تاکوژنراتور

مقدمه

تاکوژنراتورها ماشین های کسر اسب بخار هستند که به صورت ژنراتور کار می کنند و برای تبدیل سرعت دورانی به سیگنال الکتریکی متناسب با آن به کار می روند. در این حالت قانون تبدیل به مشخصه ی خروجی تاکوژنراتور ، یعنی به منحنی تغییرات ولتاژ خروجی ، نسبت به تغییرات سرعت محور ، بستگی دارد. معادله ی عمومی مشخصه ی خروجی یک تاکوژنراتور ایده آل به صورت زیر است:

$$Vout = K_g w = K_g \frac{d\theta}{dt} \qquad (۱-۴)$$

که در آن θ زاویه ی چرخش روتور و K_g ضریب تقویت حالت دائم ، معادل شیب مشخصه ی خروجی ، است. مطابق معادله ی ۴-۱ اگر θ متغییر مبنا باشد از تاکوژنراتور می توان به عنوان یک مشتق گیر الکترومکانیکی نیز استفاده کرد.

برمبنای نوع طراحی واصول کار ونیز شکل ولتاژ خروجی ، تاکوژنراتورها را می توان به صوررت زیر دسته بندی کرد:

الف- تاکوژنراتورهای DC شامل تاکوژنراتور با میدان تحریک و تاکوژنراتور با میدان مغناطیس دائم.

ب- تاکوژنراتورهای AC شامل تاکوژنراتورهای القایی و تاکوژنراتورهای سنکرون.

در شرایط ایده آل انتظار میرود که خروجی یک تاکوژنراتور DC یک ولتاژ صاف و بدون ریپل باشد. خروجی یک تاکوژنراتورالقایی نیز تحت همان شرایط باید ، یک ولتاژ سینوسی با فرکانس و فاز ثابت باشد و تنها دامنه ی آن متناسب با سرعت تغییر کند. ولتاژ خروجی یک تاکوژنراتور سنکرون نیز AC است و فرکانس آن نیز به همراه دامنه ی ولتاژ خروجی متناسب با سرعت تغییر می کند.

تاکوژنراتورها معمولا به صورت مستقیم و بندرت از طریق واسطه هایی مانند چرخ دنده یا زنجیر ، به محوری که سنجش سرعت آن مورد نظر است ، کوپله می شوند.

برای جلوگیری از بروز خطای بارگذاری ، یک تاکوژنراتور ایده آل نباید هیچگونه گشتاوری اعم از استاتیکی و دینامیکی بر محور تحمیل کند. به طور خلاصه یک تاکوژنراتور خوب عملا باید شرایط زیر را داشته باشد:

۱- **خطای دامنه ی کوچک**:

یعنی حداقل انحراف از مشخصه ی خروجی خطی مطابق با رابطه ی ۴-۱

این خطا با ΔV نشان داده شده و به صورت اختلاف بین ولتاژ خروجی تاکوژنراتور در هر سرعت و ولتاژ پیش بینی شده طبق مشخصه ی خروجی ایده آل در همان سرعت تعریف می شود.

۲- **خطای فاز کوچک (فقط برای تاکوژنراتور القایی):**

یک تاکوژنراتورالقایی از یک منبع سینوسی تحریک می شود ولتاژ خروجی تاکوژنراتور در شرایط ایده آل نسبت به ولتاژ تحریک آن دارای فاز ثابتی است. میزان تغییر فاز ولتاژ خروجی نسبت به فاز ثابت مورد انتظار ، $\Delta\beta$ خطای فاز تاکوژنراتور نامیده می شود.

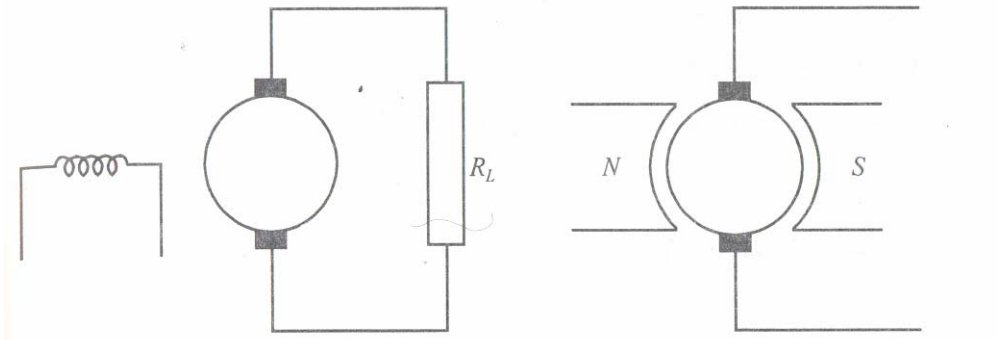
۳- **ضریب تقویت (K_g) بالا (در حد مورد نیاز)**:

به جهت بالا بردن حساسیت دستگاه

۴- **اصطکاک کم** :
به جهت حداقل کردن اثر بارگذاری استاتیکی
۵- **اینرسی کم** :
به جهت حداقل کردن اثر بارگذاری دینامیکی
۶- **ثابت زمانی الکترومغناطیسی کوچک:**
به جهت بالا بردن سرعت پاسخ دستگاه به تغییرات سرعت.
در این فصل تاکوژنراتور های DC ونیز تاکوژنراتورهای AC از نوع القایی بحث خواهد شد. فرکانس ولتاژ خروجی تاکوژنراتورهای سنکرون متغیرند. لذا در بیشتر کاربردها لازم است که ولتاژ فوق قبل از استفاده یکسو شود. کاربرد های تاکوژنراتورهای سنکرون ، بسیار کمتر از دو نوع دیگر است و بنابراین از بحث در مورد آنها صرفنظر می شود.

تاکوژنراتورهای جریان مستقیم DC

اساس تاکوژنراتورهای DC از نظر اصول کار و نوع طراحی مکانیکی ، مشابه ماشینهای کموتاتودار جریان مستقیم (با تحریک جداگانه یا با تحریک آهنربای دائم) است. به عبارت دیگر تاکوژنراتورهای DC چیزی جز ژنراتورهای DC معمولی با قدرت بسیار پایین کسر اسب بخار نیستند با این تفاوت که در طراحی و ساخت آنها نکات خاصی در جهت بهبود مشخصه های مورد انتظار در نظر گرفته می شوند. شکل ۴-۱ دو نوع تاکوژنراتور DC با تحریک آهنربای دائم و با تحریک میدان جداگانه را نشان می دهد.



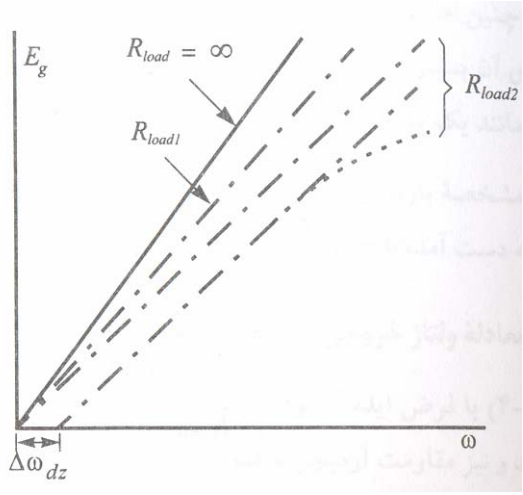
الف) تاکوژنراتور DC با مغناطیس دائم ب) تاکوژنراتور DC با تحریک میدان جداگانه

شکل ۴-۱ دیاگرام مداری تاکوژنراتور DC

منحنی تغییرات دو سر آرمیچر نسبت به تغییرات سرعت w آرمیچر به ازای فلوی میدان Φ ومقاومت بار R_L ثابت ، مشخصه ی خروجی تاکوژنراتور DC نامیده می شود.
نیروی محرکه ی الکتریکی آرمیچر E_A در یک ماشین DC با فلوی طولی میدان و سرعت آرمیچر متناسب است و در نتیجه ، در یک تاکوژنراتوربا فلوی میدان ثابت ، می توان معادله ی نیروی محرکه القا شده را به صورت زیر نوشت:

$$E_A = K_E w = K_E \frac{d\theta}{dt} \qquad (۲-۴)$$

در رابطه ی فوق ، θ زاویه ی چرخش آرمیچر تاکوژنراتور، K_E ثابت ماشین و برابر $K_a\Phi$ و K_a نیز ضریب طراحی $K_a = \frac{zp}{2\pi m}$ هستند. m, z, p به ترتیب تعداد قطب ها ، تعداد سیم های آرمیچر و تعداد مسیرهای موازی سیم پیچی آرمیچر هستند. معادله ی (۴-۲) معادله ی مشخصه ی خروجی تاکوژنراتور DC بی بار نامیده می شود. و از این رو K_E به صورت ضریب تقویت یا حساسیت تاکوژنراتور در حالت مدار باز تعریف می شود. این مشخصه ی خطی در شکل (۴-۲) به ازای $R_{LOAD} = \infty$ نشان داده شده، که در آن سرعت w به صورت پریونیت است.



شکل ۲-۴ مشخصه ی خروجی یک تاکوژنراتور DC

شرایط تحریک و در نتیجه مشخصه های خروجی یک تاکوژنراتور با مغناطیس دائم ، قدری با نوع با تحریک مستقل متفاوت است لذا بررسی آنها به طور جداگانه انجام می شود.

مشخصه ی خروجی یک تاکوژنراتور با مغناطیس دائم

در این نوع تاکوژنراتور، مقدار فلوی آرمیچر ثابت فرض می شود. هرچند در بارداری ،مقدار آن اندکی در اثر عکس العمل آرمیچر کاهش می یابد. چنانچه از این اثر صرفنظر شود، ولتاژ خروجی تاکوژنراتوردر تغذیه ی باری به مقاومت R_L به اندازه ی افت ولتاژ در مقاومت آرمیچر ، کمتر از نیروی محرکه القا شده خواهد بود:

$$V_A = E_A - I_A R_A \qquad (۴-۳)$$

در معدله ی فوق I_A جریان آرمیچر و R_A مقاومت مدار آرمیچر ، شامل مقاومت سیم پیچی آرمیچر و مقاومت محل تماس جاروبکها با کموتاتور است. از جایگذاری $I_A = \frac{V_A}{R_L}$ در رابطه ی (۴-۳) نتیجه می شود:

$$V_A = E_A - \frac{V_A}{R_L} R_A$$

$$= \frac{E_A}{1 + R_A / R_L} \qquad (۴-۴)$$

$$V_A = \frac{K_E}{1 + R_A / R_L} w$$

$$= K_g w$$

در معادله ی فوق ، K_g ضریب تقویت یا حساسیت حالت بارداری است و برابر است با:

$$K_g = \frac{K_E}{1 + R_A / R_L}$$

عبارت فوق نشان می دهد که چنانچه فلوی میدان و نیز مقاومت مدار آرمیچرثابت باشد، K_g نیز عدی ثابت است و در نتیجه مشخصه ی تاکوژنراتور در حالت بارداری نیز همچنان خطی باقی خواهد ماند و فقط حساسیت آن نسبت به حالت بی باری اندکی کاهش می یابد.

بار یک تاکوژنراتوربه محل کاربرد آن بستگی دارد. اگر تاکوژنراتورتنها برای سنجش سرعت یک محور به کار رود ، بار آن ممکن است یک نشان دهنده ی عقربه ای مانند دستگاه قاب گردان با مغناطیس دائم باشد و عملا کالیبراسیون دستگاه برای کار روی تاکوژنراتور مورد استفاده انجام می شود. به عبارت دیگر دستگاه نشان دهنده به گونه ای کالیبره می شود که گویی مستقیما روی تاکوژنراتورقرار گرفته و سپس مدرج شده است.

در چنین حالتی به فرض ثابت ماندن مقاومت بار ، جریان کشیده شده از تاکوژنراتور با صعود سرعت افزایش می یابد، ولی اثر آن ونیز مقاومت R_A موجب خطای محسوسی نمی شود.

در یک نمونه کاربردی دیگر ، تاکوژنراتور ممکن است در یک سیستم کنترل اتوماتیک به کار رود. در چنین حالتی خروجی تاکوژنراتور به یک تقویت کننده متصل می شود که امپدانس ورودی آن بسیار بزرگتر مقاومت مدار آرمیچر است و عملا می توان شرایط تاکوژنراتور را مانند یک مدار باز تلقی کرد.

دو نمونه مشخصه بارداری تاکوژنراتور زیر بارهایی با مقاومتهای R_{L_1} و R_{L_2} که از معادله ۴-۴ به دست آمده اند در شکل ۴-۴ نشان داده شده اند.

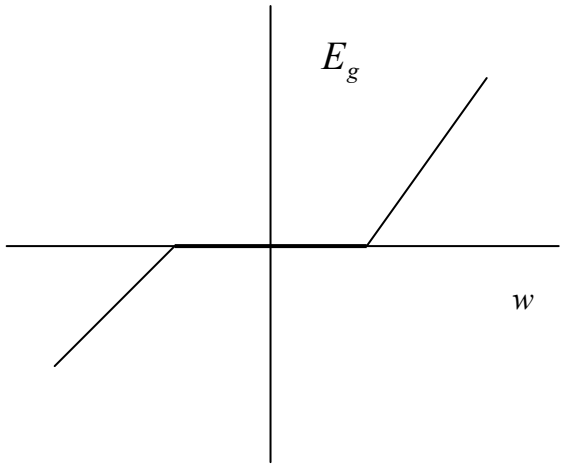
معادله ی ولتاژ خروجی یک تاکوژنراتور با مغناطیس دائم در حالت کلی

رابطه ی ۴-۴ با فرض ایده آل بودن تاکوژنراتور به دست آمد. مثلا ، مقدار فلوی میدان ثابت فرض شد و نیز مقاومت آرمیچر به صورت یک عدد ثابت و معادل R_A نشان داده شد. در یک تاکوژنراتور واقعی عوامل زیر خروجی آن را غیرخطی می سازد:

الف- **عکس العمل آرمیچر** که مانند یک ژنراتور DC معمولی، موجب کاهش فلوی مفید در امتداد طولی Φ و $K_E = K_a \phi$ می شود. از آنجا که میزان کاهش Φ تابعی از جریان I_A است، لذا می تون انتظار داشت که درصد کاهش K_E در روابط۴-۲و۴-۴ تابعی از

$V_{OUT} = R_L I_A$ و از آنجا تابعی از سرعت باشد. این واقعیت موجب غیرخطی شدن مشخصه ی خروجی تاکوژنراتور، حتی تحت یک بار با مقاومت ثابت R_L می شود.

ب-**مقاومت غیرخطی اتصال جاروبک-کموتاتور** عامل دیگری است که مقاومت معادل مسیر آرمیچر، R_A را تابعی از I_A و از آنجا تابعی از سرعت می کند. میزان غیرخطی بودن مقاومت اتصال جاروبک ذغالی-کموتاتور در سرعت های کم ، بویژه در حوالی صفر از شدت بیشتری برخوردار است. افت ولتاژ در این اتصال در عمل ، دارای یک مقدار ثابت مستقل از جریان است و در نتیجه ولتاژ خروجی ، تا وقتی که قدرمطلق نیروی محرکه ی القا شده به حد این مقدار ثابت نرسیده است، در صفر باقی می ماند. در نتیجه ، مشخصه ی $V_A(w)$ به جای آنکه از سرعت صفر، صعود را شروع کند، از سرعتی مانند Δw_{dz} بالا رفتن را آغاز می کند و یک ناحیه ی مرده مطابق شکل ۴-۳ در حوالی سرعت صفر به جا می گذارد.



شکل ۳-۴ مشخصه خروجی یک تاکوژنراتور با منظور کردن اثر مقاومت اتصال جاروبک – کموتاتور

استفاده از جاروبک های ساخته شده از فلزات، بالاخص با اندود نقره ،این مشکل را برطرف می سازد. بنابه توضیحات بالا، معادله ی ولتاژ خروجی جاروبک یک تاکوژنراتور زیر بار به صورت زیر است:

$$V_A = E_{A,L} - V_b - R_A I_A \qquad (۵-۴)$$

در رابطه ی فوق $E_{A,L}$ و V_b به ترتیب نیروی محرکه باردار ی و افت ولتاژ ثابت در اتصال جاروبک-کموتاتور هستند. به فرض آنکه فلوی میدان به علت اثر ضدمغناطیسی عکس العمل آرمیچر به اندازه ی $\Delta\Phi_r$ ، نسبت به مقدار بی باری آن، Φ ، کاهش یابد، اندازه ی نیرومحرکه ی بارداری به صورت زیر در می آید:

$$E_{A,l} = K_a w \Phi_L = K_a w(\Phi - \Delta\Phi_r) \qquad (۶-۴)$$

در رابطه ی فوق Φ_L فلوی میدان در حالت بارداری است.

با جایگزینی رابطه ی ۴-۶ در رابطه ی ۴-۵ وبا در نظر گرفتن آنکه $I_A = (\frac{V_A}{R_L})$ است، شکل کلی تر در معادله ی ولتاژ خروجی یک تاکوژنراتور DC باردار، به صورت زیر به دست می آید:

$$V_A = K_a w(\Phi - \Delta\Phi_r) - V_b - \frac{V_A}{R_L} R_A$$
$$= K_E w - K_a w \Delta\Phi_r - V_b - \frac{R_A}{R_L} V_A \qquad (۷\text{-}۴)$$

در روابط فوق $K_E = K_a \Phi$ است. اگر در این رابطه مقدار $\Delta\Phi_r$ را متناسب با جریان آرمیچر وبا ضریب تناسب K_r فرض کنیم یعنی $\Delta\Phi_r = K_r I_a$ ، آنگاه جمله دوم معادله بالا به صورت $K_a w(K_r \frac{V_A}{R_L})$ در می آید و از آنجا:

$$V_A = K_E w - K_a w K_r \frac{V_A}{R_L} - V_b - \frac{R_A}{R_L} V_A$$

و بالاخره، مقدار ولتاژ تاکوژنراتور زیر بار در محدوده ای از سرعت ، که در آن نیروی محرکه بر V_b غالب آمده باشد، به صورت زیر در می آید.

$$V_A = \frac{K_E w - V_b}{1 + (K_a K_r w + R_A)/R_L}, |K_E w| \succ V_b \qquad (۸\text{-}۴)$$

بدیهی است مقدار ولتاژ خروجی در سرعتهای کم و در محدوده ی $|w| \prec \frac{V_b}{K_E}$ برابر صفر است. معادله ی ۴-۸ بیانگر مشخصه ی خروجی یک تاکوژنراتور DC با در نظر گرفتن اثر ضد مغناطیس کننده ی عکس العمل آرمیچر و نیز افت ولتاژ ثابت در محل تماس جاروبکها با کموتاتور است. با تحلیل معادله ی ۴-۸ می توان نتایج قبلی را تحقیق کرد:

الف- مشخصه ی خروجی غیرخطی است زیرا w در مخرج نیز ظاهر می شود و بعلاوه یک مقدار ثابت V_b در صورت وجود دارد.

ب- مشخصه ی خروجی از نقطه ای غیر از مبدا شروع می شود. زیرا، تا وقتی که $|K_E w| \prec v_b$ است، ولتاژ خروجی در حد صفر باقی می ماند. این بدان معنی است که تاکوژنراتور دارای یک ناحیه ی مرده Δw_{dz} است، که در آن ناحیه ولتاژ خروجی تاکوژنراتور صفر است.

اگر مطابق معدله ۴-۴ مشخصه ی خطی ایده آل فرض شود، خطای دامنه ی ایجاد شده توسط عکس العمل آرمیچر، معادل اختلاف ولتاژهای حاصل از معادلات ۴-۴ و۴-۸ در سرعتهای متناظر است. البته برای تفکیک اثر عکس العمل آرمیچر ، لازم است عامل غیر خطی کننده ی دیگر ، V_b برابر صفر فرض شود. چنانچه V_{Ai} ولتاژ حاصل از معادله ی ۴-۴ باشد:

$$V_{Ai} = \frac{E_A}{1 + R_A / R_L}$$
$$= \frac{K_E w}{1 + R_A / R_L}$$

ونیز V_A مقدار ولتاژ حاصل از معادله ۴-۸ به ازای $V_b = 0$ باشد، مقدار خطای نسبی دامنه ، ΔV به صورت زیر تعریف می شود:

$$\Delta V = \frac{V_{Ai} - V_A}{V_{Ai}} \qquad (۹-۴)$$

پس از جایگذاری مقادیر V_{Ai} و V_A و ساده کردن نتیجه می شود:

$$\Delta V = \frac{1}{1 + (R_A + R_L)/K_a K_r w} \qquad (۱۰-۴)$$

خطای ناشی از این معادله خطای طراحی نامیده می شود.
مطابق این رابطه ، برای هرچه نزدیک کردن مشخصه ی خروجی تاکوژنراتور به حالت خطی ، لازم است مقاومت بار را در حد ممکن بزرگ انتخاب کرد. در شرایط ایده آل، $R_L = \infty$ و ΔV صفر است. به کار بردن تاکوژنراتور در محدوده ی سرعت های نسبتا کم $(w \prec 0.5pu)$ به منظور حداقل کردن عکس العمل آرمیچر ، ممکن است عمل مناسبی باشد.
تاکوژنراتورهایی که به صورت ماشینهای DC با آرمیچر دیسکی یا توخالی ساخته می شوند، دارای مشخصه ی خروجی تقریبا خطی هستند زیرا ، اثر عکس العمل آرمیچر در چنین ماشینهایی بسیار کوچک است. استفاده از جاروبک های فلزی که در محل تماسشان با کموتاتور آب نقره داده شده اند، ناحیه ی مرده را به مقدار زیاد کاهش می دهد چون نقره دارای مشخصه ی ولتاژ- جریان خطی است.
عرض ناحیه ی مرده با افزایش ضریب تقویت نیز کاهش می یابد زیرا، ناحیه ی مرده در محدوده ی سرعت $|w| \prec \frac{V_b}{V_{K_g}}$ قرار دارد و از آنجا:

$$|\Delta w_{dz}| = \frac{V_b}{K_g} \qquad (۱۱-۴)$$

در حالت کلی ، ضریب تقویت یک سیستم (ویا حساسیت) از جمله تاکوژنراتوربه صورت نسبت تغییر خروجی به تغییر ورودی تعریف می شود. در مورد یک تاکوژنراتور، این عبارت به صورت زیر است:

$$K_g = \frac{dV_A}{dw}$$

با استفاده از معادله ی ۴-۸ که ولتاژ خروجی تاکوژنراتور را در حالت کلی بیان می کند ، ضریب تقویت به صورت زیر محاسبه می شود:

$$K_g = \frac{(1 + R_A / R_L)K_E + (K_a K_r / R_L)V_b}{[1 + (K_a K_r w + R_A)/R_L]^2} \qquad (۱۲-۴)$$

معادله ی ۴-۱۲ نیز غیر خطی بودن تاکوژنراتور را در حالت کلی تایید می کند. یادآوری می شود که ضریب تقویت یک سیستم خطی ، مستقل از متغیرهای ورودی است.
با چشم پوشی از اثر ضد مغناطیس کننده ی عکس العمل آرمیچر، یعنی با فرض $K_r = 0$ معادله ی ۴-۱۲ به صورت زیر ساده می شود:

$$K_g = \frac{K_E}{1 + R_A / R_L} \qquad (۱۳-۴)$$

یعنی با این فرض ، K_g از سرعت آرمیچر مستقل است و تنها به مشخصات طراحی K_E ،بستگی دارد و بعلاوه با مقاومت بار R_L افزایش می یابد. در عمل ضریب تقویت تاکوژنراتورهای DC با مغناطیس دائم در حالت مدار باز $R_L \succ\succ R_A$ بین $K_g = 3$ تا $K_g = 100$ ولت بردور است.

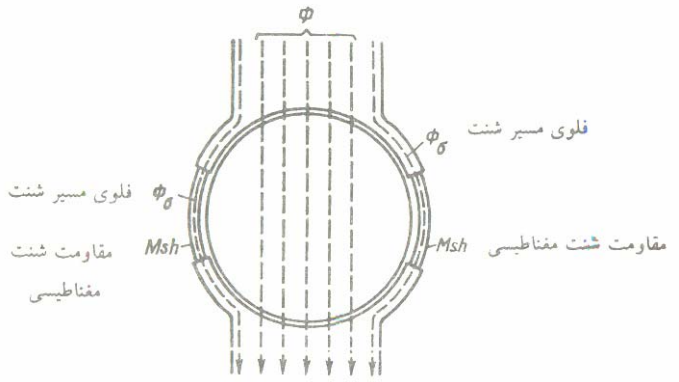
تاکوژنراتورهای DC با تحریک جداگانه ی میدان

گاهی یک تاکوژنراتور باید در محدوده ی وسیعی از سرعت کار کند. در این صورت استفاده از یک تاکوژنراتور با ضریب تقویت K_g قابل تنظیم می تواند مفید باشد . با توجه به اینکه K_g در یک تاکوژنراتور با فلوی میدان متناسب است، استفاده از تاکوژنراتوری، که فلوی میدان آن به جای مغناطیس دائم از طریق یک سیم پیچی روی قطب های آن تولید می شود، منطقی به نظر می رسد.اما این عمل چند عیب نیز به همراه دارد که استفاده از این نوع تحریک را مگر در موارد بسیار خاص منتفی می سازد.
ضریب تقویت K_g یک تاکوژنراتور مستقیما با Φ متناسب است و در نتیجه ، ثابت ماندن این ضریب در سطح تنظیم شده ، وابسته به پایدار ماندن Φ در مقدار لازم است . پس انتظار می رود که نوسانات احتمالی منبع ولتاژی ، که سیم پیچی میدان را تغذیه می کند موجب بروز خطا در عملکرد تاکوژنراتور شود.
خطای دیگری که به تغییر جریان و فلوی میدان منجر می شود، ناشی از تغییر مقاومت سیم پیچ های میدان در اثر گرم شدن آنهاست. این خطا خطای حرارتی نامیده می شود. به منظور جلوگیری از تغییر فلوی میدان در اثر تغییرات جزیی جریان ، می توان میدان مغناطیسی را بشدت اشباع کرد. ولی این عمل تنها برای یک سطح فلو و یک مقدار معین K_g امکان پذیر است و چنانچه لازم باشد K_g در مقدار دیگری تنظیم شود، استفاده از این امتیاز مقدور نیست.
استفاده از شنت مغناطیسی ، خطای حرارتی را تا حدی کاهش می دهد وامکان استفاده از تاکوژنراتور با میدان غیر اشباع را فراهم می آورد. شکل ۴-۴ چگونگی این عمل را نشان می دهد. چنانچه ملاحظه می شود لبه های هر دو قطب مجاور ، توسط تیغه های مغناطیسی به هم متصل می شوند و یک مسیر موازی با مسیر فاصله ی هوایی ، برای فلوی کل تولید شده توسط قطب ها ایجاد می کنند. در نتیجه در شرایط عادی مثلا در دمای معین ، درصد خاصی از فلوی کل از فاصله ی هوایی عبور می کند وموجب القای

نیروی محرکه می شود. با افزایش دما، فلوی کل میدان کاهش و رلوکتانس تیغه های مغناطیسی افزایش می یابد و تیغه ها درصد کمتری از فلوی کل را از خود عبور می دهند. این عمل تا حدی موجب ثابت ماندن فلوی گذرنده از فاصله ی هوایی می شود و خطای حرارتی را کاهش می دهد.
رفتار این نوع تاکوژنراتوردر مقابل عکس العمل آرمیچر نیز، کم و بیش مشابه تاکوژنراتور با مغناطیس دائم است.با این تفاوت که ، در حالتی که میدان آن بشدت اشباع شده است و همچنین در شرایطی که با میدان بسیار ضعیف کار می کند، اثر ضدمغناطیسی عکس العمل کاهش می یابد.

خطاهای تاکوژنراتورهای DC

از جمله مشخصات تاکوژنراتور در شرایط ایدهآل ، خطی بودن مشخصه ی ولتاژ خروجی برحسب سرعت است. علاوه برخطی بودن مشخصه، انتظار می رود مقدار K_g در مقدار پیش بینی شده ثابت بماند. هر عاملی که مانع از تحقق جنین شرایطی باشد، می تواند به عنوان یک منبع خطا برای تاکوژنراتور محسوب شود. آثار سوء ناشی از عکس العمل آرمیچر و نیز غیرخطی بودن افت ولتاژ در جاروبکها (به عنوان دو مورد خطا) مورد مطالعه قرار گرفت. در این قسمت خطاهای دیگری که ممکن است در یک تاکوژنراتور وجود داشته باشد، مورد مطالعه قرار می گیرد.

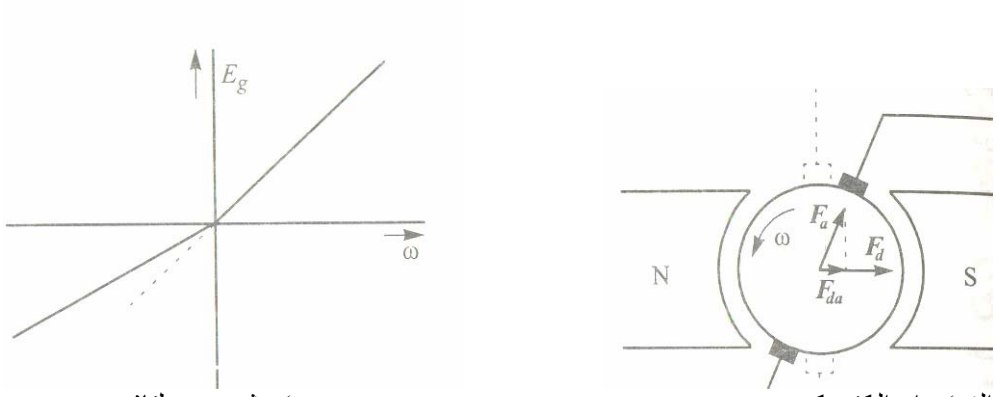


شکل ۴-۴ چگونگی استفاده از شنت مغناطیسی برای کاهش اثر حرارت

خطای ناشی از عدم تقارن محل جاروبکها

چنانچه جاروبکها دقیقا در محل خط خنثی قرار نگیرند مطابق شکل (۴-۵ الف) آمپر دور ناشی از جریان آرمیچر ، علاوه بر مولفه ی عرضی ، دارای یک مولفه ی طولی نیز خواهد بود. در شکل مزبور محل جاروبک ها به طور اغراق آمیزی از محل اصلی خود منحرف شده اند. جهت آمپر دور آرمیچر تابع جهت جریان آرمیچر و در نتیجه تابع جهت چرخش تاکوژنراتوراست.
در شرایط نشان داده شده در شکل ، تاکوژنراتوردر جهت مثلثاتی می چرخد و با توجه به قطبیت نیروی محرکه و جریان حاصل از آن، فلوی ناسی از مولفه ی طولی آرمیچر، هم جهت با میدان اصلی است. در حالی که اگر رتور در جهت عکس بچرخد، قطبیت نیروی

محرکه و از آنجا جهت جریان آرمیچر نیز تغییر می یابد و مولفه ی طولی میدان آرمیچر با میدان اصلی مخالفت می کند. این بدان معناست که مقدار فلوی طولی مفید در فاصله ی هوایی ، در حالتی که تاکوژنراتور با سرعت معین ولی در دو جهت مختلف می چرخد یکسان نیست و در نتیجه شیب خط مشخصه ی تاکوژنراتور برای $w \succ 0$ با مقدار آن در سرعتهای منفی مساوی نیست. بنابراین قدرمطلق ولتاژ خروجی تاکوژنراتور، در حالتی که با سرعت w می چرخد، با مقدار آن به هنگام چرخش با سرعت $w-$ متفاوت است.



ب) مشخصه ولتاژ سرعت　　الف)مدار الکتریکی

شکل ۴-۵ اثر انحراف جاروبک از محل خط خنثی

شکل (۴-۵ ب) مشخصه ی چنین تاکوژنراتوری را نشان می دهد. در این شکل جهت مثبت چرخش با جهت مثلثاتی متناظر فرض شده است. عدم قرار گرفتن جاروبکها روی محور خنثی ، ممکن است ناشی از خطای ساخت و یا نقص فناوری ساخت باشد.
درصد نامتعادلی ولتاژ خروجی در سرعت معین به صورت زیر است:

$$\%U = \frac{V_{A,CW} - V_{A,CCW}}{0.5(V_{A,CW} + V_{A,CCW})} * 100 \qquad (۱۴-۴)$$

در این معادله، $V_{A,CW}$ و $V_{A,CCW}$ به ترتیب ولتاژهای خروجی تاکوژنراتور در دو حالت چرخش با سرعت w ، در دو جهت مثلثلتی وعکس مثلثاتی است.

تموج ولتاژ خروجی

چنانچه طبق رابطه ۴-۱ از تعریف یک تاکوژنراتور ایده آل برمی آید، ولتاژ خروجی چنین تاکوژنراتوری باید، تنها با سرعت محور متناسب باشد. به عبارت دیگر انتظار می رود، شکل موج ولتاژ خروجی در هر سرعت ثابت صاف و عاری ازهر گونه تموج باشد. در عمل به علت محدودیت هایی که در ساخت تاکوژنراتورها وجود دارد، تموجهایی حاصل منابع مختلفی دارند و دامنه ی آنها معمولا نسبت به زمان ثابت نیست. در حالت کلی سه نوع تموج متفاوت شامل تموج کموتاتور، تموج شیار و تموج آرمیچر را می توان در ولتاژ خروجی تاکوژنراتور تمیز داد.
الف- تموج کموتاتور: تموجهای ناشی از کموتاتور در اکثر موارد به وسیله ی تغییر متناوب تعداد کلاف های سری شده در هر مسیر موازی سیم پیچی آرمیچر(در طی

کموتاسیون) تولید می شود. به عبارت دیگر تموج کموتاتور ناشی از قطع و وصلهای متوالی ، بین سیم پیچی آرمیچر و جاروبک هاست. طی این عمل یک یا چند کلاف که تحت عمل کموتاسیون قرار دارند، توسط جاروبکها اتصال کوتاه می شود و در نتیجه ولتاژ خروجی کمی افت می کند. بعد از آنکه اتصال کوتاه برطرف شد، ولتاژ خروجی هم بالا می رود. لرزش جاروبکها روی کموتاتور نیز ، یکی از عوامل به وجود آورنده تموج است. اگر تعداد تیغه های کموتاتور Z_C فرض شود، فرکانس این تموج در حالی که آدرمیچر با سرعت w می چرخد برابر است با:

$$w_c = Z_c w \Rightarrow f_c = \frac{Z_c w}{2\pi} \qquad (۱۵-۴)$$

به علت زیاد بودن تعداد تیغه های کموتاتور ، فرکانس این تموج نسبتا بالاست. دامنه تموج کموتاتور را می توان با ازدیاد تعداد کلاف و تیغه های کموتاتور کم کرد و نیز با هرچه صیقلی تر کردن سطح خارجی کموتاتور و نصب بهتر جاروبکها کاهش داد.

ب- تموج شیار: تموج شیار به دو دلیل مختلف ظاهر می شود. دلیل اول آنکه ، اندازه ی فلو و نیز چگونگی توزیع آن زیر هر قطب تغییر می کند زیرا رلوکتانس مسیر فوق در اثر سطح خارجی دندانه ای رتور تغییر می کند. با استفاده از گوه های الکترومغناطیسی در دهانه ی شیارها و نیز پیچش مناسب شیارها به همراه انتخاب صحیح عرض کفشک قطبها ، می توان میزان تغییرات مقاومت مغناطیسی مسیر فلو را کاهش داده و این عامل را تا حد زیادی خنثی کرد. یادآوری می شود که، این عمل نیروی محرکه ی خروجی را به مقدار اندکی نسبت به حالتی که شیارها پیچش ندارند کاهش می دهد. عامل دوم ناشی از محدود بودن تعداد شیارهاست. به عبارت دیگر ، وقتی که سیم پیچی آرمیچر در تعداد محدودی شیار توزیع می شود، اختلاف فاز نیروهای محرکه القا شده در شیارهای مختلف نسبتا بزرگ است و تموجهای قابل توجهی را به ولتاژ خروجی تزریق می کند. برای بیان چگونگی این عمل ابتدا فرض می شود که رتور تنها دو شیار دارد و آرمیچر دارای یک سیم پیچی متمکز است. در این صورت شکل موج ولتاژ خروجی به صورت شکل (۴-۶ الف) خواهد بود. چنانچه همین سیم پیچی در چهار شیار با زوایای 90° توزیع شده باشد، شکل موج خروجی بشکل (۴-۶ ب) درمیآید که عملا تموج آن به طور قابل ملاحظه ای کمتر شده است. به عنوان مثال فرض کنید یک ژنراتور DC دارای 100 سیم باشد، در حالت اول ، 100 سیم داخل 2 شیار به صورت یک سیم پیچی متمرکز 50دوری جا میگیرند و در حالت دوم ، همان 100 سیم در داخل 4 شیار توزیع می شوند. با توجه به معادله ی نیروی محرکه خروجی در حالت دوم کمتر است. عملا با افزایش تعداد شیار ، شکل موج ولتاژ خروجی بهبود می یابد و صافتر می شود. فرکانس تموج شیار از رابطه ی ۴-۱۶ به دست می آید:

$$f_s = \frac{Z_s w}{2\pi} \qquad (۱۶-۴)$$

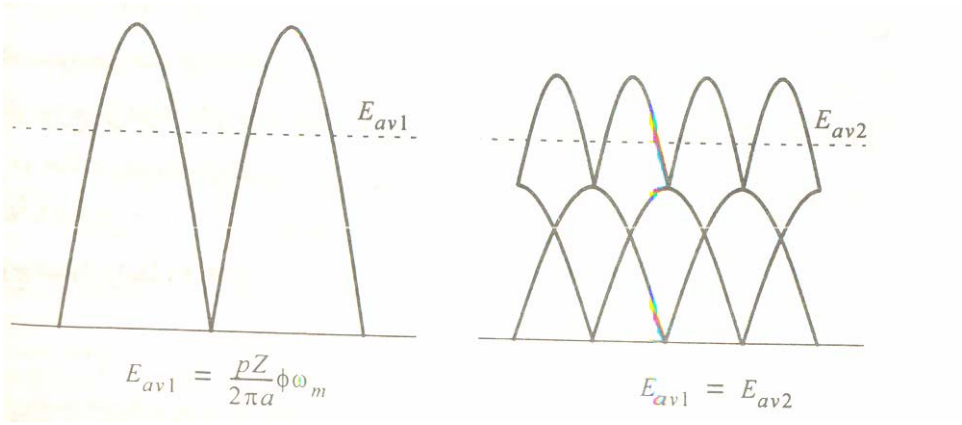
Z_s تعداد شیارهای سطح آرمیچر و w سرعت چرخش رتور است. اگر تعداد شیارها به بینهایت میل کند، فرکانس فوق نیز به بینهایت میل می کند و به طور همزمان دامنه ی نوسانهای ناشی از آن ، به صفر گرایش می یابد. لذا شکل موج ولتاژ خروجی به یک خط صاف تبدیل می شود.

به عبارت دیگر هرچه تعداد شیارها در یک ژنراتور DC زیادتر شود، شکل موج ولتاژ خروجی به DC کامل نزدیکتر می شود.

ج- تموج آرمیچر: تموج آرمیچر در اثر تغییرات احتمالی مقاومت مغناطیسی مسیر فلوی قطبها ، با موفعیت رتور و در نتیجه تغییر مقدار فلوی مغناطیسی در حین چرخش آرمیچر به وجود می آید. تغییرات مقاومت مغناطیسی ، ممکن است به سه دلیل بیضوی بودن سطح مقطع رتور، عدم تجانس ماده مغناطیسی هسته ی آرمیچر و یا خارج از مرکز بودن آرمیچرباشد.
فرکانس تموج آرمیچر در یک ماشین p قطبی، که با سرعت n دور در دقیقه می چرخد، برابر است با:

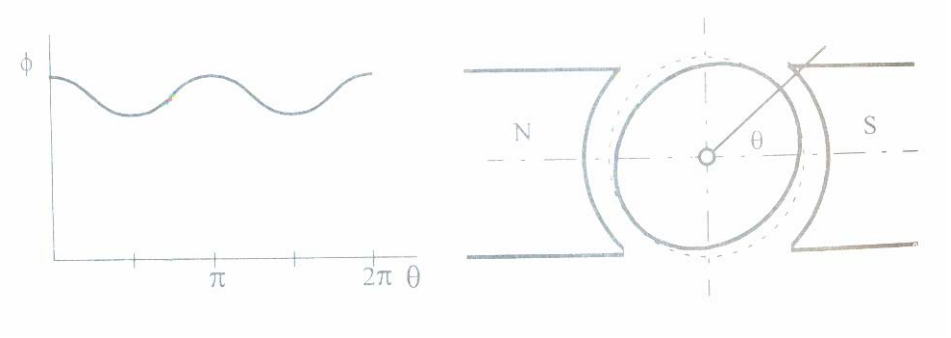
$$w_A = pw \Rightarrow f_A = \frac{pw}{2\pi} = \frac{pn}{60} \qquad (۱۷\text{-}۴)$$

هر یک از عوامل سه گانه فوق موجب تغییر مقاومت مغناطیسی مسیر فلو در حین چرخش می شود و منجر به تولید تموج می گردد. این عوامل ، در زیر شرح داده شده است.



شکل ۴-۶ اثر افزایش تعداد شیارها در کاهش تموج ولتاژ خروجی

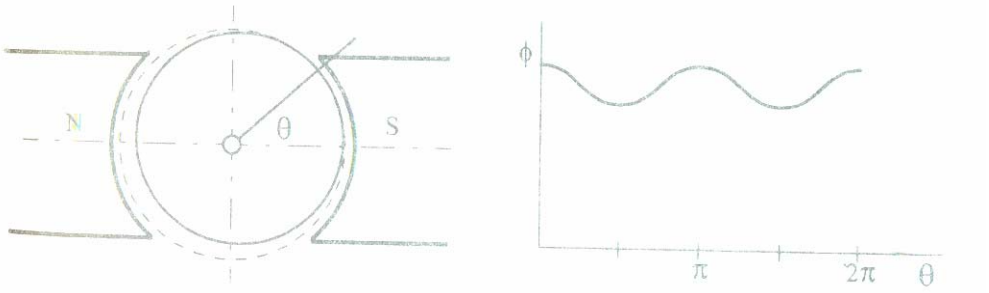
مقطع بیضوی رتور: اگر در حین تراش نهایی سطح خارجی رتور ، دقت کافی به عمل نیاید، سطح مقطع رتور به جای دایره ی کامل ، ممکن است بیضی شکل درآید. شکل (۴-۷ الف) چگونگی این حالت را به صورت اغراق آمیز نشان می دهد. چرخش چنین رتوری در فاصله ی هوایی ، موجب تغییر مقدار فلوی هر قطب، با زمان و با فرکانس اشاره شده مطابق رابطه ی ۴-۱۷ می شود. تغییرات فلو با زمان مستقیما روی مقدار متوسط نیروی محرکه ی تاکوژنراتور DC اثر می گذارد و موجب نوسان آن ، مطابق با نوسان مقدار فلو می شود. براحتی میتوان دریافت که به ازای هر دور چرخش رتور تاکوژنراتور دو قطبی فلوی میدان دو سیکل کامل طی خواهد کرد. بنابراین می توان انتظار داشت که به ازای هر زوج قطب فرکانس تموج آرمیچر معادل $\frac{2n}{60}$ باشد. این موضوع معادله ی $f_A = \frac{pn}{60}$ را تایید می کند. n سرعت چرخش برحسب rpm و p تعداد قطبها است. شکل (۴-۷ ب) نوسانات Φ و نیروی محرکه را در طول یک دور چرخش تاکوژنراتور دو قطبی با سرعت ثابت نشان می دهد. در اینحالت محور رتور در روی محور استوانه استاتور قرار دارد ولی منطبق بر محور استوانه رتور نیست.



الف) ساختمان تاکوژنراتور ب) تغییرات فلوی قطب با زاویه چرخش

شکل ۴-۷ چگونگی به وجود آمدن تموج آرمیچر در اثر روتور بیضوی

عدم تجانس ماده ی مغناطیس هسته رتور: عدم تجانس ماده هسته به حالتی اطلاق می گردد که ، پرمابیلیته ورقهای آهن به کار رفته در ساخت هسته رتور ، در امتدادهای مختلف یکسان نباشد. چنین حالتی در ورقه های روتور یک ماشین گردان ، می تواند ناشی از اشکالات تکنولوژیکی در ساخت این ورقه ها باشد. عدم تجانس نیز موجب تغییرات مقاومت مغناطیسی مسیر فلو در حین چرخش می شود و شرایطی را مانند آنچه در قسمت قبل اشاره شد(بیضوی بودن آرمیچر) پدید می آورد. یادآوری می شود که ورقه های با ذرات مغناطیسی جهت دار که در ساختن هسته ترانسفورماتورها به کار می روند نیز ، بشدت غیر ایزوتوپ هستند که در ماشینهای الکتریکی کاربرد چندانی ندارند.
خارج از مرکز بودن هسته رتور: این عامل نیز می تواند در اثر اشکال در تراشکاری محور رتور و یا محل بلبرینگ ها بروز کند. شکل ۴-۸ چگونگی این حالت را به صورت اغراق آمیز نشان می دهد. در این حالت محور روتور بر محور چرخش (شفت) منطبق نیست هرچند که با استوانه استاتور هم محور است.



شکل ۴-۸ نمایش چگونگی تغییرات رلوکتانس فاصله هوایی در حین چرخش روتور خارج از مرکز

چنانکه مشاهده می شود نتیجه خارج از مرکز بودن محور نیز ، مشابه نتیجه حاصل از دو عامل بررسی شده است و تغییرات فلوی قطبها در حین چرخش رتور موجب بروز تموج در نیروی محرکه می شوند.
با توجه به روابط ۴-۱۵ و۴-۱۶ فرکانس تموجهای کموتاتور و شیار زیاد است وعملا با استفاده از فیلترهای ساده ، حتی بسادگی یک خازن مناسب موازی ، از بین می روند. این عمل در مورد تموج آرمیچر ، که فرکانس پایینی دارد چندان آسان نیست. آثار زیانبار تموجهای آرمیچر ، هنگامی به بدترین نحو آشکار می شود که تاکوژنراتور به عنوان قسمتی از یک سیستم کنترل اتوماتیک است ودر محدوده ی سرعتهای کم کار می کند. به عنوان مثال در حالتی که یک سیستم به موقعیت دائمی خود نزدیک می شود زمان تناوب

تموج آرمیچر با ثابت زمانی سیستم کنترل قابل مقایسه می گردد و ممکن است خطای زیادی را در فرآیند کنترل به وجود آورد. با انتخاب فاصله ی هوایی نسبتا بزرگتر ، دامنه ی تغییرات رلوکتانس را کاهش می دهند و از آنجا دامنه ی نوسان فلو را در حین چرخش به حداقل می رسانند. بدیهی است این عمل به قیمت کاهش فلوی هر قطب ودر نتیجه کاهش ضریب تقویت (حساسیت) یک تاکوژنراتور به ازای تحریک خاص تمام می شود.
استفاده از تاکوژنراتور با آرمیچر دیسکی و یا آرمیچر غیر مغناطیسی توخالی تموجهای شیار و آرمیچر را بکلی از بین می برد. دامنه تموج در تاکوژنراتور دقیق در حد 0.1 تا 1 درصد است.