رگولاتور چیست و چگونه کار می‌کند؟

رگولاتور اصلاح ضریب قدرت یکی از اساسی‌ترین اجزاء بانک‌های خازنی با قدمتی تقریباً برابر با قدمت خازن است. علی‌رغم کاربردهای این وسیله، به جرأت می‌توان گفت که مبهم‌ترین و مرموزترین جزء یک بانک خازنی است. طبق تعریف مرسوم **رگولاتور دستگاهی است که با اندازه‌گیری ضریب توان بار، به مقدار مورد نیاز خازن به مدار وارد می‌نماید**.

این تعریف در عین جامعیت بسیار مبهم بوده، اطلاعاتی از چگونگی تنظیم و دیگر مشخصات ارائه نمی‌دهد. هدف این مقاله پاسخ به سؤالاتی مانند:

- رگولاتور چگونه کار می کند؟
- نسبت C/K چیست؟
- تنظیم نادرست چه تأثیری در عملکرد رگولاتور دارد؟
- ۳ به ۱۱ به چه معنایی است؟
- تواتر سوییچینگ چگونه تعیین می‌شود؟
- اگر پلاریتهٔ PT به اشتباه وصل شود چه رخ می‌دهد؟

و مواردی شبیه به آن است.

در این مقاله سعی شده تا اصول کلی و تئوری‌ها تا حد امکان به صورت ساده بیان شود و تنها اصولی بیان شوند که در تمامی انواع رگولاتورهای آنالوگ، الکترونیکی و رگولاتورهای بسیار پیشرفتهٔ میکروپروسسوری مشترک هستند.

مقاله به دو بخش تقسیم شده، در بخش اول اصول و تئوری‌ها بیان می‌شوند و در بخش دوم اثر خطاهای معمول در نصب و تنظیم رگولاتور به صورت سئوال و جواب مطرح می‌شوند.

بخش اول

اصول کار رگولاتور:

فرض کنید بخواهیم به صورت دستی و به وسیلهٔ دستگاه‌های اندازه‌گیری توان اکتیو و راکتیو، ضریب توان را اصلاح نماییم. همچنین فرض می‌نماییم که ۵ خازن هم‌ظرفیت q کیلوواری نیز در اختیار داریم. روند تنظیم به شرح ذیل است:

مرحلهٔ ۱: اندازه‌گیری توان اکتیو و راکتیو

مرحلهٔ ۲: محاسبهٔ ضریب توان با استفاده از رابطهٔ $Cos\varphi = \frac{P}{\sqrt{P^2 + Q^2}}$

مرحلهٔ ۳: محاسبهٔ توان راکتیو مورد نیاز برای رسیدن به ضریب توان مطلوب $Q = P.(\tan\varphi_1 - \tan\varphi_2)$

مرحلهٔ ٤: تزریق Q کیلووار راکتیو به مدار

در اینجا دو حالت پیش می‌آید:

حالت ۱: Q کیلووار معادل $3/8q$ است یعنی به سه پله و ۰/۸ یک پله نیاز داریم ولی نمی‌توانیم ۰/۸ یک پله را وارد مدار نماییم. دو انتخاب وجود خواهد داشت:

- وارد کردن ۳ پله (به ضریب توان مطلوب نخواهیم رسید)
- وارد کردن ٤ پله (ضریب توان از مقدار تنظیم‌شده بزرگ‌تر خواهد شد)

کدام راه حل مناسب‌تر است؟

حالت ۲: Q کیلووار معادل $4/4q$ یعنی به ٤ پله و ۰/٤ یک پله نیاز داریم مجدداً مانند حالت قبل دو راه وجود دارد:

- وارد کردن ٤ پله که منجر به ضریب توانی کوچک‌تر از مقدار تنظیم‌شده می‌گردد.
- وارد کردن ۵ پله که به ضریب توان بزرگ‌تری دست خواهیم یافت.

مجدداً این سئوال پیش می‌آید که کدام مناسب‌تر است؟

چنین وضعیتی دقیقاً در رگولاتور نیز رخ می‌دهد.

فرض کنید که قبلاً مقداری خازن وارد مدار شده و ضریب توان از ضریب توان مطلوب بزرگ‌تر است، لازم است تا فرضاً $1/2q$ از خازن‌های متصل، قطع شوند. یک خازن را قطع نماییم یا ۲ خازن را؟

در رگولاتورها معمولاً مقدار راکتیو مورد نیاز را به مضربی از کوچکترین پله گرد می‌نمایند. دو مثال زیر دو حالت متفاوت تصمیم‌گیری و عملکرد رگولاتور را نشان می‌دهد:

- اگر در رگولاتوری ۳/٤ پله مورد نیاز باشد ۳ پله وارد، و اگر ۳/٦ پله مورد نیاز باشد ٤ پله وارد می‌گردد.
- رگولاتور دیگری به جای ۳/۷ پله، ٤ پله و به جای ۳/٦۹ پله، ۳ پله وارد می‌نماید.

همانگونه که مشخص شد باید در تنظیم و اصلاح ضریب توان درصدی از خطا را بپذیریم.

در اینجا این سؤال مطرح می‌شود که:

- چه میزان خطا مجاز است؟
- این خطا به چه عواملی بستگی دارد؟
- چگونه می‌توان آن را کنترل کرد؟

پاسخ به دو سئوال آخر بسیار آسان است: **ظرفیت کوچک‌ترین پله**.

چون کل راکتیو مورد نیاز به مضربی از کوچک‌ترین پله گرد می‌شود، هر چه این عدد کوچک‌تر باشد خطا کمتراست: ولی کوچک ساختن پله اول موجب استهلاک تجهیزات، افزایش تعداد قطع و وصل‌ها، ایجاد شوک و تنش‌های الکترومکانیکی و اختلالات الکترومغناطیس می‌گردد.

سئوال اول متناظر این سؤال است که **ظرفیت کوچک‌ترین پله چگونه تعیین می‌گردد؟** به راهنمای طراحی بانک‌های خازنی شرکت فراکوه مراجعه نمایید.

نسبت C/K چیست و چگونه تعریف می‌شود؟

نسبت C/K در واقع تعیین‌کنندهٔ دقت یا خطای تنظیم است. معمولاً میزان خطا متناسب با ضریبی بین ۰/۵ الی ۰/٦۵ کوچک‌ترین پله بانک خازنی است.

در رگولاتوری که مبنای خطا ۰/٦۵ کوچکترین پله است: بجای ۵/٦۷ برابر کوچک‌ترین پله ($0/65q$)، ٦ برابر کوچک‌ترین پله ($6q$) به مدار وارد می‌گردد و به جای ۵/٤ برابر کوچکترین پله ($5/4q$)، ۵ برابر کوچک‌ترین پله ($5q$) وارد مدار می‌گردد.

در ابتدای مقاله فرض شد که دستگاه‌های اندازه‌گیری توان اکتیو و راکتیو در اختیار داریم. در رگولاتور از جریان اکتیو و راکتیو برای کنترل و تصمیم‌گیری استفاده می‌شود و به جای آن‌که توان راکتیو مورد نیاز با ظرفیت کوچک‌ترین پله مورد مقایسه قرار گیرد، جریان راکتیو بار با جریان راکتیو کوچکترین پله مورد مقایسه قرار می‌گیرد، حد خطا نیز به جای ۰/۶۵ توان کوچکترین پله ($0/65q$)، معادل ۰/۶۵ برابر جریان راکتیو کوچکترین پله ($0/65I_c$) خواهد بود.

از طرفی جریان‌ها از طریق یک ترانسفورمر جریان کاهنده (CT) اندازه‌گیری می‌شوند لذا اگر ظرفیت کوچکترین پله Q کیلووار باشد با اتصال آن به شبکه جریان راکتیوی برابر $\frac{Q}{\sqrt{3}\cdot U}$ به شبکه تزریق می‌شود و پس از عبور از CT در مدار داخلی رگولاتور جریان $\frac{Q}{\sqrt{3}\cdot U\cdot K}$ (K نسبت تبدیل ترانسفورمر جریان) اندازه‌گیری می‌شود.

با اتصال کوچک‌ترین پله به شبکه در رگولاتور جریان $\frac{Q}{\sqrt{3}\cdot U\cdot K}$ اندازه‌گیری می‌شود. پس حد خطا به صورت زیر که فرم آشنای C/K است تبدیل می‌گردد:

$$C/K = 0.65.\frac{Q}{\sqrt{3}U.K}$$

بخش دوم

پرسش: *اگر C/K را به مقدار بزرگ‌تری تنظیم کنیم، چه تغییری در عملکرد رگولاتور پدید می‌آید؟*

پاسخ: وقتی C/K به مقدار بزرگ‌تری تنظیم گردد، بدین معنی است که ظرفیت کوچک‌ترین پله بزرگ‌تر از حد واقعی اعلام شده است. لذا در ضریب توان اندازه‌گیری شده باید تغییر بیشتری نسبت به حالت تنظیم صحیح C/K ایجاد گردد تا پله‌ای قطع یا وصل گردد و خطا افزایش می‌یابد.

پرسش: *اگر C/K را به مقدار کوچک‌تری تنظیم نماییم، چه تغییری در عملکرد رگولاتور پدید می‌آید؟*

پاسخ: با این تنظیم مقدار ظرفیت کوچک ترین پله، کمتر از مقدار واقعی اعلام می‌شود و با تغییر کوچکی در ضریب توان یک پله قطع یا وصل می‌گردد. *خطا کمتر می‌شود ولی امکان نوسان (قطع و وصل متوالی) یک پله وجود دارد.*

پرسش: *اگر C/K صحیح تنظیم شود ولی نسبت CT به مقداری بزرگ‌تر (کوچک‌تر) تنظیم گردد، چه رخ می‌دهد؟*

پاسخ: در اکثر رگولاتورها تنظیم نسبت CT تأثیری در عملکرد رگولاتور ندارد بلکه تنها برای نمایش مقدار دقیق جریان اندازه‌گیری شده به کار می‌رود، ولی اگر در رگولاتوری این ضریب تأثیری در عملکرد درونی رگولاتور داشته باشد، افزایش (کاهش) آن متناظر با کاهش (افزایش) نسبت C/K است.

پرسش: *در شبکه‌ای با ولتاژ بیش از ۴۰۰ ولت باید از PT برای رگولاتور و اندازه‌گیری‌ها استفاده کرد. آیا نسبت C/K تغییر می‌کند؟*

پاسخ: خیر، C/K از همان رابطه $\frac{Q}{\sqrt{3}\cdot U\cdot K}$ محاسبه می‌گردد و نسبت تبدیل PT در آن تاثیری ندارد.

پرسش: *در بعضی از رگولاتورها نسبت C/K به صورت $\frac{Q}{K}$ که Q ظرفیت کوچک‌ترین پله و K نسبت تبدیل CT است تعریف می‌گردد. چرا این فرمول با فرمول $\frac{Q}{\sqrt{3}\cdot U\cdot K}$ متفاوت است؟*

پاسخ: این نوع رگولاتورها تنها برای یک ولتاژ معین قابل استفاده هستند. در این نوع، ضریب $0.65.\frac{Q}{\sqrt{3}U}$ برای ولتاژ خاصی مثلاً ٤٠٠ ولت محاسبه می‌گردد و در نسبت $\frac{Q}{K}$ به صورت اتوماتیک ضرب می‌گردد.

پرسش: *در صورت استفاده از این رگولاتورها برای ولتاژی متفاوت با ولتاژ اصلی آنها چه اتفاقی رخ می‌دهد؟*

پاسخ: اگر ولتاژ بزرگتر از ولتاژ اصلی باشد همانند کوچک کردن C/K خواهد بود و اگر ولتاژ کمتر از ولتاژ اصلی باشد، مطابق بزرگ‌ساختن C/K خواهد بود.

پرسش: *آیا فرمول دیگری برای C/K وجود دارد؟*

پاسخ: بلی.

$$Q=\sqrt{3}\cdot U\cdot I_c=\sqrt{3}\cdot U^2\cdot\omega\cdot C\Rightarrow c/k=\frac{Q}{\sqrt{3}\cdot U\cdot K}=0.65\sqrt{3}U\omega\times\frac{C}{K}$$

با توجه به این فرمول دیده می‌شود که اگر ضریب $0.65.\sqrt{3}U.\omega$ برای شرایط خاصی محاسبه گردد. مقدار رابطه به نسبت ظرفیت خازن (C) و نسبت CT (K) بستگی دارد و علت آن که ضریب خطا را C/K می‌نامند همین رابطه است.

پرسش: *رگولاتورهای میکروپرسسوری چگونه کار می‌کنند؟*

پاسخ: این رگولاتورها از عملیات پیچیدهٔ ریاضی برای محاسبات استفاده می‌نمایند. آنها از تبدیلات فوریه برای جداسازی اجزاء، اکتیو، راکتیو، دامنهٔ هارمونیک‌ها و غیره استفاده می‌نمایند ولی بر اساس اصول بیان‌شده در بخش اول کار می‌کنند.

پرسش: *در مواقع بار کم رگولاتور پله‌ای را وارد مدار نمی‌نماید؟*

پاسخ: ظرفیت کوچک‌ترین پله بزرگ است.

پرسش: *آیا می‌توان با تغییر C/K پله را به مدار وارد کرد؟*

پاسخ: بلی، با کوچک ساختن C/K می‌توان پله را به مدار وارد کرد ولی احتمال آن که سیستم خازنی شود وجود دارد.

پرسش: *با وجود آن که C/K صحیح تنظیم شده است، ولی بعضی مواقع (به ویژه کم‌باری) سیستم خازنی می‌شود؟*

پاسخ: علت این امر وجود خطاهای داخلی رگولاتورها است باید از رگولاتور پیشرفته‌تری استفاده کرد.

پرسش: *اگر پلاریتهٔ CT و یا PT معکوس به رگولاتور متصل شود، چه رخ می‌دهد؟*

پاسخ: اگر تنها پلاریتهٔ CT و یا PT معکوس شوند، در صورتی که سیستم پس‌فاز (القایی) باشد، رگولاتور ضریب توان پیش‌فاز (خازنی) نشان می‌دهد و در صورتی که سیستم پیش‌فاز (خازنی) باشد، رگولاتور ضریب توان پس‌فاز (القایی) نشان می‌دهد. *اگر پلاریتهٔ هر دو معکوس شود، هیچ مشکلی پیش نمی‌آید.*

پرسش: *اگر PT به فازی که CT به آن متصل است وصل نشود، چه مشکلی پیش می‌آید؟*

پاسخ: بسته به آنکه به کدام فاز متصل شده باشد، پاسخ‌ها متفاوت است.

مثلاً اگر CT به فاز اول و PT بین فازهای دو و زمین متصل شده باشد، شرایط زیر رخ می‌دهد:

۱) اگر ضریب توان بار بزرگ‌تر از ۰/۸٦٦ القایی باشد، رگلاتور ضریب توان را خازنی نشان می‌دهد.

۲) اگر ضریب توان بار کوچک‌تر از ۰/۸٦٦ القایی باشد، ضریب توان القایی و بسیار کوچک نشان داده می‌شود، مثلاً ضریب توان ۰/۷ القایی، ۰/۲۵۸ القایی نشان داده می‌شود.

پرسش: *آیا رگولاتوری وجود دارد که مشکلات فوق را اتوماتیک حل کند؟*

پاسخ: بلی، رگولاتورهای فراکوه قابلیت شناسایی محل اتصال CT و PT به صورت اتوماتیک را دارد و اتصالات ناصحیح در آن خللی ایجاد نمی‌نماید.

پرسش: *توالی یا Sequence چیست؟*

پاسخ: برای افزایش دقت وتنظیم دقیق ضریب توان، باید پلهٔ اول را بسیار کوچک کرد که منجر به افزایش تعداد پله‌ها در بانک می‌شود مثلاً بانک خازنی ٤۰۰ کیلوواری با پله‌های ۲۵ کیلوواری شامل ۱٦ پله است. توالی روشی

است که بدون کاهش دقت، تعداد پله‌ها را کاهش می‌دهند. برای بانک خازنی مثال فوق می‌توان پلهٔ اول و دوم را ۲۵ کیلووار و هفت پلهٔ دیگر را ۵۰ کیلووار قرار داد که تعداد کل پله‌ها به ۹ تقلیل می‌یابد.

حتی اگر پلهٔ اول ۲۵ کیلووار، پلهٔ دوم ۵۰ کیلووار، پلهٔ سوم ۷۵ کیلووار، پلهٔ چهارم، پنجم، و ششم ۱۰۰ کیلووار باشد، با ٦ پله بدون کاهش دقت بانک خازنی ٤۰۰ کیلووار پیاده‌سازی می‌شود و یا حتی می‌توان در ٦ پله با پلهٔ اول ۲۵ کیلووار یک بانک خازنی ۷۷۵ کیلوواری را پیاده سازی کرد.

به توالی که تمامی پله‌ها هم ظرفیت باشند ۱:۱:۱:۱:۱،
و به توالی دوم این مثال ۲:۲:۲:۲،
و به توالی سوم در مثال فوق ۱:۲:۳:٤:٤:٤،
و به توالی نهایی توالی ۱:۲:٤:۸:۸:۸
می‌گویند.

پرسش: *چه شرایطی در مرتب‌سازی پله‌ها برای یک توالی خاص باید مد نظر قرار بگیرد؟*
پاسخ: لازم است تا به وسیلهٔ ترکیب پله‌های یک توالی به هر مضربی از کوچک‌ترین پله دست یافت مثلاً توالی ۱:۲:۵:۱۰:۱۰ توالی صحیحی نمی‌باشد چرا که با هیچ ترکیبی از پله‌ها نمی‌توان به ٤ برابر پلهٔ اول دست یافت.

پرسش: *آیا رگولاتورها تمامی توالی‌ها را تأمین می‌کنند؟*
پاسخ: خیر، اکثر رگولاتورها دو توالی ...۱:۱:۱:۱ و...۱:۲:۲ را تأمین می‌کنند. رگولاتورهای فراکوه، ۲٤ توالی گوناگون را تأمین می‌کنند. برای کسب آگاهی بیشتر به کاتالوگ رگولاتورها مراجعه نمایید.

مثلاً در توالی ۱:۲:۳:٤:٤:٤ با پلهٔ اول ۱۵ کیلووار قطع و وصل‌ها به صورت زیر است:

مرتبهٔ پله	۱	۲	۳	٤	۵	٦
مضرب توالی	۱	۲	۳	٤	٤	٤
ظرفیت پله	۱۵	۳۰	٤۵	٦۰	٦۰	٦۰

ردیف	ظرفیت مورد نیاز (کیلووار)	پلهٔ اول	پلهٔ دوم	پلهٔ سوم	پلهٔ چهارم	پلهٔ پنجم	پلهٔ ششم
		۱۵	۳۰	٤۵	٦۰	٦۰	٦۰
۱	۱۵	❊					
۲	۳۰		❊				
۳	٤۵			❊			
٤	٦۰	❊		❊			
۵	۷۵		❊	❊			
٦	۹۰	❊	❊	❊			
۷	۱۰۵	❊	❊		❊		
۸	۱۲۰	❊		❊	❊		
۹	۱۳۵		❊	❊	❊		
۱۰	۱۵۰	❊	❊	❊	❊		
۱۱	۱٦۵	❊	❊		❊	❊	
۱۲	۱۹۵		❊	❊	❊	❊	
۱۳	۲۱۰	❊	❊	❊	❊	❊	
۱٤	۲۱۰		❊		❊	❊	❊
۱۵	۲۲۵	❊	❊		❊	❊	❊
۱٦	۲٤۰	❊		❊	❊	❊	❊
۱۷	۲۵۵		❊	❊	❊	❊	❊
۱۸	۲۷۰	❊	❊	❊	❊	❊	❊

همان‌طور که دیده می‌شود با ٦ پله ۱۸ حالت متفاوت به دست می‌آید روش دیگری برای نام‌گذاری به صورت (٦ به ۱۸) یا (٦ به ۱۸ خروجی) است.