

کاهش مشارکت تولیدات پراکنده سنکرون در تغذیه جریان خطا

جابر حیدری کبریتی^۱، دانشجوی کارشناسی ارشد؛ سیدمحمد مدنی^۲، استادیار؛ رحمت‌الله هوشمند^۳، استاد
 ۱- گروه مهندسی برق - دانشکده فنی و مهندسی - دانشگاه اصفهان - اصفهان - ایران - j.heidari@eng.ui.ac.ir
 ۲- گروه مهندسی برق - دانشکده فنی و مهندسی - دانشگاه اصفهان - اصفهان - ایران - m.madani@eng.ui.ac.ir
 ۳- گروه مهندسی برق - دانشکده فنی و مهندسی - دانشگاه اصفهان - اصفهان - ایران - hooshmand_r@eng.ui.ac.ir

چکیده: حضور گسترده تولیدات پراکنده (DG) در شبکه با بالا بردن سطح اتصال کوتاه، باعث از بین رفتن هماهنگی ادوات حفاظتی در سیستم توزیع می‌شود. با توجه به این که DGهای از نوع ماشین سنکرون (SMDGها) بیشترین مشکل را برای هماهنگی سیستم حفاظت (رله‌های اضافه جریان) ایجاد می‌کنند؛ در این مطالعه تخلیه میدان تحریک SMDGها، هنگام وقوع خطا پیشنهاد شده است. در این روش، مشارکت SMDGها در تغذیه جریان خطا، با کنترل جریان تحریک، محدود می‌شود. با وقوع خطا و تشخیص آن توسط مدار کنترلی، تحریک از سیم‌پیچ میدان جدا شده و مدار تخلیه به صورت سری با سیم‌پیچ میدان قرار می‌گیرد و انرژی ذخیره شده در میدان را سریعاً کاهش می‌دهد. برای تخلیه میدان تحریک، دو نوع مدار تخلیه، مقاومتی و ترکیبی، بررسی می‌شوند که هر کدام بسته به میزان توان خروجی DG و رله‌های موجود در شبکه می‌توانند کاربرد داشته باشند. روش پیشنهادی روی یک سیستم توزیع نمونه در سیمولینک متلب پیاده‌سازی شده است؛ نتایج حاصل از شبیه‌سازی کارایی روش پیشنهادی را تأیید می‌کند.

واژه‌های کلیدی: تولید پراکنده، DG ماشین سنکرون، رله‌های اضافه، مدار تخلیه، خطا، تحریک.

Reduce the Participation of Synchronous Dispersed Generator in Fault Current

Jaber Heidari Kebriti¹, MSc Student; Seyed Mohammad Madani², Assistant Professor; Rahmatollah Hooshmand³, Professor

1- Department of Electrical Engineering, Faculty of Engineering, University of Isfahan, Isfahan, Iran, Email: j.heidari@eng.ui.ac.ir
 2- Department of Electrical Engineering, Faculty of Engineering, University of Isfahan, Isfahan, Iran, Email: m.madani@eng.ui.ac.ir
 3- Department of Electrical Engineering, Faculty of Engineering, University of Isfahan, Isfahan, Iran, Email: hooshmand_r@eng.ui.ac.ir

Abstract: High Distributed Generation (DG) penetration increases distribution system short circuit currents level, which can disrupt protective relays coordination. Synchronous-machine DGs (SMDG) are main agent in disrupting the coordination of the Over-Current relays (OCR). This paper proposed a field discharge circuit to reduce the generator's current during faults. The proposed method limits the participation of synchronous dispersed generator in fault current by controlling the generator field current. After fault detection, exciter will be separated from the field winding and field discharge circuit become series with the field circuit. This paper investigated two kinds of field discharge circuit (resistance discharge circuit and complex discharge circuit); that each one apply in the network depend on DG's output power and existence relay in the network. The proposed method implemented on a case network in Matlab/SIMULINK; which the simulated results confirmed the effectiveness of this method.

Keywords: Distributed generation (DG), Synchronous-machine DG (SMDG), Over-current relay (OCR), Field discharge, Fault, Exciter.

تاریخ ارسال مقاله: ۱۳۹۳/۰۹/۰۳

تاریخ اصلاح مقاله: ۱۳۹۳/۱۰/۱۲ و ۱۳۹۳/۱۲/۱۸

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۳۹۴/۰۱/۱۷

نام نویسنده مسئول: سیدمحمد مدنی

نشانی نویسنده مسئول: ایران - اصفهان - میدان آزادی - دانشگاه اصفهان - دانشکده فنی و مهندسی - گروه مهندسی برق.

۱- مقدمه

اتصال تولیدات پراکنده (DG) در شبکه‌های توزیع با توجه به مزایای فراوانی که دارند روزبه‌روز رو به افزایش است. تولیدات پراکنده به‌طور کلی به سه دسته تقسیم می‌شوند [۱]:

۱- ژنراتورهای القایی

۲- ژنراتورهای سنکرون

۳- ژنراتورهای اینورتری

ژنراتورهای القایی معمولاً از ظرفیت کمی برای تولید توان برخوردار هستند. این نوع ژنراتورها برای تولید توان اکتیو به یک منبع خارجی، جهت تأمین توان راکتیو، نیاز دارند. ژنراتورهای القایی جریان خطا را فقط برای چند سیکل، تغذیه می‌کنند؛ بنابراین تأثیر چندانی در برهم زدن هماهنگی ادوات حفاظتی در شبکه‌های توزیع ندارند [۱]. ژنراتورهای سنکرون دارای یک سیم‌پیچ تحریک می‌باشند که توسط یک منبع DC تغذیه می‌شوند. این ژنراتورها توانایی تولید هر دو نوع توان (اکتیو و راکتیو) را دارند. ژنراتورهای سنکرون جریان خطا را به‌خوبی تغذیه می‌کنند (۲-۵ pu) و عامل اصلی در برهم زدن هماهنگی ادوات حفاظتی در شبکه‌های توزیع می‌باشند [۱]. ژنراتورهای اینورتری، ولتاژ DC یا AC در یک فرکانس را به ولتاژ و فرکانس مطلوب تبدیل می‌کنند. این ژنراتورها جریان خطا را به‌اندازه بار تغذیه می‌کنند (۲-۱ pu)؛ و نقش چندانی در برهم زدن هماهنگی ادوات حفاظتی در شبکه‌های توزیع ندارند [۱].

با توجه به آنچه مورد بحث قرار گرفت؛ بیشترین مشکل را DGهای از نوع ماشین سنکرون برای هماهنگی سیستم حفاظت ایجاد می‌کنند [۱ و ۲]. از دیدگاه حفاظتی حضور گسترده تولیدات پراکنده در شبکه با بالا بردن سطح اتصال کوتاه، مشکلات زیر را در شبکه به همراه دارند:

۱- از بین رفتن هماهنگی ادوات حفاظتی [۳].

۲- تجاوز جریان خطا از محدوده مجاز عملکرد برای ادوات حفاظتی (بریکرها) [۴].

شدت این مشکلات به ظرفیت، محل نصب و نوع DG وابسته است [۲]. برای حل مشکلات فوق، روش‌های مختلفی معرفی شده است. در [۵] محدود کردن ظرفیت DGها پیشنهاد شده است؛ در این روش با در نظر گرفتن شاخص هماهنگی حفاظت (PCI)، باس‌ها برای نصب DG اولویت‌بندی می‌شوند. سپس حداکثر ظرفیت DG در باس‌ها (به‌ترتیب اولویت)، به‌گونه‌ای انتخاب می‌شود که بازه زمانی مجاز (CTI)، بین عملکرد تمام رله‌های اصلی و پشتیبان شبکه از مقدار معینی (۰/۲۷ ثانیه) کمتر نشود. این روش خیلی مطلوب نیست، زیرا در این صورت حضور DGها در شبکه محدود شده و امکان استفاده بهینه از نقاط مستعد برای حضور DG از بین خواهد رفت. در [۶]، اصلاح سیستم حفاظت (استفاده از رله‌های دیستانس) پیشنهاد شده است. رله‌های دیستانس بر اساس امیدانس یا ادمیتانس خط عمل می‌کنند؛ بنابراین عملکرد آن‌ها خیلی وابسته به حضور DG در شبکه

نیست. این روش بسیار پرهزینه است؛ بنابراین از لحاظ اقتصادی این روش مقرون‌به‌صرفه نیست. در [۷]، استفاده از حفاظت تطبیقی پیشنهاد شده است. این روش معمولاً در میکروگریدها مورد استفاده قرار می‌گیرد. در [۷]، اختلاف فاز جریان در ابتدا و انتهای خطوط اندازه‌گیری و بر این اساس رله‌های مربوطه برای پاک کردن خطا فعال می‌شوند. این روش در شبکه‌های حلقوی کاربرد دارد این روش نیاز به یک زیرساخت مخابراتی وسیع و یک واحد محاسبه سریع دارد؛ بنابراین بسیار پرهزینه است. یکی از روش‌هایی که امروزه بیشترین توجه صنعت برق را به خود جلب کرده است استفاده از محدودکننده‌های جریان خطا است؛ ولی با این‌وجود مشکل اصلی استفاده از این روش محدودیت استفاده از این ادوات، ناشی از هزینه بالا و تأثیر بر پیکربندی شبکه است. با توجه به محدودیت استفاده از FCLها، برای استفاده حداکثری از آن‌ها، بسته به نوع هدف، معمولاً جایابی بهینه می‌شوند. استفاده از FCLها به‌صورت سری با شبکه قدرت، در [۸] پیشنهاد شده است. در این روش امکان تنظیم و هماهنگی رله‌ها بسیار مشکل است؛ زیرا حضور DGها در سیستم قطعی نیست و مشارکت سیستم اصلی نیز محدود است. به‌کارگیری FCL به‌صورت سری با هر DG در [۹] پیشنهاد شده است. با توجه به پرهزینه بودن FCLها استفاده از این روش نیز مقرون‌به‌صرفه نیست. در [۱۰]، کاهش مشارکت SMDGها در تغذیه جریان خطا با استفاده از تخلیه میدان تحریک آن‌ها توسط مدار تخلیه مقاومتی (هنگام وقوع خطا) پیشنهاد شده است. با کنترل جریان خروجی SMDGها، هماهنگی بین ادوات حفاظتی تا حد زیادی حفظ می‌شود. با توجه به محدود بودن ولتاژ قابل تحمل توسط سیم‌پیچ میدان، این روش برای SMDGها با ظرفیت‌های تولیدی بالا کارایی چندانی ندارد. علاوه بر این با توجه به این‌که در این روش میرایی جریان خیلی سریع نیست، در صورت استفاده از رله‌های معکوس سریع (برای حفاظت سیستم توزیع) مشارکت SMDGها هنوز هم قابل ملاحظه است. در این مقاله، کاهش مشارکت SMDGها در تغذیه جریان خطا با استفاده از مدار تخلیه ترکیبی پیشنهاد شده است. روش پیشنهادی علاوه بر حفظ هماهنگی بین ادوات حفاظتی با پایین آوردن سطح اتصال کوتاه نیاز به تعویض تجهیزات حفاظتی را، در حضور گسترده تولیدات پراکنده، کاهش می‌دهد.

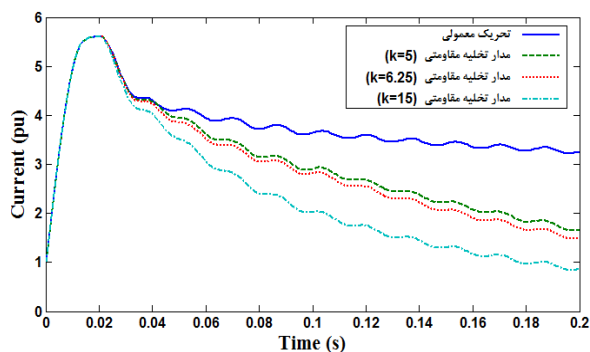
در روش پیشنهادی شرایط مربوط به حالت جزیره‌ای مطرح نیست و در صورتی‌که چنین شرایطی رخ دهد با توجه به وضعیت حاکم بر شبکه و قسمت جزیره شده، DG می‌تواند از شبکه جدا شود.

۲- ایده استفاده از مدار تخلیه

اساساً جریان خروجی SMDGها از طریق کولپینگ شار تولیدی ناشی از میدان تحریک ایجاد می‌شود؛ بنابراین با کنترل جریان تحریک SMDGها و در نتیجه کنترل شار تولیدی توسط تحریک می‌توان جریان خروجی SMDGها را کنترل کرد. در هنگام وقوع خطا با تخلیه

۳- SMDG مجهز به مدار تخلیه مقاومتی

در صورتی که SMDG به مدار تخلیه مقاومتی تجهیز باشد، در هنگام وقوع خطا یک مقاومت به صورت سری با سیم پیچ تحریک قرار می گیرد. در این حالت یک مدار سلفی (L_f -مقاومتی $(R_f + R_d)$ ، مرتبه اول ایجاد می شود. L_f اندوکتانس سیم پیچ میدان، R_f مقاومت سیم پیچ میدان و R_d مقاومت مدار تخلیه است. فرض کنید مقاومت مدار تخلیه، ضریبی از مقاومت سیم پیچ میدان باشد $(R_f + R_d = k \cdot R_f)$ ؛ بنابراین ضریب k ، بیانگر نسبت کل مقاومت سری شده با سیم پیچ میدان در حالت تجهیز به حالت عادی است $(k = R_f + R_d / R_f)$. فرض کنید یک خطای ۳ فاز ایده آل در ترمینال DG (باس S در شکل ۲)، رخ دهد (با توجه به این که مشارکت SMDG در تغذیه جریان خطا به نوع خطا نیز وابسته است؛ در این مطالعه بدترین حالت، خطای ۳ فاز ایده آل، مورد تحلیل و بررسی قرار می گیرد. شکل ۳ مقدار مؤثر جریان خروجی SMDG را هنگام وقوع خطا نشان می دهد [۱۰].

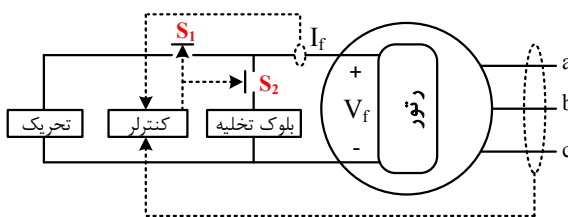


شکل ۳: مقدار مؤثر جریان خروجی SMDG پس از وقوع خطا

شکل ۳ نشان می دهد که در شرایطی که SMDG به مدار تخلیه تجهیز نباشد (حالت عادی)، جریان خروجی آن حین وقوع خطا (در حالت گذرا) تقریباً $3/25$ پریونیت است. علاوه بر این، در شکل ۳ مشاهده می شود که استفاده از مدار تخلیه مقاومتی به طور متناهی جریان خروجی SMDG را حین وقوع خطا کاهش می دهد و با افزایش مقدار k این کاهش چشم گیرتر می شود. همان گونه که شکل ۳ نشان می دهد، مقدار مؤثر جریان با استفاده از مدار تخلیه مقاومتی $(k=5)$ پس از $0/2$ ثانیه تقریباً $1/7$ پریونیت است (تأثیری تقریباً به اندازه DGهای اینورتری). این تحلیل بیانگر تأثیر ناچیز SMDG تجهیز به مدار تخلیه مقاومتی بر روی سیستم حفاظت شبکه توزیع است. این تأثیر از DGهای نوع اینورتری نیز می تواند کمتر بشود. در این بررسی مشاهده می شود که مقدار مؤثر جریان خروجی SMDG، $0/2$ ثانیه پس از وقوع خطا برای $k=5$ ، $k=6/25$ و $k=15$ به ترتیب برابر $1/7$ و $1/5$ پریونیت است. با مقایسه منحنی ها در شکل ۳ می توان نتیجه گرفت که مدار تخلیه تقریباً هیچ تأثیری بر قسمت زیرگذرای جریان خروجی SMDG ندارد؛ ولی باعث شتاب در کاهش جریان خروجی

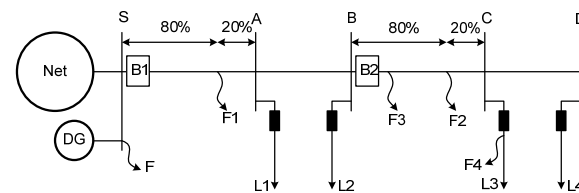
شار کولپلینگ، جریان خروجی SMDGها محدود می شود و به این ترتیب می توان هماهنگی بین ادوات حفاظتی، در حضور DGها را حفظ نمود.

شکل ۱ شمای کلی یک SMDG، تجهیز به مدار تخلیه را نشان می دهد [۱۰]. سوئیچ های S_1 و S_2 ، سوئیچ هایی کنترل شونده و ایده آل در نظر گرفته می شوند (زمان عملکرد سوئیچ ها نسبت به ثابت زمانی های SMDGها بسیار اندک است).



شکل ۱: شمای کلی یک SMDG تجهیز به مدار تخلیه [۱۰]

با وقوع خطا و تشخیص آن توسط مدار کنترلی، ابتدا سوئیچ S_2 بسته و پس از آن سوئیچ S_1 باز می شود؛ در نتیجه تحریک از سیم پیچ میدان جدا شده و مدار تخلیه به صورت سری با سیم پیچ میدان قرار می گیرد و انرژی ذخیره شده در میدان را سریعاً کاهش می دهد. برای بررسی کارایی این روش یک سیستم توزیع نمونه در سیمولینک متلب شبیه سازی شده است (شکل ۲ [۱۰]). در این سیستم، نصب DG در هر یک از نقاط S، A یا B امکان ناهماهنگی بین ادوات حفاظتی را به همراه دارد. اگر DG روی باس B نصب شود، بعضی از خطوط باید به رله های جهتی تجهیز شوند (در شبکه های حلقوی این مشکل وجود ندارد). برای سادگی فرض کنید SMDG در نقطه S نصب شده باشد.



شکل ۲: سیستم توزیع نمونه [۱۰]

مشخصات SMDG در جدول ۱ آمده است [۱۱].

جدول ۱: مشخصات SMDG مورد بررسی [۱۱]

ثابت زمانی ها (ثانیه)	راکتانس ها (پریونیت)
$T_{do} = 9/0000$	$X_d = 1/55$
$T_d = 2/03226$	$X_q = 1/40$
$T'_{do} = 0/0300$	$X'_d = 0/25$
$T''_d = 0/01543$	$X''_d = 0/18$
$T''_{qo} = 0/0400$	$X''_q = 0/18$
$T''_q = 0/01711$	

از آنجا که مدار تخلیه مقاومتی، سری با سیم‌پیچ میدان تحریک متصل می‌شود؛ تقریباً هیچ تأثیری بر روابط محور q و روابط حالت زیرگذرا ندارد. برای بررسی عملکرد مدار تخلیه مقاومتی و تأثیر آن بر پارامترهای محور d ، R_F با $(R_F + R_d)$ جایگزین می‌شود. با اضافه شدن مدار تخلیه مقاومتی (به صورت سری)، ثابت زمانی اتصال کوتاه (T_d') و ثابت زمانی مدار باز (T_{do}') ماشین سنکرون به صورت روابط ۱ و ۲ تغییر می‌کنند [۱۰]:

$$T_{d,new}' = \frac{1}{\omega_0 k R_F} (X_F + \frac{X_{md} X_a}{X_{md} + X_a}) = \frac{T_d'}{k} \quad (1)$$

$$T_{do,new}' = \frac{1}{\omega_0 k R_F} (X_{md} + X_F) = \frac{T_{do}'}{k} \quad (2)$$

که ω_0 سرعت زاویه‌ای مینا (سرعت سنکرون) است. X_a و X_F به ترتیب راکتانس نشتی سیم‌پیچ میدان تحریک و راکتانس نشتی سیم‌پیچ آرمیچر می‌باشند. X_{md} کل راکتانس سیم‌پیچ محور d است. تأثیر و عملکرد مدار تخلیه با ترکیب دو حالت بیان شده، قابل توجیه و بررسی است. بنابراین جریانی خروجی SMDG فاقد مؤلفه حالت دائم است و T_d' و T_{do}' ، به ترتیب با $T_{d,new}'$ و $T_{do,new}'$ ، جایگزین می‌شوند. با توجه به آنچه بیان شد جریان خروجی (فاز a) یک SMDG (قطب صاف)، برای خطای ۳ فاز در ترمینال خروجی را می‌توان به صورت رابطه ۳ تقریب زد [۱۰].

$$i_a = V_{mq} \left[\frac{1}{X_d'} e^{-\frac{t}{T_{d,new}'}} + \left(\frac{1}{X_d''} - \frac{1}{X_d'} \right) e^{-\frac{t}{T_d''}} \right] \cos(\omega_0 t + \theta_0) - \frac{V_{mq}}{2} \left(\frac{1}{X_d'} + \frac{1}{X_q} \right) e^{-\frac{t}{T_a}} \cos(\theta_0) - V_{md} \left(\frac{1}{X_q''} - \frac{1}{X_q} \right) e^{-\frac{t}{T_d''}} \sin(\omega_0 t + \theta_0) + \frac{V_{md}}{2} \left(\frac{1}{X_d''} + \frac{1}{X_q} \right) e^{-\frac{t}{T_a}} \sin(\theta_0) \quad (3)$$

۴- SMDG مجهز به مدار تخلیه ترکیبی

در این حالت مدار تخلیه میدان به صورت یک بلوک ترکیبی است (شکل ۴)، در هنگام وقوع خطا این بلوک به صورت سری با سیم‌پیچ تحریک قرار می‌گیرد و یک مدار مرتبه دوم ایجاد می‌شود. در این حالت علاوه بر سوئیچ‌های S_1 و S_2 ، سوئیچ S_3 نیز در این بلوک تعبیه شده است. با صفر شدن جریان تحریک، توان خروجی نیز به صفر تقلیل می‌یابد؛ بنابراین امکان ناپایداری SMDG را افزایش می‌دهد؛ بنابراین با فعال کردن یک مسیر تخلیه مقاومتی (مشابه حالت قبل) می‌توان از ناپایداری تا حد زیادی جلوگیری کرد.

SMDG در حالت گذرا می‌شود. برای بررسی عملکرد مدار تخلیه مقاومتی بر هماهنگی ادوات حفاظتی، ۳ بازه زمانی برای عملکرد رله‌های اضافه جریان وجود دارد [۱۲، ۱۳]:

- ۱- بازه اول (کمتر از ۰/۰۵ ثانیه): معمولاً رله‌های اضافه جریان آنی در این بازه عمل می‌کنند.
- ۲- بازه دوم (بین ۰/۰۵ و ۰/۲ ثانیه): معمولاً رله‌های اضافه جریان تأخیری در این بازه عمل می‌کنند.
- ۳- بازه سوم (بزرگ‌تر از ۰/۱ ثانیه): معمولاً رله‌های اضافه جریان معکوس در این بازه عمل می‌کنند.

همان‌گونه که در شکل ۳ مشاهده می‌شود، ماکزیمم کاهش در سهم مشارکتی SMDG هنگام وقوع خطا در بازه اول (برای $k=6/25$) تقریباً $0/2 pu$ است؛ بنابراین این روش به اندازه کافی برای حفظ هماهنگی رله‌های اضافه جریان آنی مناسب نیست. در بازه ۲، این کاهش برابر تقریباً ۲ پریونیت است (این کاهش برای بازه سوم از این نیز بیشتر است). از آنجا که رله‌های حفاظتی در سیستم توزیع معمولاً از نوع رله‌های اضافه جریان تأخیری یا معکوس است؛ این روش به طور زیادی مؤثر است. با افزایش k میزان کاهش جریان خروجی SMDG، سریع‌تر و بیشتر می‌شود؛ ولی با افزایش k (افزایش R_d)، ولتاژ اولیه‌ای که بر روی سیم‌پیچ میدان تحریک (V_{0F}) می‌افتد، افزایش می‌یابد (جریان اولیه سیم‌پیچ میدان تحریک (I_{0F}) در لحظه اول پس از کلیدزنی ثابت است). افزایش ولتاژ اولیه بر روی سیم‌پیچ میدان تحریک نباید از حداکثر مقدار مجاز خود (V_{max}) بیشتر باشد. در [۱۴] برای SMDG با ولتاژ میدان ۲۲۰ ولت، حداکثر مقدار R_d ، متناظر با $(7/3)k=$ و برای SMDG با ولتاژ میدان ۱۱۰ ولت، حداکثر مقدار R_d ، متناظر با $(k=6/25)$ در نظر گرفته شده است. در این مطالعه، R_d کمتر از حداکثر حد مجاز (متناظر با k برابر ۵) برای SMDG با ولتاژ میدان ۱۱۰ ولت مورد بررسی قرار گرفته است. R_d متناظر با $(k=15)$ نیز یک مقدار کاملاً غیرعملی بوده و فقط جهت شفاف‌سازی موضوع مورد بررسی قرار گرفته است.

از آنجا که زمان عملکرد واحد کنترل و سوئیچ‌ها نسبت به ثابت زمانی‌های SMDG بسیار ناچیز است، می‌توان فعال شدن مدار تخلیه را به صورت آنی و ایده‌آل در نظر گرفت. عملکرد مدار تخلیه در دو مرحله صورت می‌گیرد [۱۰]:

(۱) قطع تحریک

(۲) وارد شدن مدار تخلیه

در ادامه تأثیر هر مرحله به صورت مجزا مورد بررسی قرار می‌گیرد و در نهایت با ترکیب این دو مرحله، عملکرد مدار تخلیه مورد تحلیل قرار می‌گیرد.

با قطع تحریک، قسمت حالت دائم مؤلفه ac (فرکانس مینا) جریان خروجی SMDG از بین می‌رود [۱۰].

۴-۱-۳- خازن (C)

فرض کنید $R_{fd} \ll R_{cd}$ باشد؛ بنابراین جریان میدان (در حوزه فرکانس) با فعال شدن مدار تخلیه ترکیبی به صورت رابطه (۸) است.

$$I_F(s) = \frac{I_{0F}s}{s^2 + \frac{R}{L_F}s + \frac{1}{L_FC}} \quad R = R_{fd} + R_F + R_{D,on} \quad (8)$$

سریع ترین پاسخ در رسیدن به یک جریان معین، داشتن زوج قطب مزدوج با قسمت حقیقی منفی است؛ بنابراین در این حالت جریان میدان برابر است با:

$$i_F(t) = Ae^{-\alpha t} \cos(\omega_d t + \theta) \quad (9)$$

$$\alpha = \frac{R}{2L}, \quad \omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}}, \quad \omega_d = \sqrt{\omega_0^2 - \alpha^2}$$

که A و θ اعدادی ثابت، وابسته به جریان اولیه میدان می باشند. فرض کنید سریع ترین رله در شبکه، T_{min} ثانیه پس از وقوع خطا عمل کند؛ بنابراین قبل از عملکرد این رله باید جریان تحریک SMDG به مقدار مطلوب خود (I_{Fmin}) برسد.

$$I_{Fmin}(T_{min}) = Ae^{-\alpha T_{min}} \cos(\omega_d T_{min} + \theta) \quad (10)$$

در رابطه (۱۰) تمام پارامترها، به جز ظرفیت خازن، مشخص می باشند؛ بنابراین با حل رابطه (۱۰) به روش های عددی ظرفیت خازن نیز قابل محاسبه است.

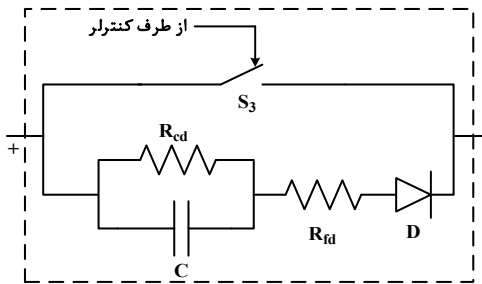
فرض کنید سریع ترین رله در شبکه، 0.5 ثانیه پس از وقوع خطا عمل کند (رله های اضافه جریان معکوس)؛ بنابراین قبل از عملکرد این رله باید جریان تحریک SMDG به مقدار مطلوب خود ($I_{Fmin}=2$) برسد. با توجه به فرضیات بیان شده، برای SMDG مورد بررسی ظرفیت این خازن به صورت تقریبی (استفاده از روش های عددی) 0.483 پروینیت به دست می آید.

۴-۱-۴- مقاومت تخلیه خازن (R_{cd})

با افزایش مقاومت تخلیه میدان (R_{cd})، جریان میدان سریع تر میرا می شود. علاوه بر این با افزایش R_{cd} ، زمان تخلیه خازن ($R_{cd} \times C$) نیز افزایش می یابد. فرض کنید ماکزیمم زمان برای تخلیه خازن، T_{max} باشد (T_{max} توسط کاربر تعیین می گردد و معمولاً توسط فاصله زمانی احتمالی بین وقوع دو خطا در شبکه محدود می گردد)؛ بنابراین R_{cd} به صورت رابطه (۱۱) محاسبه می شود.

$$R_{cd} = \frac{T_{max}}{5.C} \quad (11)$$

فرض کنید ماکزیمم زمان برای تخلیه خازن، یک ثانیه باشد؛ بنابراین R_{cd} طبق رابطه (۱۱)، 0.4140 پروینیت است.



شکل ۴: مدار تخلیه ترکیبی

که R_{fd} و R_{cd} به ترتیب مقاومت تخلیه میدان و مقاومت تخلیه خازن می باشند. با رسیدن جریان میدان به حد معینی با روشن شدن سوئیچ S_3 مسیر تخلیه مقاومتی فعال می شود و مجموعه B (مقاومت ها، دیود و خازن) حذف می شوند. در ادامه تعیین پارامترهای مدار تخلیه ترکیبی به صورت کامل مورد بحث و بررسی قرار می گیرند.

۴-۱-۴- تعیین پارامترهای مدار تخلیه ترکیبی

۴-۱-۱- دیود (D)

دیود انتخابی باید به گونه ای باشد که ولتاژ دو سر خود را در لحظه اول تحمل نماید.

$$V_D > I_{0F} \times R_{D,on} \quad (4)$$

که V_D ، ماکزیمم ولتاژ قابل تحمل توسط دیود است. $R_{D,on}$ مقاومت دیود در حالت روشن است. این مقاومت معمولاً ناچیز و قابل صرف نظر کردن است.

در این مطالعه برای راحتی کار از یک دیود ایده آل استفاده می شود ($R_{D,on} = 0$)؛ بنابراین محدودیت تحمل ولتاژ دو سر دیود نیز وجود ندارد.

۴-۱-۲- مقاومت تخلیه میدان (R_{fd})

با افزایش R_{fd} ، جریان میدان سریع تر میرا می شود. در لحظه اول خازن اتصال کوتاه است؛ بنابراین مدار تخلیه ترکیبی در ابتدا به صورت یک مقاومت ($R_{fd} + R_F + R_{D,on}$) مدل می شود. بنابراین با توجه به حداکثر ولتاژ دو سر سیم پیچ میدان به صورت رابطه (۶) محاسبه می شود.

$$V_{Fmax} = (R_{fd} + R_F + R_{D,on}) \times I_{0F} \quad (5)$$

$$R_{fd} = \left(\frac{V_{Fmax}}{I_{0F}} \right) - (R_F + R_{D,on}) \quad (6)$$

در این حالت مجموع مقاومت های R_{fd} و $R_{D,on}$ معادل مقاومت R_d در حالت مدار تخلیه مقاومتی است. بنابراین (با توجه به ایده آل بودن دیود) برای مقایسه با حالت $k=5$ ، R_{fd} متنظر با این مقدار انتخاب شده است.

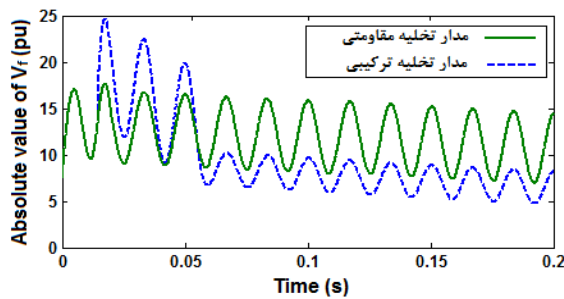
$$R_{fd} = R_d, k = 5 \quad (7)$$

۴-۱-۵- سوئیچ (S₃)

حالت اول: قبل از فعال شدن سوئیچ S₃، میزان شتاب در کاهش جریان خروجی SMDG، در صورت مجهز بودن به مدار تخلیه ترکیبی نسبت به حالت مجهز بودن به مدار تخلیه مقاومتی بیشتر است.

حالت دوم: پس از فعال شدن سوئیچ S₃، میزان شتاب در کاهش جریان خروجی SMDG در منحنی خط نسبت به منحنی خط چین کمتر است. با مقایسه این دو شکل موج می‌توان مشاهده کرد که جریان خروجی SMDG، در صورت استفاده از مدار تخلیه ترکیبی سریع‌تر به مقدار مطلوب خود می‌رسد. علاوه بر این در این حالت تغییرات جریان خروجی SMDG، در محدوده زمانی عملکرد رله‌ها کمتر است که این خودارزیابی‌های مربوطه در این شرایط را سریع‌تر و دقیق‌تر می‌نماید.

همان‌گونه که از شکل ۵ استنباط می‌شود، استفاده از مدار تخلیه ترکیبی باعث افزایش سرعت میرایی جریان خطا می‌گردد. بنابراین اضافه ولتاژ ایجاد شده بر روی سیم‌پیچ میدان تحریک روتور شدیدتر از مدار تخلیه مقاومتی می‌شود. شکل ۶ اندازه ولتاژ دو سر سیم‌پیچ میدان را در دو حالت مورد بررسی نشان می‌دهد.



شکل ۶: اندازه ولتاژ دو سر سیم‌پیچ میدان

همان‌گونه که در شکل ۶ مشاهده می‌شود، استفاده از مدار تخلیه ترکیبی باعث ایجاد اضافه ولتاژ (یک یا حداکثر دو سیکل) بر روی سیم‌پیچ میدان می‌شود. با توجه به این‌که مدت‌زمان اضافه ولتاژ بر روی سیم‌پیچ میدان بسیار اندک است شاید بتوان از آن چشم‌پوشی کرد (البته این موضوع در کارهای بعدی مورد بررسی قرار می‌گیرد). به‌طور کلی مدار تخلیه ترکیبی مشابه یک مقاومت غیرخطی عمل می‌کند (با کاهش جریان مقاومت افزایش می‌یابد)؛ بنابراین کارایی این روش نسبت به روش استفاده از مدار تخلیه مقاومتی غیر قابل انکار است.

با توجه به آنچه در این بخش مورد بحث قرار گرفت، با استفاده از مدار تخلیه می‌توان سهم SMDG در تغذیه جریان خطا را کاهش داد؛ به تعبیری دیگر، با استفاده از این تکنولوژی می‌توان از SMDG با ظرفیت بالاتر بدون ایجاد ناهماهنگی بین ادوات حفاظتی در شبکه توزیع استفاده کرد.

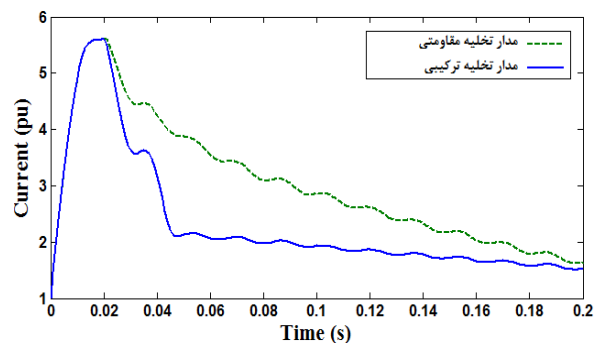
آنچه تا اینجا مورد بررسی قرار گرفت خطا در ترمینال SMDG است. برای بررسی یک خطا در شبکه، فرض کنید امپدانس معادل خطا، دیده‌شده از ترمینال ژنراتور، به‌صورت رابطه (۱۲) باشد.

با صفر شدن جریان تحریک، توان خروجی نیز به صفر تقلیل می‌یابد؛ بنابراین امکان ناپایداری SMDG را افزایش می‌دهد؛ بنابراین با فعال کردن یک مسیر تخلیه با مقاومت ناچیز (مقاومت سوئیچ) پس از رسیدن به جریان مطلوب، می‌توان از ناپایداری تا حد زیادی جلوگیری کرد (در این مطالعه مباحث مربوط به پایداری گذرا برای SMDG مطرح نیست. در [۱۵]، پایداری گذرا برای SMDG به‌طور کامل مورد بررسی قرار گرفته است و یک رله توانی برای عمل کردن در صورت تشخیص شرایط ناپایداری گذرا طراحی و ارزیابی شده است. در صورتی که امکان ایجاد ناپایداری توسط رله توانی تشخیص داده شود، SMDG از شبکه جدا می‌شود. با رسیدن جریان میدان به حد معینی سوئیچ S₃ فعال می‌شود و شاخه پایینی بلوک تخلیه (مقاومت‌ها، دیود و خازن، در شکل ۴) حذف می‌شوند. در این شرایط تنها مقاومت سیم‌پیچ میدان نقش میرا کننده دارد؛ بنابراین جریان با شیب کمی شروع به کم شدن می‌کند.

در این مطالعه برای راحتی کار از یک سوئیچ ایده‌آل (عملکرد آبی با مقاومت صفر)، کنترل شونده توسط جریان استفاده می‌شود.

۵- مقایسه عملکرد مدارهای تخلیه

فرض کنید یک خطای ۳ فاز ایده‌آل در ترمینال DG (باس S)، رخ دهد. شکل ۵، مقدار مؤثر جریان خروجی SMDG، هنگام وقوع خطا، را در حالتی که سیم‌پیچ میدان به مدار تخلیه ترکیبی (با مشخصات بیان شده در بخش قبل) تجهیز باشد را نشان می‌دهد (منحنی خط). برای مقایسه نتایج ناشی از عملکرد هر دو نوع مدار تخلیه، تأثیر مدار تخلیه مقاومتی (متناظر با $k=5$) بر مقدار مؤثر جریان خروجی SMDG، هنگام وقوع خطا مجدداً در شکل ۵ آورده شده است (منحنی خط چین).



شکل ۵: مقدار مؤثر جریان خروجی SMDG، تجهیز به مدار تخلیه

با مقایسه دو منحنی در شکل ۵ می‌توان نتیجه گرفت که عملکرد هر دو نوع مدار تخلیه بر قسمت زیرگذرای جریان خروجی SMDG یکسان است (تقریباً هیچ تأثیری بر قسمت زیرگذرای جریان خروجی SMDG ندارند)؛ ولی میزان شتاب در کاهش جریان خروجی SMDG در حالت گذرا در دو حالت قابل ارزیابی است.

(سرعت ثابت به‌عنوان ورودی SMDG) تأثیر چندانی بر نتایج به‌دست‌آمده ندارد [۱۰].

شکل ۲ شماتیک این شبکه را نشان می‌دهد. شبکه بالادست توسط معادل تونن بیان می‌شود. این شبکه از طریق ۴ سیم هوایی بار را تغذیه می‌کند. امپدانس هر سیم برابر $z_{pu/km} = 0.384 + j0.416$ است. ولتاژ پایه ۲۵ کیلوولت و توان پایه ۱۰۰ مگاوات‌آمپر است. همان‌گونه که شکل ۲ نشان می‌دهد، فیدر از ۴ قسمت تشکیل شده است، که طول هر قسمت ۵۰۰ متر است به‌استثنای طول CD که ۱ کیلومتر است. این فیدر ۴ انشعاب دارد و بار هر انشعاب در جدول ۲ آمده است [۱۰].

جدول ۲: مشخصات بار شبکه [۱۰]

بار	توان اکتیو (kw)	ضریب توان
L1	۲۵۱۱	۰/۹۳
L2	۵۳۰	۰/۹۴
L3	۴۱۰۸	۰/۹۳
L4	۳۱۶۳	۰/۹۴

در این شبکه فیدر توسط ۲ بریکر (B1 و B2) و هر انشعاب توسط یک فیوز جداگانه (L1 و L2 و L3 و L4) حفاظت می‌شود. هر بریکر به ۲ رله اضافه جریان (OC) تجهیز است:

۱- رله اضافه جریان تأخیری

۲- رله اضافه جریان معکوس

رله اضافه جریان تأخیری به‌گونه‌ای تنظیم شده است که ۸۰ درصد خط را حفاظت می‌کند و رله اضافه جریان معکوس به‌عنوان حفاظت پشتیبان برای آن در نظر گرفته شده است. جریان I_p (جریانی که پس از آن امکان عملکرد رله فراهم می‌شود) برای رله اضافه جریان تأخیری موجود در B1، برابر جریان خطا در F1 است؛ به همین ترتیب جریان I_p برای رله اضافه جریان تأخیری موجود در B2 برابر جریان خطا در F2 است. علاوه بر این TSM رله اضافه جریان معکوس موجود در B1 به‌گونه‌ای تنظیم شده است که به‌عنوان حفاظت پشتیبان برای رله تأخیری موجود در B2، برای خطا در F3 عمل کند. به‌صورت مشابه TSM رله اضافه جریان معکوس موجود در B2 به‌گونه‌ای تنظیم شده است که به‌عنوان حفاظت پشتیبان برای فیوز L3 برای خطا در F3 عمل کند. در جدول ۳، تنظیمات رله‌های موجود در شبکه (شکل ۲) در صورتی که DG به شبکه متصل نباشد آورده شده است [۱۰].

جدول ۳: تنظیمات رله‌های موجود در شبکه [۱۰]

	رله اضافه جریان معکوس		رله اضافه جریان تأخیری	
	Ipick-up (A)	TSM	Ipick-up (A)	زمان عملکرد (s)
B1	۳۲۰	۰/۲۷۷۵	۴۴۴۰	۰/۱
B2	۲۴۰	۰/۱۴۴۷	۴۰۳۰	۰/۱

$$Z_{fault} = R_{fault} + jX_{fault} \quad (12)$$

در این حالت، مشارکت SMDG در تغذیه جریان خطا را می‌توان با اصلاح روابط قبل، به شرح زیر تخمین زد:

۱- در تمام روابط برای محاسبه ثابت زمانی‌ها و راکتانس‌های عملکردی X_a را باید با $X_{fault} + X_a$ جایگزین کرد.

۲- در تمام روابط برای محاسبه ثابت زمانی‌ها و راکتانس‌های عملکردی R_a را باید با $R_{fault} + R_a$ جایگزین کرد.

۶- مکانیسم فعال شدن مدار تخلیه

در بخش‌های قبل فرض شد که یک مکانیسم سریع و دقیق برای کنترل مدار تخلیه وجود داشته باشد. در ادامه یک مکانیسم برای ارضای فرض بیان‌شده معرفی می‌گردد. مکانیسم کنترل مدار تخلیه دارای دو مرحله است [۱۰]:

۱- تشخیص خطا و فعال کردن مدار تخلیه

۲- تشخیص پاک شدن خطا و غیرفعال کردن مدار تخلیه

۶-۱- تشخیص خطا و فعال کردن مدار تخلیه

برای فعال کردن مدار تخلیه باید از سیگنالی استفاده شود که به‌طور مناسب و قابل قبولی بتواند خطا در شبکه را تشخیص دهد. این سیگنال باید شرایط زیر را دارا باشد [۱۰]:

۱- تغییرات سیگنال به‌اندازه کافی سریع باشد به‌گونه‌ای که بتوان هر چه سریع‌تر خطا را تشخیص داد.

۲- این سیگنال باید بین اغتشاشات مختلف تمایز قائل شود.

با توجه به ویژگی‌های ذکرشده در این مطالعه از تغییرات جریان میدان برای فعال کردن مدار تخلیه استفاده می‌شود. تغییرات جریان میدان از سرعت خوبی برای فعال کردن مدار تخلیه برخوردار است. از آنجاکه این سیگنال به مدار کنترلی و مدار تخلیه نزدیک است، امکان عملکرد اشتباه را کاهش می‌دهد.

۶-۲- تشخیص پاک شدن خطا و غیرفعال کردن مدار تخلیه

مرحله آخر تشخیص پاک شدن خطا و غیرفعال کردن مدار تخلیه است که با استفاده از ولتاژ ترمینال SMDG امکان‌پذیر است. این مرحله نسبت به مرحله قبل از اهمیت کمتری برخوردار است؛ چراکه در مرحله اول، اشتباه یا تأخیر بیش از حد مجاز در بلوک کنترل موجب عملکرد نابجای رله‌ها و عواقب ناشی از آن خواهد شد.

۷- شبیه‌سازی و بررسی نتایج

در این بخش روش پیشنهادی بر روی شبکه توزیع ۲۰ کیلوولت (شعاعی) مورد بررسی قرار می‌گیرد. در این بخش SMDG به‌گونه‌ای در نظر گرفته شده است که امکان ناپایداری آن وجود ندارد (سرعت ثابت به‌عنوان ورودی SMDG در نظر گرفته شده است). این شرایط

اکنون فرض کنید ظرفیت SMDG به ۱۰ MW به افزایش یابد. در این حالت جریان عبوری از B1 و B2، ۰/۱ ثانیه پس از وقوع خطا، به ترتیب برابر ۴۶۸۳ و ۴۶۵۴ آمپر است؛ بنابراین بریکرهای B1 و B2 به طور همزمان در ۰/۱ ثانیه عمل خواهند کرد. در این شرایط اگر SMDG به مدار تخلیه مقاومتی ($k=5$) تجهیز شود، جریان عبوری از B1 و B2 به ترتیب به ۴۴۹۸ و ۴۴۷۸ آمپر کاهش می‌یابد. بنابراین تجهیز SMDG به مدار تخلیه مقاومتی، باعث حفظ هماهنگی بین B1 و B2 نخواهد شد. در این حالت اگر SMDG به مدار تخلیه ترکیبی (با مشخصات بیان شده در بخش‌های قبل) مجهز شود، جریان عبوری از B1 و B2 به ترتیب به ۴۳۹۶ و ۴۴۰۳ آمپر کاهش می‌یابد. این کاهش جریان، باعث حفظ هماهنگی بین B1 و B2 می‌شود. با توجه به آنچه مورد بحث قرار گرفت در این شرایط استفاده از مدار تخلیه مقاومتی مؤثر نخواهد بود و برای حفظ هماهنگی بین B1 و B2 باید از مدار تخلیه ترکیبی استفاده شود. جریان گذرنده از رله‌ها و زمان عملکرد آن‌ها برای خطا در F3، در حضور SMDG با ظرفیت ۱۰ MW درون شبکه، در جدول ۶ آمده است.

جدول ۶: عملکرد رله‌ها برای خطا در F3، در حضور SMDG با ظرفیت ۱۰ MW

۱۰ درون شبکه				
	I_{R1} (A)	T_{R1} (s)	I_{R2} (A)	T_{R2} (s)
بدون مدار تخلیه	۴۶۸۳	۰/۱	۴۶۵۴	۰/۱
با مدار تخلیه مقاومتی	۴۴۹۸	۰/۱	۴۴۷۸	۰/۱
با مدار تخلیه ترکیبی	۴۳۹۶	۰/۷۲۳	۴۴۰۳	۰/۱

۸- نتیجه

اتصال منابع تولید پراکنده در شبکه‌های توزیع با توجه به مزایای فراوانی که دارند روزبه‌روز رو به افزایش است. حضور گسترده تولیدات پراکنده در شبکه با بالا بردن سطح اتصال کوتاه، باعث از بین رفتن هماهنگی ادوات حفاظتی در سیستم توزیع می‌شود. در این میان DGهای از نوع ماشین سنکرون، بیشترین مشکل را برای هماهنگی سیستم حفاظت ایجاد می‌کنند. در این مقاله روشی برای کاهش مشارکت تولیدات پراکنده سنکرون در تغذیه جریان خطا مبتنی بر تخلیه میدان تحریک SMDGها، هنگام وقوع خطا پیشنهاد شده است. در این روش، مشارکت SMDGها در تغذیه جریان خطا، با کنترل جریان تحریک، محدود می‌شود. با وقوع خطا و تشخیص آن توسط مدار کنترلی، تحریک از سیم‌پیچ میدان جدا شده و مدار تخلیه به صورت سری با سیم‌پیچ میدان قرار می‌گیرد و انرژی ذخیره شده در میدان را سریعاً کاهش می‌دهد. برای تخلیه میدان تحریک دو نوع مدار تخلیه (مقاومتی و ترکیبی) مورد بررسی قرار گرفتند که هر کدام بسته به میزان توان خروجی DG و رله‌های موجود در شبکه می‌توانند کاربرد داشته باشند. این روش بر روی یک شبکه توزیع نمونه (حفاظت شده توسط رله‌های اضافه جریان معکوس) پیاده‌سازی شد؛ که نتایج به دست آمده کارایی این روش را تأیید می‌کند.

در این شرایط زمان عملکرد رله‌ها (حفاظت اولیه و پشتیبان) برای خطا (۳ فاز ایده‌آل) در مکان‌های مختلف به شرح جدول ۴ است [۱۰].

جدول ۴: زمان عملکرد رله‌ها برای خطا در مکان‌های مختلف [۱۰]

خطا	I_{R1} (A)	T_{R1} (s)	I_{R2} (A)	T_{R2} (s)
F1	۴۴۴۰	۰/۱	-	-
F2	۴۰۳۸	۰/۷۴۵	۴۰۳۰	۰/۱
F3	۴۱۹۰	۰/۷۳	۴۱۸۷	۰/۱
F4	۳۹۹۶	۰/۷۵	۴۰۰۲	۰/۳۵

فرض کنید یک SMDG (با مشخصات جدول ۱) در پست (باس) (S) نصب شود. SMDG با مشارکت در تغذیه جریان خطا، موجب افزایش جریان خطای عبوری از ادوات حفاظتی می‌شود. این افزایش جریان امکان ناهماهنگی بین ادوات حفاظتی را فراهم می‌کند. فرض کنید یک خطا (۳ فاز ایده‌آل) در F3 رخ دهد. در حالتی که SMDG به شبکه متصل نباشد، جریان عبوری از B1 و B2، ۰/۱ ثانیه پس از وقوع خطا، به ترتیب برابر ۴۱۸۷ و ۴۱۹۰ آمپر است. بنابراین رله اضافه جریان تأخیری موجود در B2 به عنوان رله اصلی در ۰/۱ ثانیه عمل می‌کند و در صورت عمل نکردن، رله اضافه جریان معکوس موجود در B1، ۰/۷۳ ثانیه پس از وقوع خطا به عنوان حفاظت پشتیبان عمل می‌کند. در حالتی که SMDG به شبکه متصل باشد و جریان عبوری از B1، ۰/۱ ثانیه پس از وقوع خطا، بالاتر از ۴۴۴۰ آمپر باشد؛ بریکرهای B1 و B2 به طور همزمان در ۰/۱ ثانیه عمل خواهند کرد. در حالتی که SMDG با ظرفیت ۵ MW (با مشخصات جدول ۱) به شبکه (باس) متصل شود، جریان عبوری از B1، ۰/۱ ثانیه پس از وقوع خطا، برابر ۴۴۳۸ آمپر است؛ بنابراین هنوز هم هماهنگی بین بریکرهای B1 و B2 حفظ خواهد شد. با توجه به آنچه بیان شد؛ در صورتی که SMDG با ظرفیت بالاتر از ۵ MW به شبکه متصل شود، هماهنگی بین بریکرهای B1 و B2 از بین خواهد رفت.

فرض کنید یک SMDG با ظرفیت ۶/۵ MW به شبکه (باس) (S) متصل شود، در این حالت جریان عبوری از B1 و B2، ۰/۱ ثانیه پس از وقوع خطا، به ترتیب برابر ۴۵۰۴ و ۴۴۸۳ آمپر است؛ بنابراین بریکرهای B1 و B2 به طور همزمان در ۰/۱ ثانیه عمل خواهند کرد. در این حالت اگر SMDG به مدار تخلیه مقاومتی ($k=5$) مجهز شود، جریان عبوری از B1 و B2 به ترتیب به ۴۴۳۰ و ۴۴۱۳ آمپر کاهش می‌یابد. این کاهش جریان، باعث حفظ هماهنگی بین B1 و B2 می‌شود. جریان گذرنده از رله‌ها و زمان عملکرد آن‌ها برای خطا در F3، در حضور SMDG با ظرفیت ۶/۵ MW درون شبکه، در جدول ۵ آمده است [۱۰].

جدول ۵: عملکرد رله‌ها برای خطا در F3، در حضور SMDG با ظرفیت ۶/۵ MW

۶/۵ درون شبکه [۱۰]				
	I_{R1} (A)	T_{R1} (s)	I_{R2} (A)	T_{R2} (s)
بدون مدار تخلیه	۴۵۰۴	۰/۱	۴۴۸۳	۰/۱
با مدار تخلیه مقاومتی	۴۴۳۰	۰/۷۲	۴۴۱۳	۰/۱

generation networks protection,” *Applied Energy*, vol. 88, no.12, pp. 4563-4569, 2011.

- [8] W. Najy, H. Zeineldin, and W. Woon, “Optimal protection coordination for microgrids with grid-connected and islanded capability,” *IEEE Trans. Indus. Elec.*, vol. 60, no. 4, pp. 1668-1677, 2013.
- [9] W. El-Khattam, and T.S. Sidhu, “Restoration of directional overcurrent relay coordination in distributed generation systems utilizing fault current limiter,” *IEEE Trans. Power Del.*, vol. 23, no. 2, pp. 576-585, 2008.
- [10] H. Yazdanpanahi, W. Xu, and Y. W. Li, “A novel fault current control scheme to reduce synchronous DG’s impact on protection coordination” *IEEE Trans. Power Del.*, vol. 29, no. 2, pp. 542-551, 2014.
- [11] C.A. Gross, *Electric Machines*, Boca Raton, FL, CRC, 2007.
- [12] *IEEE Recommended Practice for Protection and Coordination of Industrial and Commercial Power Systems*, IEEE Standard 242-2001.
- [13] A. Sallaem, and O. Malik, *Protection of Electric Distribution Systems*, Hoboken, NJ, Wiley-IEEE, 2011.
- [14] *Standard Enclosed Field Discharge Circuit Breakers for Rotating Electric Machinery*, ANSI/IEEE Standard C37.18.1979.
- [15] R. Razzaghi, M. Davarpanah, and M. Sanaye-Pasand, “A novel protective scheme to protect small-scale synchronous generators against transient instability,” *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 60, no. 4, pp. 1659-1667, 2013.
- [1] C.J. Mozina, “Impact of smart grids and green power generation on distribution systems,” *IEEE Trans. Ind. Application*, vol. 49, no. 3, pp. 1079-1090, 2013.
- [2] N. Nimpitiwan, G.T. Heydt, R. Ayyanar, and S. Suryanarayanan, “Fault current contribution from synchronous machine and inverter based distributed generators,” *IEEE Trans. Power Del.*, vol. 22, no. 1, pp. 634-641, 2007.
- [3] R.A. Walling, R. Saint, R.C. Dugan, J. Burke, and L.A. Kojovic, “Summary of distributed resources impact on power delivery systems,” *IEEE Trans. Power Del.*, vol. 23, no. 3, pp. 1636-1644, 2008.
- [4] S.Y. Kim, W.W. Kim, and J.O. Kim, “Determining the location of superconducting fault current limiter considering distribution reliability,” *IET Gener. Transm. Distrib.*, 2012, vol. 6, no. 3, pp. 240 – 246, 2011.
- [5] H.H. Zeineldin, Y.A.I. Mohamed, V. Khadkikar, and V.R. Pandi, “A protection coordination index for evaluating distributed generation impacts on protection for meshed distribution systems,” *IEEE Trans. Smart grid*, vol. 4, no. 3, pp. 1523-1532, 2013.
- [6] M. Dewadasa, A. Ghosh, G. Ledwich, and M. Wishart, “Fault isolation in distributed generation connected distribution networks,” *IET Gener. Transm. Distrib.*, vol. 5, no. 10, pp. 1053-1061, 2011.
- [7] N. El Halabi, M. García-Gracia, J. Borroy, and J.L. Villa “Current phase comparison pilot scheme for distributed

مراجع