ششمین کنفرانس ملی ایده های نو در مهندسی برق
۱۷ اسفند ۹۶-دانشگاه آزاد اسلامی واحد اصفهان (خوراسگان)

تکنیک جدید اتلاف پائین و اندازه گیری دقیق جریان در موتورهای محرک ac

عبدالرضا اسماعیلی[۱]، محمد رهبر[۲]
[۱] پژوهشکده پلاسما و گداخت هسته ای، سازمان انرژی اتمی ایران، تهران، ایران.
[۲]دانشگاه آزاد اسلامی، واحد ساوه. ساوه، ایران و کارخانه داروسازی دانا، تبریز، ایران.

چکیده - سرعت و ولتاژ کنترل اتلاف-سنسور به سنجش جریان نیاز دارد که کنترل صحیح با هزینه پائین، اختلال و پیچیدگی را ایجاد می نماید. سنجش جریان موتور برای رفع تحریف گشتاوری و دستیابی به گشتاور همسان لازم می باشد. متداول ترین شیوه تخمین جریان درج مشاهده مقاومت در مسیر جریان نامشخص می باشد. این شیوه باعث اتلاف زیاد برق در برونداد بالای جریان می گردد. مقاومت به تغییرات دما و تلرانس بستگی دارد. استفاده از شیوه تنظیم خودکار جهت رفع تأثیر نامناسب دمای حرارتی، تلرانس اجزاء و اختلال ارجحیت دارد. در این مقاله، با استفاده سنجش جریان مبنی بر فیلتر تنظیم خودکار این مسئله بررسی می‌شود. اما شیوه جریان مشاهده شده موجود در فیلتر پائین است و با اختلال قابل کاهش می باشد و برای کنترل جریان مورد تأیید نیست. بنابراین می توان از شیوه ترکیبی برای بهبود *SNR* استفاده کرد.

کلید واژه- درجه بندی، خنثی سازی، سنجش جریان، فیلتر، مشاهده ترکیبی

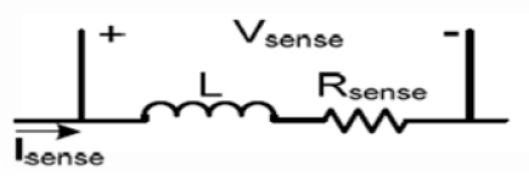
۱- مقدمه

سنجش جریان کاربردهای زیادی برای تجهیزات برق الکترونیکی و موتور دارد. از سنجش جریان جهت کنترل، محافظت، نظارت، و اهداف مدیریت برق استفاده می شود. پارامترهایی مانند هزینه پائین، صحت، سنجش جریان بالا، نیازهای ایزولاسیون، پهنای باند فرکانس گسترده، خطی بودن و پایداری با تغییرات دما، امنیت بالا نسبت به dv/dt ، تلاش اندک، زمان سریع واکنش، و سازگاری با پروسه ادغام جهت اطمینان از عملکرد بالای سنسورهای جریان مورد نیاز می باشند.

متداول ترین شیوه مشاهده جریان درج یک مقاومت سنسور در جریانات برونداد بالا می باشد. گزینه های دیگر سنجش صحیح و کم اتلاف در این پایان نامه مطرح گردیده اند.

۱-۱- تکنیک حسگر جریان با استفاده از مقاومت داخلی یک القاگر و فیلتر

طرز فکر اولیه این تکنیک از مشاهده جریان مبنی بر مقاومت با استفاده از مقاومت سنسور خارجی نشأت یافته است. در فرکانس های بالاتر، اندوکتانس مقاومت R_{sense} معادل پارازیت آشکار می گردد. بنابراین، برای خنثی سازی اندوکتانس پارازیتی ضرورت دارد. مدار مشابه با R_{sense} در این مورد در شکل ۱ نشان داده شده است [2],[1].



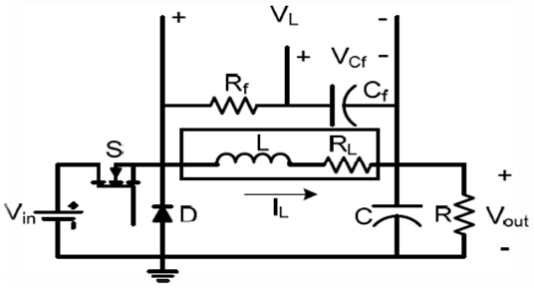
شکل ۱: مدار مشابه با R_{sense}

$$V_{sense}(s)=(R_{sense}+Ls)I_{sense}(s) \\ =K\times I_{sense}(s) \quad (۱)$$

در فرکانس های پائین‌تر، ولتاژ V_{sense} متناسب با جریان I_{sense} است. در فرکانس های بالاتر، تقویت k به دلیل اندوکتانس پارازیتی افزایش میابد. یک صافی پائین گذر مناسب، که می تواند فعال یا انفعالی باشد، جهت جبران تقویت k لازم می باشد. در صورت استفاده از یک صافی پائین گذر C_fR_f، ولتاژ از صافی V_{Cf} عبور می‌کند که با معادله ۲ نشان داده شده است.

$$V_{cf}(s)=\left(\frac{R_{sense}+Ls}{1+R_f C_f s}\right)I_{sense}(s) \quad (۲)$$

همانطور که در بخش قبل اشاره شد، القاگر مارپیچی دارای DCR یا مقاومت داخلی R_l می باشد. استفاده از DCR القاگر L به عنوان R_{sense} و خود القاگر L به عنوان القاگر پارازیتی در مورد بالا امکانپذیر می باشد. بنابراین، در تکنیک حسگر جریان موجود در صافی از مقاومت R_l القاگر L و صافی انفعالی C_f R_fنشان داده شده در شکل۲، جهت حسگر صحیح جریان استفاده می شود. مجموع امپدانس صافی $R_f C_f$ شبیه به مجموع امپدانس L و R_L است. این تکنیک در حال حاضر به دلیل صحت، کاهش اتلاف، و باند گسترده بالا مناسب است. مزیت‌های دیگر این تکنیک شامل: سنجش مداوم جریان، هزینه پائین، ذخیره فضای PCB، و بهبود کارائی برق می‌شوند.



شکل ۲: تکنیک حسگر جریان موجود در صافی

این تکنیک سیگنال جریان I_L را با خازن حسگر C_f ولتاژ (V_{cf}) تشخیص می دهد.

ولتاژ V_{cf} با معادله زیر نشان داده شده است:

$$V_{cf}(s)=I_L(s)\left(\frac{R_L+Ls}{1+R_f C_f s}\right) \quad (۳)$$

صافی موازی $R_f C_f$ به شیوه ای طراحی شده که ۴ و ۵ به شرح ذیل ایجاد شده اند:

$$R_f C_f=\frac{L}{R_L} \quad (۴)$$

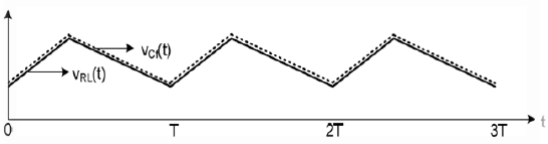
$$\frac{L}{R_L}\geq T \quad (۵)$$

در اینجا $\tau_L=\frac{L}{R_L}$ القاگر ثابت زمانی و $\tau_C=R_f C_f$ صافی پائین گذر ثابت زمانی است. ایجاد (۴) بسیار دشوار است. اما، ایجاد (۵) ساده است چون گزینی فرکانس معمولا جهت چند هزار کیلوهرتز و مقاومت RL در میلی اهم mili-ohms می باشد.

در صورت ایجاد (۴) و (۵)، القاگر جریان I_L با معادله زیر نشان داده شده است:

$$I_L=\frac{V_{cf}}{R_L} \quad (۶)$$

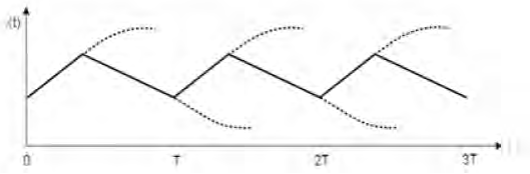
شکل۳ واکنش ولتاژ V_{Cf} و V_{RL} در هنگامی که ثابت زمانی τ_L و τ_C مطابقت داشته باشند را نشان می‌دهد.



شکل ۳: ولتاژ V_{Cf} و V_{RL} در صورت $\tau_L=\tau_C$

امکان عدم مطابقت ثابت های زمانی وجود خواهد داشت؛ یک زمان ثابت می تواند بیشتر یا کمتر از زمان‌های دیگر به دلیل تلرانس اجزاء، تابعیت حرارتی R_L و تغییر در القاگر به دلیل پیشقدر جریان dc باشد. شکل ۴ واکنش ولتاژ V_{Cf} در وضعیت ثابت را نشان می دهد. هنگامی که سوئیچ s روشن است، جریان I_L به نسبت $(V_{in}-V_{iut})/(L)$ افزایش می‌یابد و خازن C_f شارژ می شود.

هنگامی که دیود چرخش آزاد روشن است و کلید s خاموش است جریان I_L به میزان $-V_{out}/L$ کاهش می‌یابد و خازن C_f تخلیه می شود. از طریق نسبت های شارژ و تخلیه، یافتن انحراف ولتاژ V_{Cf} امکانپذیر می‌گردد.



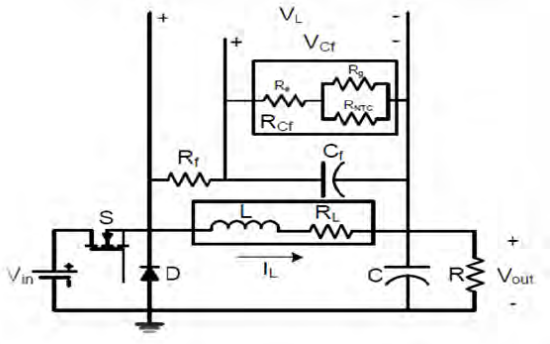
شکل ۴: ولتاژ V_{Cf} در وضعیت ثابت

در صورتی که ثابت های زمانی τ_L و τ_C مطابقت نداشته باشند، مواجی ولتاژ مضاعف V_{Cf} بزرگتر یا کوچکتر از مواجی ولتاژ مضاعف در بین مقاومت R_L ایجاد شده توسط جزء ac جریان I_L می‌گردد. این مورد نسبت محل تلاقی ولتاژ V_{Cf} شکل۴ را تغییر می‌دهد.

۱-۲- صافی موجود در حسگر جریان با خنثی کردن حرارت

یک خطا در حسگر جریان موجود در صافی به دلیل تابعیت حرارت مقاومت R_L مشاهده گردید. جهت کمینه سازی این خطا، مقاومت R_{Cf} در خازن C_f جهت خنثی کردن حرارت اضافه شده است، که بر طبق شکل ۵ می باشد. R_{Cf} ترکیب مقاومت های R_g ، R_e و R_{NTC} است و R_{NCT} دمای منفی ضریب-مشترک مقاوم است [۳].

مقاومت R_{Cf} نیز جهت کاهش تدریجی جریان تشخیص داده شده قابل استفاده می باشد.



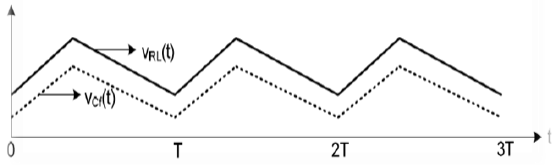
شکل ۵: صافی موجود در حسگر جریان با دمای شبکه خنثی شده

افزودن مقاومت R_{Cf} به مدار ثابت زمانی صافی را تغییر می‌دهد. ثابت زمانی صافی جدید با معادله زیر نشان داده شده است:

$$\tau_C = C_f\left(\frac{R_f R_{Cf}}{R_f + R_{Cf}}\right) \qquad (۷)$$

در صورت اضافه شدن R_{Cf} به مدار و تطبیق ثابت های زمانی τ_L و τ_C، ولتاژ V_{Cf} با معادله (۸) نشان داده شده است. ولتاژ DC روی خازن صافی با ضریب $R_{Cf}/(R_{Cf}+R_f)$ با وجود مقاومت R_{Cf} نشان داده شده در شکل۶ تغییر سطح داده است.

$$V_{Cf} = I_L\left(\frac{R_L R_{Cf}}{R_f + R_{Cf}}\right) \qquad (۸)$$



شکل ۶: ولتاژ V_{Cf} و V_{RL} ، در صورت $\tau_L = \tau_C$ می باشد، و مقاومت R_{Cf} به مدار اضافه شده است

۱-۳- صافی موجود در حسگر جریان با RL صحیح

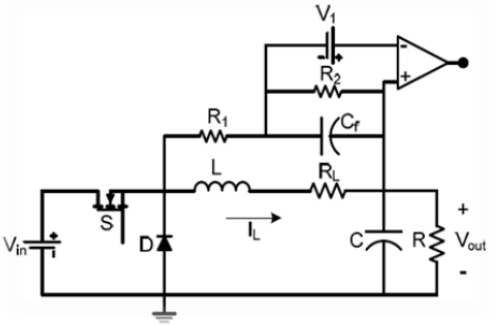
در صورت استفاده از تکنیک حسگر جریان موجود در صافی جهت محافظت از جریان بیشتر، و ثابت زمانی L، τ که بزرگتر از ثابت زمانی τ_C باشد، مدار محافظت از جریان بیشتر در کمتر از جریان مطلوب قابل حرکت می‌باشد. هنگامی که ثابت زمان کمتر از ثابت زمان باشد، واکنش مخالف وجود دارد. این مورد به دلیل واقعیت عدم صحت مقدار RL می باشد؛ که بزرگتر از مقدار مورد نظر است. به منظور بررسی تردید پارامتر R_L؛ یک مدار حسگر جریان اصلاح شده جهت محافظت از جریان بیشتر در شکل ۷ نشان داده شده است. طراحی مراحل این تکنیک در زیر ارائه گردیده است [۴]:

در صورتی که V_1 ولتاژ در حال حرکت باشد، I_1 جریان در حال حرکت است، جریان با معادله زیر نشان داده شده است:

$$I_1 = \frac{V_1}{R_L} \qquad (۹)$$

به منظور دستیابی به مقدار فعلی R_L، مقاومت سنسور مورد نظر R_{sense} به شرح ذیل قابل محاسبه است:

$$R_{sense} = \frac{V_1}{I_1} \qquad (۱۰)$$



شکل ۷: حسگر جریان موجود در صافی با R_L صحیح

هنگامی که مقدار R_{sense} مشخص شد، مقدار القاگر L از طریق مقدار R_L که با معادله زیر قابل تعیین است قابل مشاهده می باشد:

$$R_L \geq R_{sense} \qquad (۱۱)$$

حداکثر مقدار L در جریان صفر و حداقل مقدار R_L در دمای اتاق جهت یافتن مقدار ثابت τ_C سنجیده شد:

$$R_{F\min} C_{F\min} \geq \frac{L_{\max}}{R_{L\min}} \qquad (۱۲)$$

در صورتی که R_L بزرگتر از R_{sense} باشد، مقادیر مقاومت R_1 و R_2 باید به شیوه ای انتخاب شوند که در (۱۳) انجام شده است.

$$\frac{R_2}{(R_1+R_2)} = \frac{R_{sense}}{R_L} \qquad (31)$$

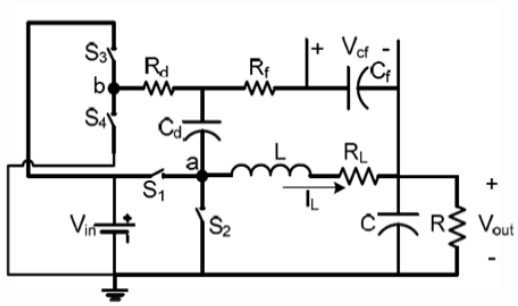
R_f ، شکل۲ معادل مقاومت منتج از اتصال موازی بین مقاومت-های R_1 و R_2 در شکل ۷ می‌باشد. R_L شکل۲ معادل $R_L \times R_2/(R_1+R_2)$ در شکل ۷ می باشد.

۱-۴- تکنیک حس-ترکیبی

جریان مشاهده شده در حسگر جریان موجود در صافی مقدار پائینی دارد و مستعد انقطاع پارازیت است، که در صورت کنترل حالت-جریان مورد تأیید نمی باشد. به منظور حل این مسئله، تکنیکی جدید در شکل ۸ نشان داده شده است. این تکنیک SNR بهتری را جهت جریان حس شده ایجاد می کند. تکنیک حس ترکیبی شامل کلیدهای دیگر S_3، S_4 ، مقاومت R_d و خازن C_d در حسگر جریان موجود در صافی، مانند شکل ۸ می‌باشد.

کلیدهای S_3 و S_4 به منحنی b متصل شده اند. یکی از قسمتهای انتهایی مجموع اتصالات آنها به V_{in} متصل شده و قسمت دیگر به زمین متصل شده استم. کلیدهای S_1 و S_2 به منحنی a متصل شده اند. RDS کلیدهای S_1، S_4 بر طبق طرح راه گزینی به صافی اضافه شده اند. هنگامی که کلیدهای S_1 و S_3 روشن هستند و کلیدهای S_2 و S_4 خاموش هستند، مقاومت صافی شامل R_{DS} هر دو کلید S_1 و S_3 می شود. همچنین، هنگامی که کلیدهای S_2 و S_4 روشن هستند و کلیدهای S_1 و S_3 خاموش هستند، مقاومت صافی شامل RDS هر دو کلید S_2 و S_4 می گردد. در این شیوه، جریان در هر زمان در طی سیکل قابل تشخیص است. تشخیص افزایش یافته مقاومت مدار ولتاژ V_{Cf} را بالا می برد، بنابراین سیگنال خروجی تمیز است و کمتر مستعد اختلال می باشد. هنگامی که کلیدها وضعیت را از خاموش و یا خاموش به روشن تغییر می‌دهند، به طور موقت در وضعیت خاموش قرار می گیرند. مقاومت R_d و خازن C_d مانند صافی پائین گذر (R_dC_d) در طی زمان مرده جهت مانع شدن از فرکانس بالا سیگنال فراگذر از طریق تأثیرگذاری بر روی سیگنال تشخیص جریان عمل می کند. صافی R_dC_d نیز فعالیت منحنی های a و b را همگام سازی می نماید.

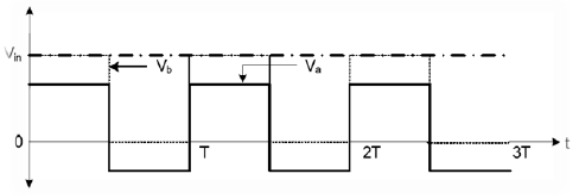
ولتاژهای نقاط a و b (V_a و V_b) در شکل ۹ نشان داده شده اند. ولتاژ V_a اندکی کمتر از ولتاژ V_{in} و ولتاژ V_b تقریبا شبیه به ولتاژ V_{in} است. چون درجه بندی کلیدهای S_1 و S_2 بیشتر از درجه بندی های کلیدهای S_3 و S_4 است. صافی R_dC_d میانگین تفاوت ولتاژ اصلی و جریان دقیق را می سنجد [۵].



شکل ۸: تکنیک تشخیص ترکیبی

جهت دستیابی به سنجش مداوم جریان به طور صحیح، کاهش اتلاف، راه گزینی پائین اختلال، و پهنای باند بالا، تکنیکی اصلاح شده در شکل ۱۰ نشان داده شده است.

مدار مشاهده شده درجه بندی و در طی شروع تنظیم شده است و القاگر جریان در طی فعالیت عادی سنجیده شده است، که تضمین کننده صحت توأم با مزیتهای سنجش مداوم جریان می باشد. صافی g_mC_f یک صافی پائین گذر مرتبه اول می باشد. که به طور مجزا برای هر کاربرد طراحی گردیده و مشخصات القاگر مقاومت R_f را متغیر نشان داده است. تغییر فرکانس f_c با تغییر مقدار R_f و جهت تغییر قدرت گیرنده صافی با تغییر مقدار gm امکانپذیر می باشد. صافی g_mC_f سنجش صحیح جریان را پس از تنظیم و درجه بندی انجام می دهد.



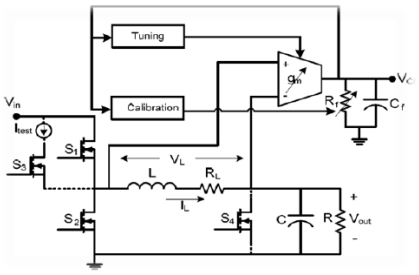
شکل ۹: ولتاژهای V_a و V_b در تکنیک مشاهده ترکیبی

با استفاده از ولتاژ V_L در یک صافی g_mC_f، واکنش فرکانس ولتاژ مطابق با واکنش جریان القاگر، به شرح ذیل قابل ثبت می باشد:

$$I_L(S)\left(\frac{(R_L)+Ls}{1+R_fC_fs}\right)V_{cf}(s)=g_mR_f \qquad (۱۴)$$

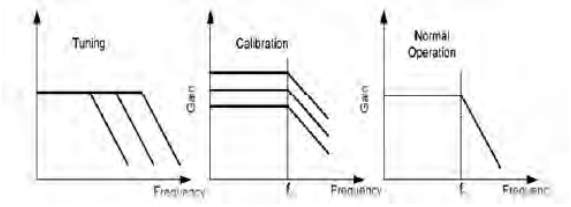
در صورتی که R_f با هر دو ثابت زمانی (معادله ۴) مطابقت داشته باشد، جریان I_L با معادله زیر نشان داده شده است:

$$I_L=\left(\frac{V_{cf}}{(g_mR_f)R_L}\right) \qquad (۱۵)$$



شکل ۱۰: تکنیک مبنی بر صافی با تنظیم و درجه بندی خودکار

در اینجا، $(g_mR_f)R_L$ افزایش مشاهده جریان است، که در هر مقدار با تغییر R_f یا g_m قابل تنظیم است. تنظیم و درجه‌بندی در طی شروع فعالیت انجام شده است تا با افزایش-پهنای باند صافی و افزایش dc صافی جهت سنجش صحیح جریان، بر طبق شکل ۱۱ مطابقت پیدا کند.



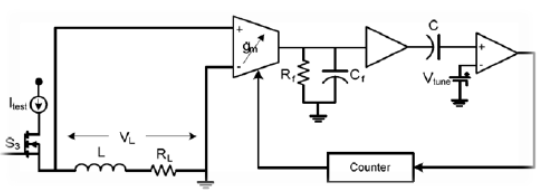
شکل ۱۱: تنظیم، درجه بندی، و فعالیت عادی صافی مبین بر تکنیک تشخیص جریان

هنگامی که تنظیم و کالیبراسیون در طی روشن شدن صورت می گیرد، سوئیچ های S_1 و S_2 غیر فعال نگه داشته می‌شوند، بنابراین هیچ برقی در طی فعالیت عادی تلف نمی شود. این تکنیک القاگر جریان را در طی کارکرد عادی می سنجد.

همانطور که در شکل ۱۲ نشان داده شده سوئیچ های S_1 و S_2 خاموش نگه داشته می شوند و سوئیچ های S_3 و S_4 در طی شروع به کار به منظور تنظیم روشن نگه داشته می شوند [۶].

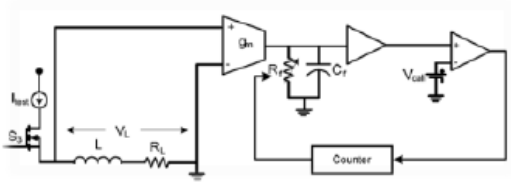
تست فرکانس جریان به حد کافی بالاست که ولتاژ موجود در القاگر بر اندوکتانس L و نه توسط مقاومت R_L غلبه کرده است چون امپدانس القاگر بالاتر از مقاومت R_L در فرکانس‌های بالاتر است. سیگنال ولتاژ ac بدست آمده در القاگر L یک موج چهارگوش است. صافی g_mC_f این ولتاژ موج چهارگوش V_L را به ولتاژ موج سه گوش V_L تبدیل می‌کند چون خازن امپدانس کوچکتر از مقاومت R_f در فرکانس بالاتر است.

$R_{esisto}R_f$ در مقدار حداقل خود باقی می ماند تا جابجائی DC در طی پروسه تنظیم را کاهش دهد. سپس برونداد صافی میانگیردار می شود و ترکیبات DC حذف می‌گردند.



شکل ۱۲: عمل تنظیم جهت صافی مبنی بر تکنیک تشخیص جریان

اوج سهم AC از ولتاژ V_{Cf} با تنظیم ولتاژ V_{tune} با تنظیم g_m مطابقت دارد. هنگامی که هر دو ولتاژ مطابقت پیدا می‌کنند، مقایسه کننده مقادیر آنها را ذخیره و به یک سیگنال توقف در شمارنده می فرستد. فاز کالیبراسیون بلافاصله سیکل تنظیم را دنبال می کند. یک تست جریان کوچک DC برای القاگر جهت کالیبراسیون بر طبق شکل ۱۳ انجام می شود. مقدار مقاومت صافی R_f در پروسه کالیبراسیون تنظیم می شود تا V_{Cf} را با ولتاژ کالیبراسیون V_{cali} مطابقت دهد.



شکل ۱۳: عمل کالیبراسیون جهت صافی مبنی بر تکنیک تشخیص جریان

در طی تنظیم، فرکانس قطع جریان صافی g_mC_f با فرگانس قطع جریان القاگر مطابقت می‌نماید، بنابراین رابطه‌ی (۱۶) ایجاد می‌شود. در طی پروسه کالیبراسیون، افزایش تشخیص جریان $(g_mR_f)R_L$ با هر مقدار مطابقت پیدا میکند. در صورتی که مقدار افزایش $(g_mR_f)R_L$ بر روی ۱ اهم تعیین شود، مقدار V_{Cf} مستقیما می‌تواند اطلاعات مربوط به القاگر جریان را تأمین نماید:

$$I_L = V_{Cf} \qquad (۱۶)$$

هنگامی که تنظیم و پارامترهای کالیبراسیون به طور صحیح تعیین و ذخیره شدند، مبدل امکان فعالیت عادی را دارد.

۲- نتیجه‌گیری

سنجش جریان دارای کاربردهای زیادی در تجهیزات الکترونیکی برق و نیروهای محرکه می باشد. سنجش جریان برای کنترل، محافظت، نظارت، و اهداف کنترل برق بکار می رود. پارامترهایی مانند هزینه پائین، صحت، سنجش جریان بالا، نیازهای مربوط به تفکیک، فرکانس گسترده پهنای باند، خطی بودن و مقاومت در تغییرات دمائی، امنیت بالا در برابر dv/dt ، تلاش اندک، زمان واکنش سریع، و سازگاری با پروسه ادغام جهت تضمین کارائی بالای سنسورهای جریان لازم می باشند. در بیشتر شیوه ها، سنجش صحت تابع پارامترهای مشخصی مثل میزان مقاومت در مقاومت مبنی بر تشخیص جریان می باشد.

این مقدار در معرض تغییرات دمائی و عدم صحت قرار می گیرد. استفاده از شیوه های تنظیم خودکار به منظور حذف تلاشهای غیر مطلوب ناشی از دما، تلرانس و اختلال اجزاء بهتر می باشد. جریان نسبت به دمای اجزاء، اختلال و شرایط کارکرد حساس است. راه حل استفاده از شیوه های تنظیم خودکار (کالیبراسیون خودکار) میباشد که پارامتر آنها به طور خودکار تنظیم خواهد شد. در این مقاله، تشخیص جریان موجود در صافی با تنظیم خودکار را به منظور غلبه بر این مشکل بررسی می نمائیم. چون جریان دارای مقداری پائین است و مستعد قطع اختلال میباشد، بنابراین جهت کنترل وضعیت جریان مورد تأیید نمی باشد. از اینرو شیوه تشخیص ترکیبی به عنوان یک گزینه دیگر قابل استفاده می باشد. مزیتهای آن شامل موارد زیر می شوند: کاهش اتلاف، صحت، اختلال پائین در تعویض جریان، سنجش مداوم جریان، افزایش نسبت SNR و همچنین مطابقت با ثابت های زمانی.

مراجع

[1] Esmaili, A., & Shirazi, Y. N, *Combined current sensing in power electronic applications for increasing SNR ratio.* International Research Journal of Applied and Basic Sciences, 5(9), 1155-1163, 2013.

[2] Forghani-zadeh, H. P., & Rincón-Mora, G. A., *A lossless, accurate, self-calibrating current-sensing technique for DC-DC converters*. In Industrial Electronics Society, 2005. IECON 2005. 31st Annual Conference of IEEE (pp. 6-pp). IEEE, 2005.

[3] Hua, L., & Luo, S, *Design considerations of time constant mismatch problem for inductor DCR current sensing method.* In Applied Power Electronics Conference and Exposition, 2006. APEC'06. Twenty-First Annual IEEE (pp. 7-pp). IEEE, 2006.

[4] LINFINITY, Application Note AN-7: A simple-current sense technique eliminating a sense resistor. (Last visited: 7th November 2007).

[5] Forghani-Zadeh, H. P., & Rincón-Mora, G. A, *An accurate, continuous, and lossless self-learning CMOS current-sensing scheme for inductor-based DC-DC converters.* IEEE Journal of Solid-State Circuits, 42(3), 665-679, 2007.

[6] Forghani-zadeh, H. P, *An Integrated, Lossless, and Accurate Current-Sensing System for High-Performance DC-DC Converters, 2004.*