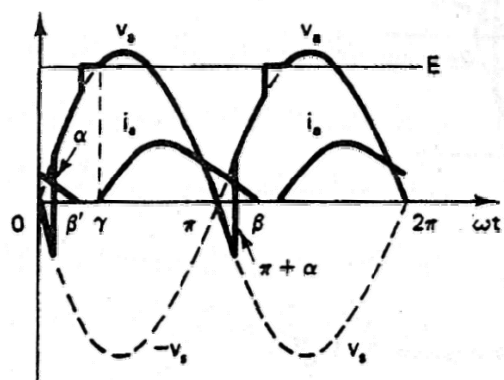
❖ معادلات حالت ناپیوسته III:

برای هر سیکل ولتاژ خروجی از γ تا $\pi+\gamma$ دوره وظیفه از γ تا $\pi+\alpha$ با $v_a = v_s$ و یک دوره وظیفه از $\pi+\alpha$ تا β با $v_a = -v_s$ و یک دوره جریان صفر از β تا $\pi+\gamma$ است. همچنین شرایط زیر را داریم: $i_a(\gamma) = 0$ و $i_a(\beta) = 0$. لذا زاویه β از حل معادله غیرخطی زیر به روش سعی و خطا بدست می آید:

$$\frac{V_m}{Z} \sin(\beta - \psi) + 2 \sin(\alpha - \psi) e^{(\pi + \alpha - \beta) \cot \psi} + \sin(\gamma - \psi) e^{(\gamma - \beta) \cot \psi} + \frac{K \omega_m}{R_a} [1 - e^{(\gamma - \beta) \cot \psi}] = 0 \quad (47)$$



برای α و ω_m تعیین شده، β تعیین خواهد شد و در نتیجه آن جریان و گشتاور از روابط زیر قابل محاسبه اند:



(ج) حالت III، $\alpha < \gamma$

$$\begin{cases} I_a = \frac{V_m (2 \cos \alpha + \cos \gamma + \cos \beta) + (\gamma - \beta) K \omega_m}{\pi R_a} \\ \omega_m = \frac{V_m (2 \cos \alpha + \cos \gamma + \cos \beta)}{K(\beta - \gamma)} - \frac{\pi R_a}{K^2 (\beta - \gamma)} T_a \end{cases} \quad (48)$$

□ تحلیل موتور تحریک مستقل تغذیه شده با یکسوساز تمام کنترل شده تکفاز

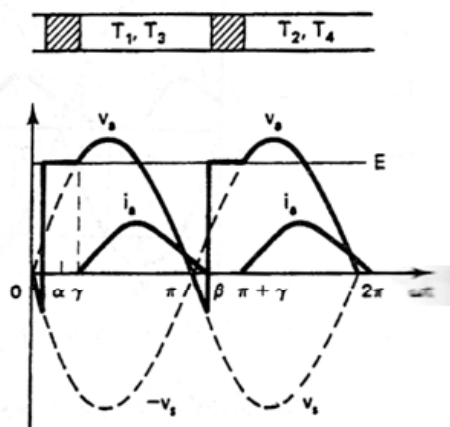
... معادلات موتور در حالت دائمی:

❖ معادلات حالت ناپیوسته IV:

این مشابه حالت II است. در این حالت جریان از زاویه γ شروع می شود (به جای زاویه α در حالت II). معادلات مربوط برای این حالت با جایگزینی α با γ در معادلات مربوط به حالت II بدست می آیند. همچنین زاویه β از حل معادله غیرخطی زیر به روش سعی و خطا بدست می آید:

$$\frac{V_m}{Z} \sin(\beta - \psi) - \frac{K\omega_m}{R_a} + \left[\frac{K\omega_m}{R_a} - \frac{V_m}{Z} \sin(\gamma - \psi) \right] e^{(\gamma - \beta) \cot \psi} = 0 \quad (49\text{-الف})$$

در نتیجه جریان و گشتاور از روابط زیر قابل محاسبه اند:



(د) حالت IV، $\alpha < \gamma$

$$\begin{cases} I_a = \frac{V_m (\cos \gamma - \cos \beta) - (\beta - \gamma) K \omega_m}{\pi R_a} \\ \omega_m = \frac{V_m (\cos \gamma - \cos \beta)}{K (\beta - \gamma)} - \frac{\pi R_a}{K^2 (\beta - \gamma)} T_a \end{cases} \quad (49\text{-ب})$$

به طریق مشابه، می توان برای حالت ترمز ژنراتوری، با تبدیل E به -E روابط متناظری استخراج نمود (صفحات ۱۲۷ و ۱۲۸ کتاب Dubey).

□ تحلیل موتور تحریک مستقل تغذیه شده با یکسوساز تمام کنترل شده تکفاز

➤ شناسایی حالت های کاری مختلف:

برای مقادیر مشخص α و ω_m ، اگر حالت کاری معلوم باشد (موتوری یا ترمز ژنراتوری)، می توان مقدار گشتاور را از روابط ارائه شده محاسبه نمود. لذا برای تعیین ناحیه کار از منطق زیر برای دو حالت موتوری و ژنراتوری استفاده می شود:

❖ حالت موتوری:

۱- بررسی کنید که آیا α از γ بزرگتر است یا نه؟ ($\gamma = \sin^{-1}(E/V_m)$)

۲- اگر $\alpha > \gamma$ ، فرض کنید $i_a(\alpha) = 0$ باشد و از رابطه (۴۴) مقدار $i_a(\pi + \alpha)$ محاسبه شود. اگر $i_a(\pi + \alpha)$ منفی باشد، نشان می دهد که جریان قبل از $\pi + \alpha$ قطع شده است. بنابراین اگر $i_a(\pi + \alpha) < 0$ باشد، حالت کار II است و در غیر این صورت I است.

۳- اگر $\alpha < \gamma$ ، فرض کنید $i_a(\gamma) = 0$ باشد و مقدار $i_a(\pi + \alpha)$ را از رابطه (*) محاسبه کنید. اگر $i_a(\pi + \alpha) \leq 0$ باشد، حالت کار IV است. اگر $i_a(\pi + \alpha) > 0$ باشد، $i_a(\pi + \gamma)$ را از رابطه (**) محاسبه کنید. اگر $i_a(\pi + \gamma) < 0$ باشد، حالت کار III است و در غیر این صورت I است.

$$i_a(\omega t) = \frac{V_m}{Z} [\sin(\omega t - \psi) - \sin(\gamma - \psi)e^{(\gamma - \omega t)\cot\psi}] - \frac{K\omega_m}{R_a} [1 - e^{(\gamma - \omega t)\cot\psi}] \quad \therefore \gamma \leq \omega t \leq \pi + \alpha \quad (*)$$

$$i_a(\omega t) = -\frac{V_m}{Z} [\sin(\omega t - \psi) + 2\sin(\alpha - \psi)e^{(\gamma + \alpha - \omega t)\cot\psi} + \sin(\gamma - \psi)e^{(\gamma - \omega t)\cot\psi}]$$

$$- \frac{K\omega_m}{R_a} [1 - e^{(\gamma - \omega t)\cot\psi}] \quad \therefore \pi + \alpha \leq \omega t \leq \beta \quad (**)$$

منطق مشابهی برای حالت ترمزی وجود دارد که در صفحه ۱۲۸-۱۲۹ کتاب آورده شده است.



دانشگاه کاشان

□ تحلیل موتور تحریک مستقل تغذیه شده با یکسوساز تمام کنترل شده تکفاز

➤ مشخصه های سرعت - گشتاور:

مرز بین دو ناحیه هدایت جریان پیوسته و ناپیوسته با خط چین نشان

هنگامیکه محرکه در حالت II کار می کند، هر افزایش در بار، I_a و زاویه

β را افزایش می دهد و هنگامیکه $\beta = \pi + \alpha$ می شود محرکه به حالت

هدایت پیوسته I وارد می شود. سرعت بحرانی یا روی مرز بین این دو

ناحیه در حالت موتوری (ربع اول) برابرست با:

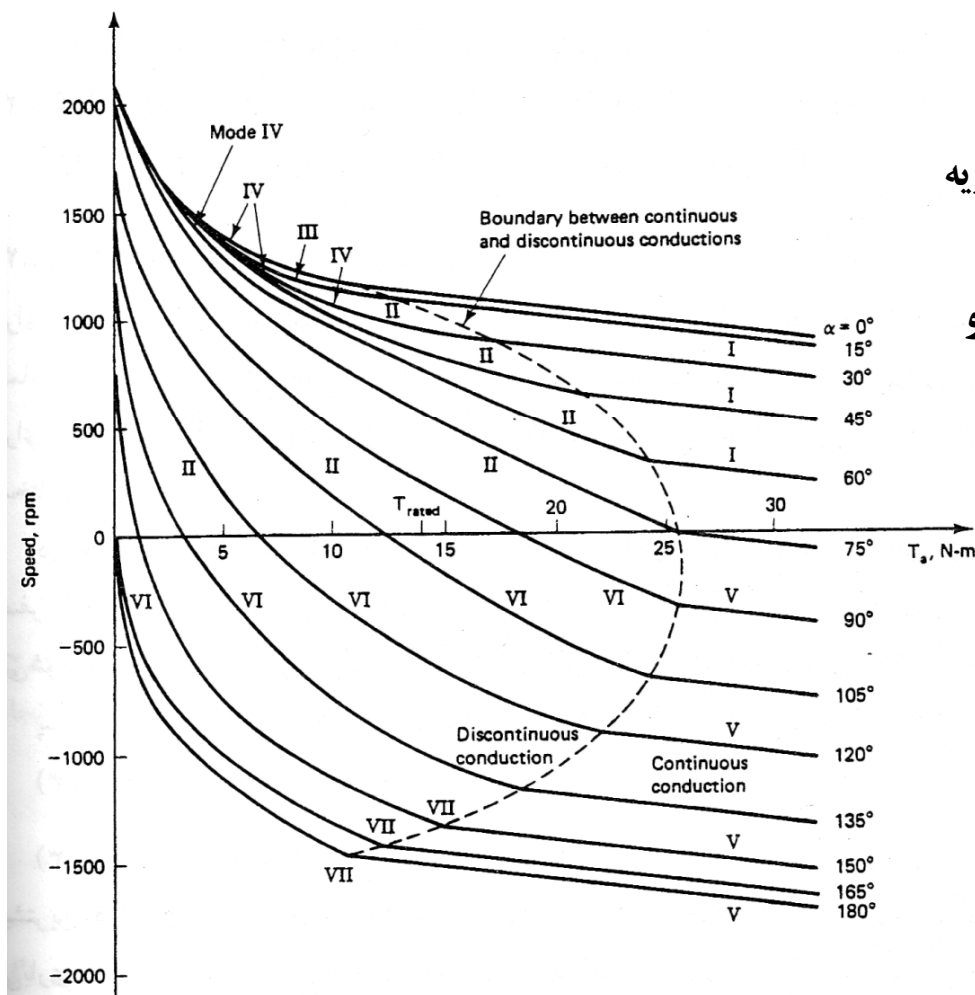
$$\omega_{mc} = \frac{R_a V_m}{ZK} \sin(\alpha - \psi) \left[\frac{1 + e^{-\pi \cot \psi}}{e^{-\pi \cot \psi} - 1} \right] \quad (50)$$

$$\therefore \alpha > \gamma$$

روابط سرعت بحرانی بین دیگر نواحی کاری در صفحات ۱۳۱ تا

۱۳۳ کتاب آورده شده اند.

تأثیر مهم هدایت غیر پیوسته، کاهش قابلیت تنظیم سرعت است.



شکل ۳-۱۰ مشخصه های سرعت - گشتاور برای یک محرکه با یکسوساز تکفاز

تمام کنترل شده تکفاز، I تا VI حالات کاری را نشان می دهد.



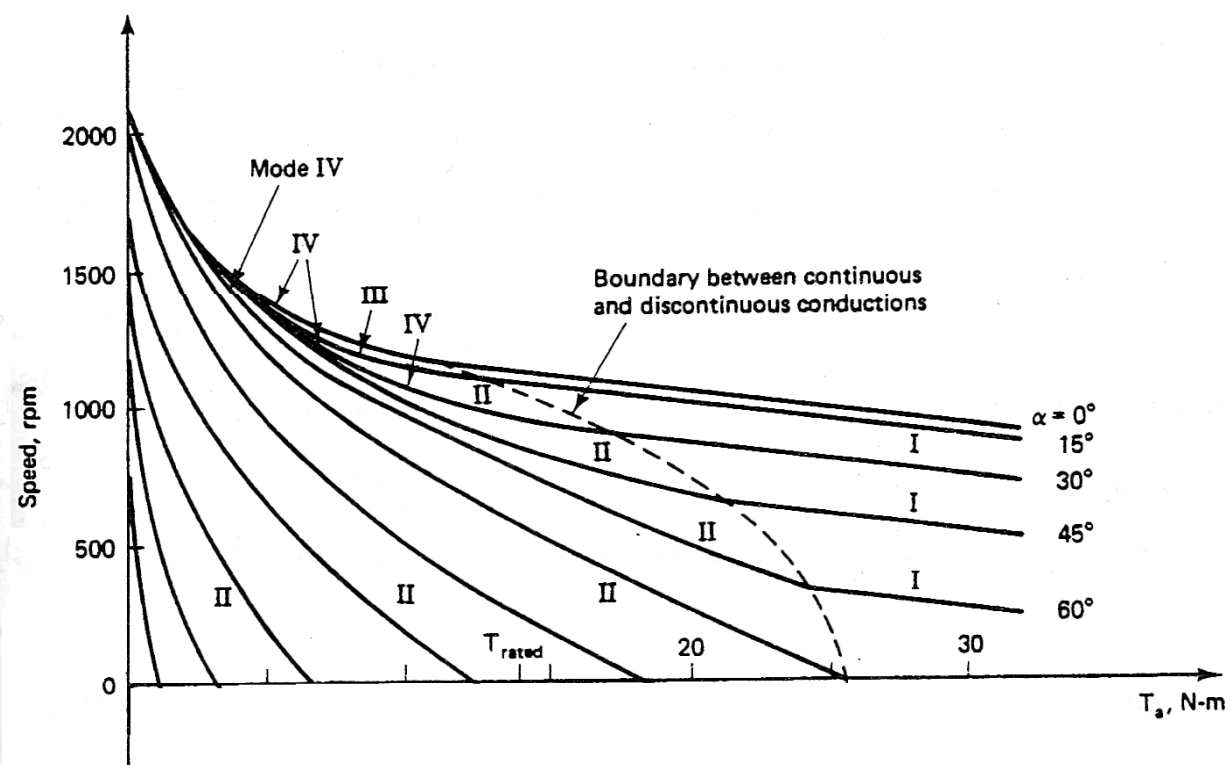
دانشگاه کاشان

□ تحلیل موتور تحریک مستقل تغذیه شده با یکسوساز نیمه کنترل شده تکفاز

➤ مشخصه های سرعت – گشتاور:

✓ حالت عملکرد این محرکه مشابه حالت های I تا IV محرکه تمام کنترل شده است و حالت های ترمز ژنراتوری در این محرکه وجود ندارد.

✓ تحلیل ها، روابط و شکلها مشابه حالت قبل و البته فقط در ربع اول هستند.



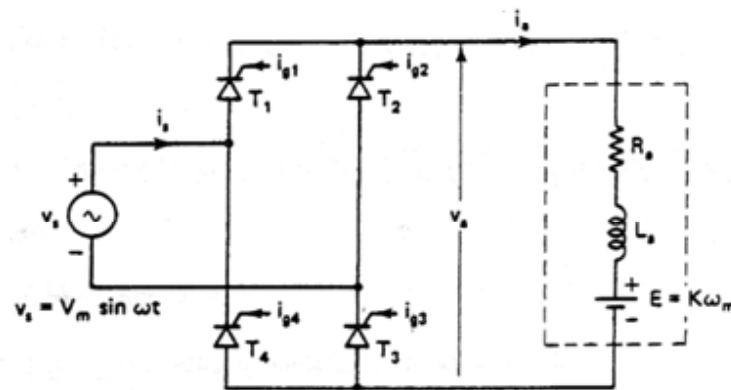
□ یکسوساز با دیود هرزه گرد کنترل شده

➤ استفاده از دیود هرزه گرد در یکسوساز تمام کنترل شده:

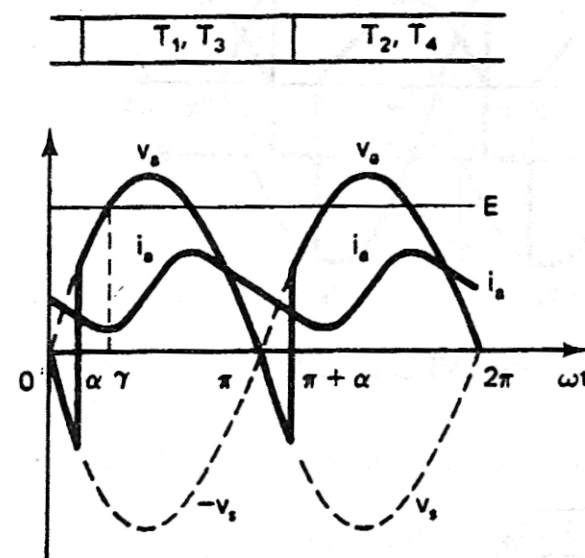
✓ شکل موج ولتاژ خروجی یکسوساز تمام کنترل شده، همواره جریان مثبتی دارد اما ولتاژ آن دارای هر دو قسمت مثبت و منفی است.

✓ لذا در فاصله α تا π ، توان از منبع گرفته می شود و مصرف می شود. اما در فاصله π تا $\pi + \alpha$ توان از بار به منبع بر می گردد. این توان همان توان راکتیو بوده که بین منبع رفت و برگشت می کند.

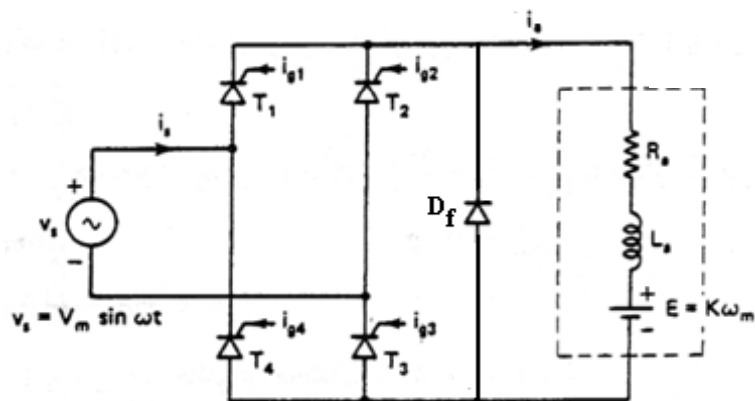
✓ در صورتی که بتوان جلوی برگشت این مقدار توان را گرفت، ضریب قدرت یکسوساز و عملکرد موتور بهبود می یابد.



(ب) یکسوساز بدون دیود هرزه گرد



(الف) حالت I، $\alpha > \gamma$



(ج) یکسوساز با دیود هرزه گرد (دیود کنترل نشده)

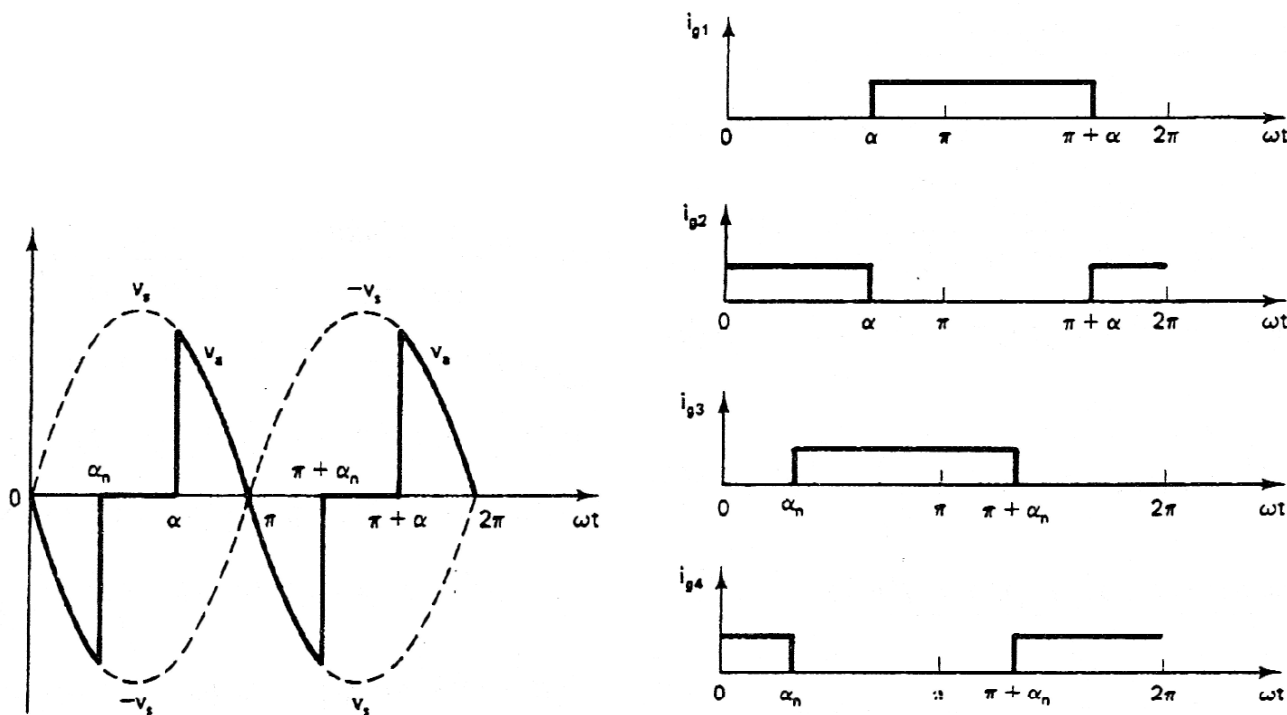
□ یکسوساز با دیود هرزه گرد کنترل شده

➤ استفاده از دیود هرزه گرد کنترل شده:

✓ در عمل بجای استفاده از دیود هرزه گرد (که عملاً غیر قابل کنترل است) می توان جفت ترستور T_1 و T_4 را همزمان آتش نمود که در نتیجه آن ترستور T_3 قطع خواهد شد.

✓ در عملکرد یکسوسازی α_n صفر نگهداشته می شود و تغییرات ولتاژ خروجی با کنترل α از 0 تا π حاصل می شود.

✓ در عملکرد اینورتری، α در 180° درجه تثبیت می شود و ولتاژ خروجی با کنترل α_n از 0 تا π حاصل می شود.

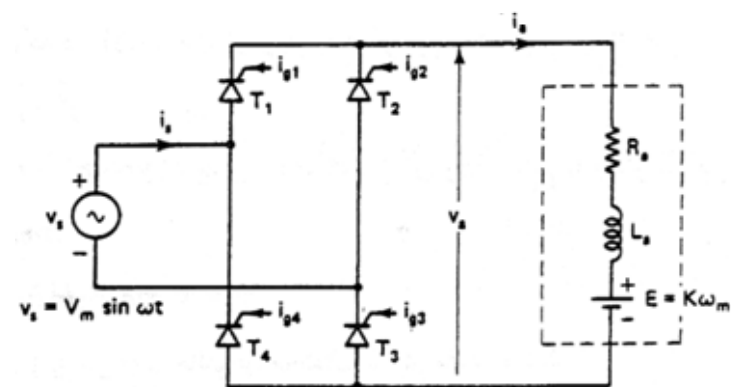


(ج) شکل موج ولتاژ بار در عملکرد هرزه گردی

سوئیچها

(ب) فرمان به سوئیچها برای عملکرد دیود هرزه گرد در

بازه $\pi + \alpha$ تا $\pi + \alpha_n$



(الف) ایجاد دیود هرزه گرد با هدایت همزمان دو

سوئیچ واقع بر روی یک ساق

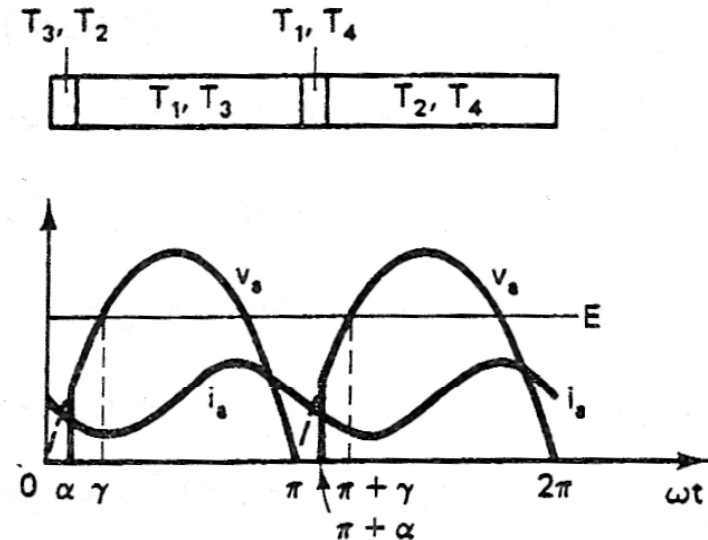
□ یکسوساز با دیود هرزه گرد کنترل شده

➤ معادلات سرعت - گشتاور در حالت استفاده از دیود هرزه گرد کنترل شده:

❖ حالت I: در این حالت جریان پیوسته است و α می تواند بزرگتر یا کوچکتر از γ باشد.

$$V_a = \frac{1}{\pi} \int_{\alpha}^{\pi} V_m \sin \omega t d(\omega t) = \frac{V_m}{\pi} (1 + \cos \alpha) \quad (51)$$

$$\omega_m = \frac{V_m}{K\pi} (1 + \cos \alpha) - \frac{R_a}{K^2} T_a \quad (52)$$



شکل موج ولتاژ و جریان در حالت استفاده از دیود هرزه گرد کنترل شده

□ یکسوساز با دیود هرزه گرد کنترل شده

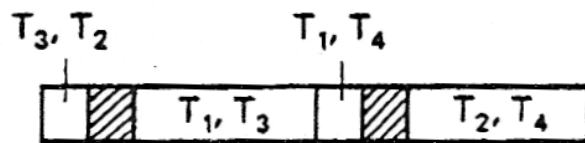
... معادلات سرعت - گشتاور در حالت استفاده از دیود هرزه گرد کنترل شده:

❖ حالت II: در این حالت جریان ناپیوسته است و α بزرگتر از γ است.

✓ در این حالت دو وضعیت ممکن است برای جریان اتفاق بیفتد: **(الف):** جریان در دوره هرزه گرد ($\beta > \pi$) صفر شود. **(ب)** جریان در دوره وظیفه ($\beta < \pi$) صفر شود.

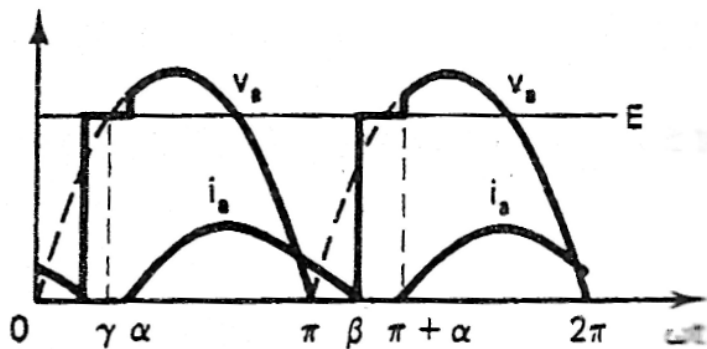
✓ معادلات حالت **الف**:

$$V_a = \frac{1}{\pi} \left[\int_{\alpha}^{\pi} V_m \sin \omega t d(\omega t) + \int_{\beta}^{\pi+\alpha} K \omega_m d(\omega t) \right] \quad (53)$$



$$= \frac{V_m (1 + \cos \alpha) + (\pi + \alpha - \beta) K \omega_m}{\pi}$$

$$\omega_m = \frac{V_m (1 + \cos \alpha)}{K(\beta - \alpha)} - \frac{\pi R_a}{K^2 (\beta - \alpha)} T_a \quad (54)$$



✓ معادلات حالت **ب**:

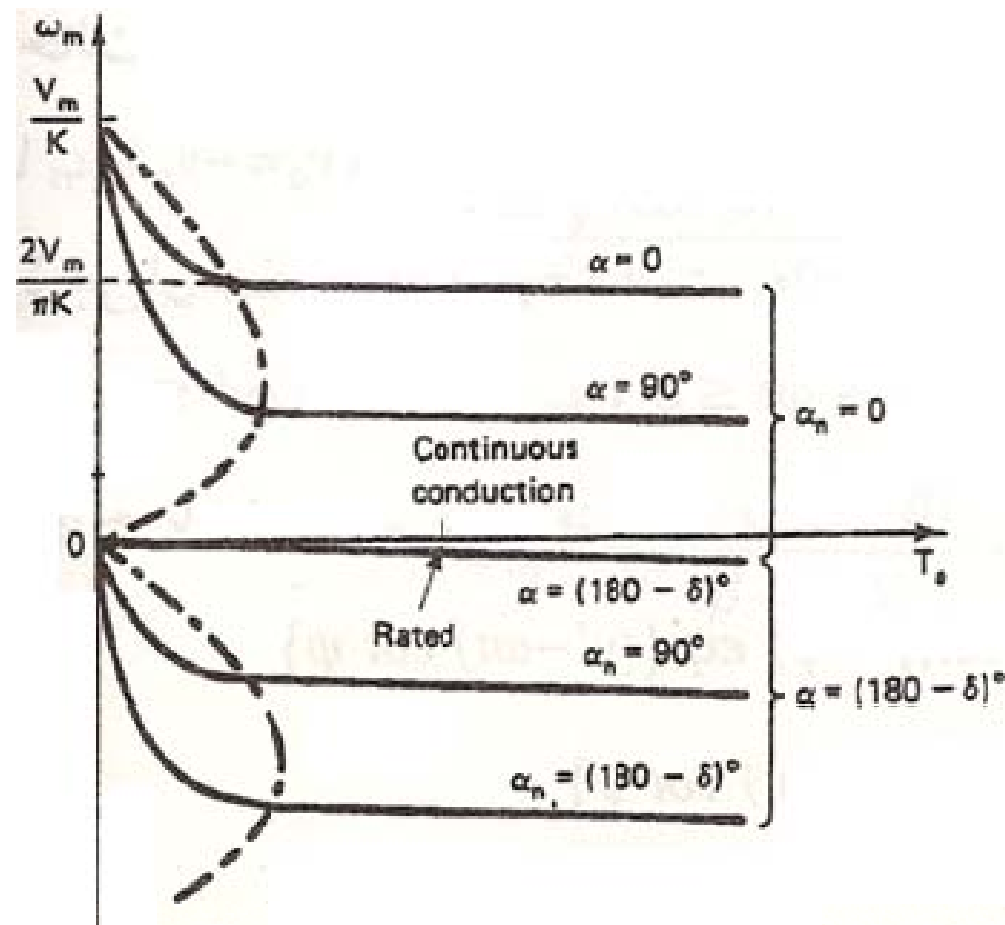
$$\omega_m = \frac{V_m (\cos \alpha - \cos \beta)}{K(\beta - \alpha)} - \frac{\pi R_a}{K^2 (\beta - \alpha)} T_a \quad (55)$$

شکل موج ولتاژ و جریان در حالت II و وضعیت (الف)

□ یکسوساز با دیود هرزه گرد کنترل شده

➤ مشخصه های سرعت – گشتاور یکسوساز تکفاز با هرزه گرد کنترل شده:

حالت های ناپیوسته III و V، برای $\alpha < \gamma$ هستند که روابط مربوطه در کتاب (صفحات ۱۴۴ تا ۱۴۸) ذکر گردیده اند.



مشخصه سرعت – گشتاور یکسوساز تکفاز با هرزه گرد کنترل شده

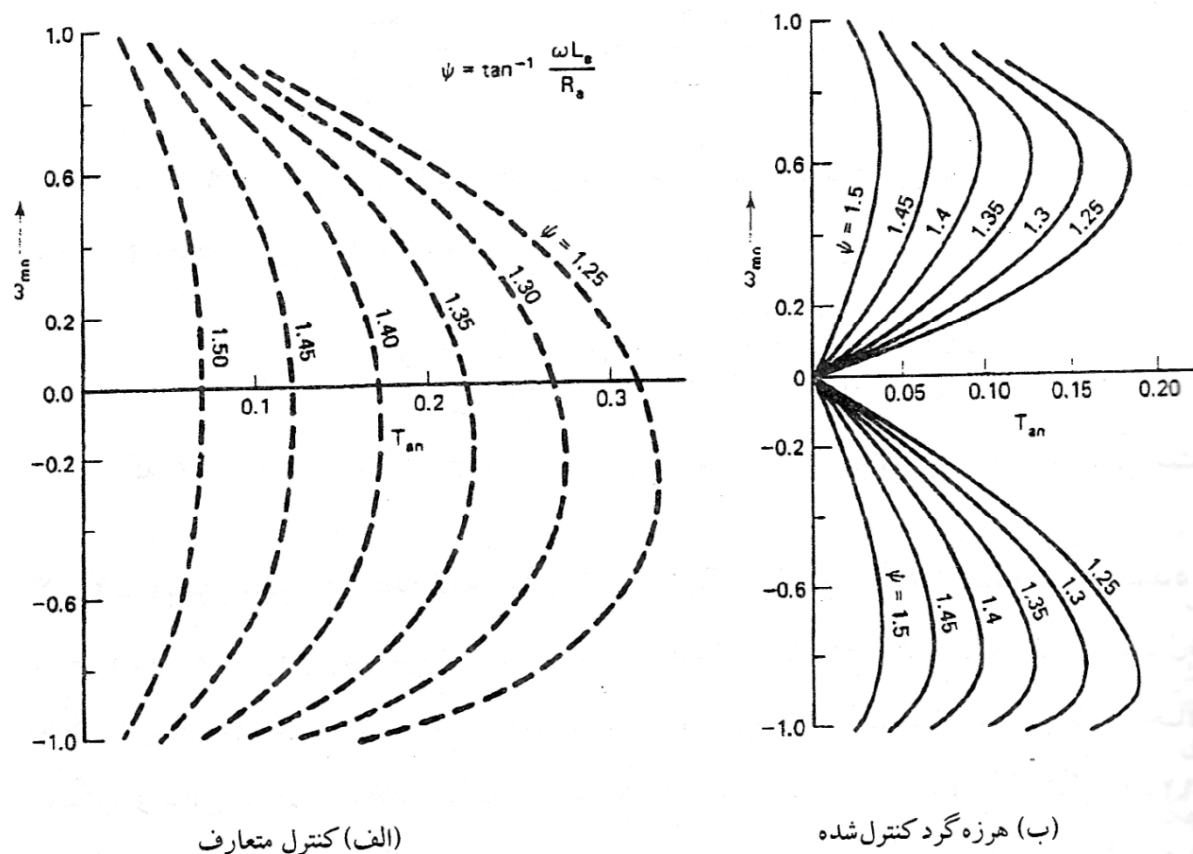


دانشگاه کاشان

□ یکسوساز با دیود هرزه گرد کنترل شده

... مشخصه های سرعت - گشتاور یکسوساز تکفاز با هرزه گرد کنترل شده:

✓ نتیجه: استفاده از یکسوساز با هرزه گرد کنترل شده، سبب کاهش قابل ملاحظه وسعت ناحیه هدایت غیرپیوسته می شود.



شکل ۳- ۱۵ مرزهای نواحی هدایت پیوسته و غیرپیوسته برای یک یکسوکننده تکفاز تمام کنترل شده

در صفحه سرعت - گشتاور نرمالیزه شده، $\omega_{mn} = E / (2V_m / \pi)$ و $T_{an} = I_a / (2V_m / \pi R_a)$