

DOI 10.35264/1996-2274-2021-1-144-151

ВОЗМОЖНОСТИ УВЕЛИЧЕНИЯ МОЩНОСТИ НАНОГРАФИТОВОГО ТОКООГРАНИЧИТЕЛЯ

С.Г. Лебедев, ст. научн. сотр. Института ядерных исследований РАН, канд. физ.-мат. наук, lebedev@inr.ru

Рецензент: М.С. Власкин

В статье рассматриваются возможности увеличения токов переключения предложенного ранее бесконтактного нанографитового токоограничителя. Показано, что увеличение длины контактных площадок до 1 м позволит уменьшить электросопротивление пленки в 10 000 раз – до ~0,1 Ом, а ток переключения – увеличить до 1 кА, при этом рассеиваемая бесконтактным нанографитовым токоограничителем мощность возрастет до 100 кВт. Рассматривается возможность теплосъема с помощью водяного охлаждения с использованием чиллера соответствующей мощности. Проведенный анализ показывает, что указанные мероприятия позволят создать конкурентоспособный токоограничитель для интеллектуальных сетей на основе нанографитовой пленки.

Ключевые слова: нанографит, пленки, токоограничитель, водяное охлаждение, чиллер.

POSSIBILITIES OF INCREASING THE POWER OF THE NANOGRAFITE CURRENT LIMITER

S.G. Lebedev, Senior Researcher, Institute for Nuclear Research, Russian Academy of Sciences, Doctor of Physics and Mathematics, lebedev@inr.ru

The article discusses the possibilities of increasing the switching currents of the previously proposed contactless nanographite current limiter. It is shown that an increase in the length of the contact pads to 1 m will reduce the electrical resistance of the film by a factor of 10,000 – to ~0.1 Ohm, and the switching current will increase to 1 kA, while the power dissipated by a contactless nanographite current limiter will increase to 100 kW. The possibility of heat removal by means of water cooling using a chiller of appropriate capacity is being considered. The analysis shows that these measures will make it possible to create a competitive current limiter for smart grids based on nanographite film.

Keywords: nanographite, films, current limiter, water cooling, chiller.

Введение

Тенденции развития электроэнергетических систем, тесно связанные с общим экономическим развитием, характеризуются устойчивым ростом электрических нагрузок и соответствующим увеличением генерирующих мощностей, усилением связей с соседними системами и созданием крупных объединенных систем, охватывающих не только территории отдельных стран, но и целые континенты. Неизбежным следствием такого развития является рост токов короткого замыкания, особенно остро проявляющийся в регионах с высокой плотностью энергопотребления, а также в мегаполисах. Рост уровней токов короткого замыкания (КЗ) предъявляет повышенные требования к обеспечению электродинамической и термической стойкости электротехнического оборудования и надежности его работы

в режимах КЗ. К средствам ограничения токов КЗ относятся токоограничители (ТО). Основное требование к ТО заключается в том, что ударное и установившееся значения тока КЗ в электрической сети не должны превышать предельно допустимой величины. Кроме того, ТО не должен негативно сказываться на параметрах электроэнергетической системы при нормальном режиме работы. ТО – это устройство, включаемое последовательно в цепь. Его сопротивление при рабочем токе и токе перегрузки мало, а при КЗ – значительно. В идеале ТО должен ограничивать первую полуволну тока до уровня, соответствующего электродинамической стойкости установленного оборудования, а также последующий ток до уровня, не превышающего уровня номинального тока отключения выключателей, установленных в сети. В большинстве случаев ТО не является отключающим устройством.

Особенно актуальна проблема КЗ для сверхпроводникового (СП) электрооборудования: СП-трансформаторов, СП-генераторов, линий электропередачи и т. д. Внутренние сопротивления СП-электрооборудования по сравнению с их значениями у традиционного оборудования значительно снижены, вследствие чего токи КЗ могут принимать недопустимо высокие значения.

Для вариантов ТО с использованием СП-элементов [1, 2] характерно очень малое влияние изменения коэффициента токоограничения на уровень напряжения в сети. Это связано с тем, что в СП ограничение тока определяется исключительно его величиной, а не величиной напряжения. Для варианта ТО на основе токоограничивающих реакторов [3–5] влияние токоограничения на напряжение в сети проявляется особенно сильно. Однако для вариантов СПТО, особенно для напряжений 110 кВ и выше, проблематично создание ТО с глубоким коэффициентом токоограничения для широкого применения из-за высокой стоимости сверхпроводника.

Весьма перспективными являются разработки быстродействующих токоограничителей-выключателей на основе элементов силовой электроники [2, 6, 7], обеспечивающих большие коэффициенты токоограничения и минимальную длительность динамического воздействия на потребителей и элементы электроэнергетической системы при КЗ. Интересным предложением является взрывной токоограничитель [8]. Конструктивно ограничитель ударного тока представляет собой герметизированный цилиндр, внутри которого располагается токонесущий проводник с вмонтированным пиропатроном. Сигнал на взрыв пиропатрона подается от внешнего управляющего устройства. Взрывной ограничитель ударного тока обладает рядом преимуществ: управляемостью от внешних устройств, направленностью действия, большими номинальными токами, стабильностью характеристик, повышенной эксплуатационной надежностью, возможностью однофазного и трехфазного отключения цепи. Однако ограничители ударного тока обладают одноразовостью действия. Кроме того, на них затруднено, хотя и возможно, осуществление цикла автоматического повторного включения (АПВ) сети (например, с использованием нескольких пиропатронов). Другая возможность осуществить АПВ – включение в сеть параллельно взрывному токоограничителю резистора с большим сопротивлением (плавкий предохранитель) или токоограничивающего реактора.

Бесконтактный нанографитовый токоограничитель

Автор этой статьи потратил более 20 лет на изучение тонких углеродных пленок, имея в виду их применение в первую очередь в качестве мишеней для пучков заряженных частиц. Позже внимание было уделено электромагнитным свойствам тонких углеродных пленок. Были обнаружены некоторые аномалии в электромагнетизме нанографитовых (НГ) пленок, образованных путем распыления спектрально чистого графита в электродуговом разряде, а также методами химического осаждения из газовой фазы (CVD). Одним из экспериментально наблюдаемых эффектов являлся скачок удельного электрического сопротивления на 5–6 порядков величины при некотором критическом токе, который может использоваться для

ограничения тока короткого замыкания в электрических цепях smart grids. Типичный вариант экспериментально наблюдаемой вольт-амперной характеристики представлен на рис. 1.

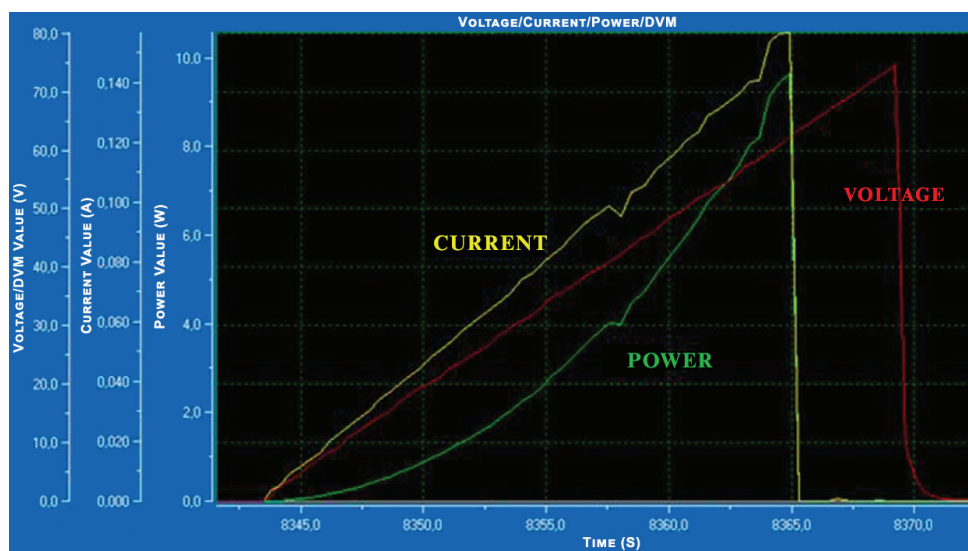


Рис. 1. Экспериментальная вольт-амперная характеристика прототипа бесконтактного токоограничителя

Как видно, ток переключения – небольшой и составляет 0,15 А. Особенностью нанографитового переключателя является зависимость момента переключения исключительно от тока в цепи, что видно на рис. 1, где ток резко падает до приборного нуля, а напряжение при этом остается еще конечным в течение 5 с. После снятия электрического напряжения проводящие свойства нанографитовой пленки быстро восстанавливались. На основе указанного эффекта ранее [2,9–11] был предложен бесконтактный НГ-токоограничитель (БНГТ). В основу БНГТ было положено предположение о возможности масштабирования величины переключающего тока до коммерчески интересных значений: 100 и даже 1000 А. В подтверждение возможности данного предположения можно привести следующие соображения. Сопротивление тонкой пленки можно представить в виде [12]:

$$R = R_s \frac{l}{d}, \quad (1)$$

где: R_s – поверхностное сопротивление пленки (Ом/□); l – расстояние между контактами; d – ширина контактных площадок (рис. 2).

Из соотношения (1) следует, что при длине контактных площадок 10 см и расстоянии между контактами ~1 мм можно нынешнее сопротивление пленки около 1 кОм уменьшить в ~1000 раз – до ~1 Ом, при этом ток переключения увеличится до 100 А, а мощность возрастет до 10 кВт. При увеличении длины контактных площадок до ~1 м сопротивление пленки уменьшится до ~0,1 Ом, ток переключения – до 1 кА, а выделяемая электрическим током мощность возрастет до 100 кВт. Понятно, что такие тепловыделения можно снять только интенсивным охлаждением, прежде всего водяным. Ниже рассматривается возможность водяного охлаждения и определяются конкретные параметры контура охлаждения и теплоносителя.

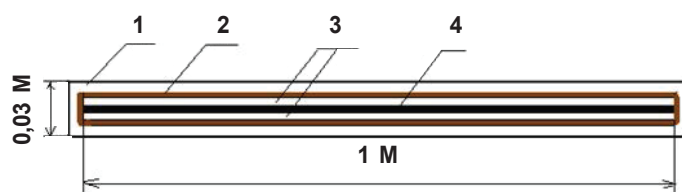


Рис. 2. Контактная схема БНГТ на 100 кВт:

1 – медная трубка контура охлаждения; 2 – AlN-изолирующая подложка;
3 – проводящие контактные площадки $10 \times 1000 \text{ мм}^2$; 4 – межконтактный зазор нанографитовой пленки $\sim 1 \text{ мм}$

Тепловая схема переключателя вместе с контуром водяного охлаждения представлена на рис. 3. Свойства конструкционных материалов и теплоносителя, необходимые для расчета, представлены в табл. 1.

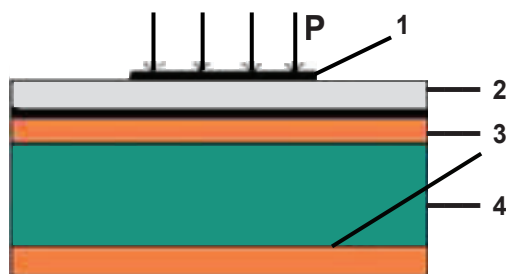


Рис. 3. Тепловая схема токоограничителя на НГ-пленке:

1 – НГ-пленка; 2 – подложка из нитрида алюминия;
3 – медная трубка охлаждающего контура; 4 – водяной теплоноситель

Таблица 1

Свойства конструкционных материалов и теплоносителя

Параметр	Теплоноситель – вода	Медная трубка	Подложка AlN	НГ-пленка
Коэффициент теплопроводности, Вт/(м·град)	0,67	390	200	50
Толщина, м	0,03	0,002	0,00025	0,000001

Тепловой расчет можно провести по схеме тепловых сопротивлений, представленной на рис. 4. Здесь использованы следующие обозначения: T_0 – температура охлаждающей воды; α – коэффициент теплоотдачи от медной стенки к воде; S – величина теплоотдающей поверхности; λ_w – коэффициент теплопроводности медной стенки; δ_w – толщина медной трубки; λ_{AlN} – коэффициент теплопроводности подложки из нитрида алюминия; δ_{AlN} – толщина подложки из нитрида алюминия; λ_{NG} – коэффициент теплопроводности НГ-пленки; δ_{NG} – толщина НГ-пленки; T_{NG} – температура поверхности НГ-пленки.

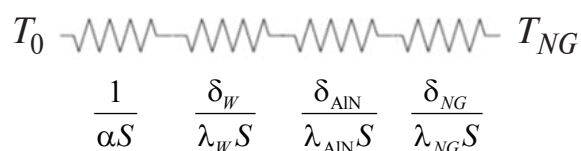


Рис. 4. Схема теплового расчета

Согласно конфигурации, представленной на рис. 4, температуру поверхности пленки можно определить по формуле:

$$T_{NG} = P(1/(\alpha S) + \delta_w/(\lambda_w S) + \delta_{AIN}/(\lambda_{AIN} S) + \delta_{NG}/(\lambda_{NG} S)) + T_0, \tag{2}$$

где: $P = 100$ кВт – мощность, выделяемая током в НГ-пленке в момент переключения; $S = 0,03 \text{ м}^2$ – теплоотдающая поверхность.

Вычисление коэффициента теплоотдачи от медной стенки к воде производится по методике, применяемой для прямых труб [13]:

$$N_u = \frac{\xi \text{ Re Pr}}{8 \sqrt{K + 12,7(\text{Pr}^{\frac{2}{3}} - 1) \sqrt{\frac{\xi}{8}}}}, \tag{3}$$

где: $k = 1 + \frac{900}{\text{Re}}$; $\xi = (1,82 \lg \text{Re} - 1,64)^{-2}$; $\text{Re} = \frac{v d_e}{\nu}$ – критерий Рейнольдса, $v = 10$ м/с – скорость теплоносителя, $d_e = 0,03$ м – эффективный диаметр охлаждающего трубопровода, ν – коэффициент вязкости теплоносителя; $\text{Pr} = 2,5$ – коэффициент Прандтля для охлаждающего теплоносителя (вода); $\alpha = N_{u\lambda T}/d_e$, λ_c – коэффициент теплопроводности теплоносителя.

Выполнив расчет с использованием выражений (2) – (3) и данных табл. 1, получим результаты, представленные в табл. 2.

Таблица 2

T_0	v	Re	Pr	N_u	α	T_{NG}
20 °С	10 м/с	10^6	2,5	$2,57 \times 10^3$	$5,74 \times 10^4$ Вт/(м ² ·град)	100 °С

Система охлаждения для НГ-токоограничителя схематично представлена на рис. 5.

Для охлаждения можно применить, например, 100-киловаттный чиллер DN-TS100BUSOHF производства DANTEX [14].

Обсуждение

Принцип действия БНГТ, рассмотренного в настоящей работе, основан на нелинейности вольтамперной характеристики (ВАХ) нанографитовой пленки, сопротивление которой меняется в зависимости от величины тока. Когда в сети происходит КЗ, сопротивление пленки скачком резко увеличивается на 4–5 порядков величины, что характеризует кратность (глубину) ограничения тока. Такая кратность ограничения тока значительно превышает

величину до 4 раз для СПТО и 2 раз для реакторов [15]. Причина столь глубокого токоограничения состоит в том, что при увеличении тока через НГ-пленку происходит срыв за счет силы Лоренца магнитных вихрей с центров пиннинга, что приводит к резкому росту электросопротивления. Увеличение токов переключения до 1 кА может существенно снизить величину токоограничения из-за недостаточно высокой концентрации центров пиннинга, однако есть основания полагать, что токоограничение не будет ниже такого в СПТО и реакторах.

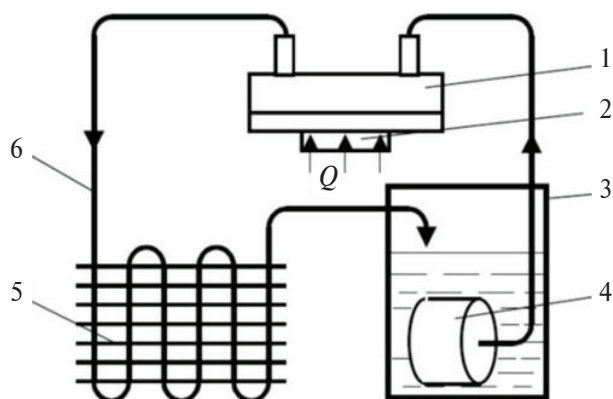


Рис. 5. Система охлаждения для НГ-токоограничителя: 1 – первичный теплообменник; 2 – НГ-пленка на подложке из нитрида алюминия; 3 – емкость с теплоносителем, циркуляционный насос; 4 – вторичный теплообменник на 100 кВт; 5 – соединительные трубопроводы

Скорость срабатывания БНГТ очень высока и составляет несколько сотен микросекунд [9–11], что заведомо удовлетворяет необходимому, с технической точки зрения, требованию не превышать 2 мс [15]. Столь высокое быстродействие позволит существенно снизить тепловые потери, выражаемые интегралом Джоуля. Низкое сопротивление БНГТ в рабочем состоянии ($\sim 0,1$ Ом) определяет низкие потери мощности в энергетической сети. Повторное включение БНГТ происходит с электронными временами, что обуславливает возможность АПВ. Преимуществами БНГТ также являются отсутствие криогенного охлаждения и низкие капитальные затраты.

Представленный в статье БНГТ имеет относительно низкий ударный ток КЗ, составляющий 1 кА, однако его можно существенно увеличить, используя матричный метод включения батарей из параллельно и последовательно включенных элементов [2], что открывает путь использования БНГТ в высокоэнергетических электросетях.

Заключение

Представленный в статье анализ мер по увеличению ударных токов КЗ и мощности БНГТ открывает возможность создания токоограничителей с током переключения до 1 кА и мощностью 100 кВт, а при использовании матричного метода включения батарей из параллельно и последовательно включенных элементов открывает путь использования БНГТ в высокоэнергетических электросетях.

Список литературы

1. Kraemer H.-P., Schmidt W., Hong Cai, at al. Superconducting Fault Current Limiter for Transmission Voltage // Physics Procedia. 2012. № 36. P. 921–926.

2. Лебедев С. Токоограничители в интеллектуальных электрических сетях. 2015. LAP LAMBERT Academic Publishing ISBN: 978-3-659-77997-8. 68 стр.
3. Heidary A., Radmanesh H., Rouzbehi K., Pou J. A DC-reactor-based solid-state fault current limiter for HVdc applications // IEEE Transactions on Power Delivery. 2019. № 34 (2). P. 720–728.
4. Gor V., Povh D., Lu Yichuan, Lerch E., et al. SCCL-A new type of FACTS based short-circuit current limiter for application in high voltage systems // CIGRE session. 2004. P. B4-209.
5. Wu K., Yuan Z., Ye J., et al. Voltage Distribution Analysis of High Coupled Split Reactor in 500 kV AC Fault Current Limiter // IEEE Access. 2020. № 8. P. 185804-185815.
6. Fereidouni A.R., Vahidi B., Hoseini Mehr T., Garmroodi Doiran M. Enhancement of Power System Transient Stability and Power Quality Using a Novel Solid-state Fault Current Limiter // Journal of Electrical Engineering & Technology. Vol. 6. No. 4 (2011). P. 474–483.
7. Wang R., Chen Y., Chen J., et al. (2020). Plug-in gate-loop compensators for series-connected IGBT drivers in solid-state fault current limiter // CSEE Journal of Power and Energy Systems.
8. Шурупов А.В., Козлов А.В., Фортвов В.Е. и др. Токоограничители на основе быстродействующих коммутаторов. Опыт создания токоограничивающего устройства на напряжение 220 кВ // Энергия единой сети. 2013. № 2. С. 54–65.
9. Лебедев С.Г. Управляемый электрическим током переключатель на основе нанографитовой пленки. Инноватика и экспертиза: научные труды. № 1 (29). 2020. Стр. 18–26.
10. Lebedev S.G. Nanographite Films for Solid State Electronic Applications, Advances in High Energy Physics Volume 2013 (2013), Article ID 612582, 6 pages.
11. Lebedev S.G. Field-effect switching in nano-graphite films, Journal of Physics and Chemistry of Solids, Volume 75, Issue 9, September 2014. P. 1029–1032.
12. Бурлаков Р.Б. Трехзондовый метод измерения поверхностного сопротивления электропроводящих слоев // Вестник Омского университета. 2016. № 1 (79).
13. Кириллов П.Л. Справочник по теплогидравлическим расчетам в ядерной энергетике. 2010.
14. URL: <https://dantex.ru/products> (дата обращения: 27.06.2021).
15. Ивакин В.Н., Ковалев В.Д. Токоограничители для высоковольтных электрических сетей // Известия Академии электротехнических наук РФ. 2008. № 2. С. 15–24.

References

1. Kraemer H.-P., Schmidt W., Hong Cai, et al. (2012) Superconducting Fault Current Limiter for Transmission Voltage. Physics Procedia. No 36. P. 921–926.
2. Lebedev S. (2015) Current limiters in intelligent electrical networks. LAP LAMBERT Academic Publishing ISBN: 978-3-659-77997-8. Power and Energy Systems. P. 68.
3. Heidary A., Radmanesh H., Rouzbehi K., Pou J. (2019) A DC-reactor-based solid-state fault current limiter for HVdc applications. IEEE Transactions on Power Delivery. No 34 (2). P. 720–728.
4. Gor V., Povh D., Lu Yichuan, Lerch E., et al. (2004) SCCL-A new type of FACTS based short-circuit current limiter for application in high voltage systems. CIGRE session. P. B4-209.
5. Wu K., Yuan Z., Ye J., et al. (2020) Voltage Distribution Analysis of High Coupled Split Reactor in 500 kV AC Fault Current Limiter. IEEE Access. 2020. No 8. P. 185804–185815.
6. Fereidouni A.R., Vahidi B., Hoseini Mehr T., Garmroodi Doiran M. (2011) Enhancement of Power System Transient Stability and Power Quality Using a Novel Solid-state Fault Current Limiter. Journal of Electrical Engineering & Technology. Vol. 6. No. 4. P. 474–483.
7. Wang R., Chen Y., Chen J., et al. (2020) Plug-in gate-loop compensators for series-connected IGBT drivers in solid-state fault current limiter. CSEE Journal of Power and Energy Systems.
8. Shurupov A.V., Kozlov A.V., Fortov V.E. et al. (2013) Current limiters based on high-speed switches. Experience in creating a current-limiting device for a voltage of 220 kV. The energy of a single network. No. 2. P. 54–65.
9. Lebedev S.G. (2020). Electric current controlled switch based on nanographite film. Innovation and expert examination. Innovation and Expert Examination. No. 1(29). P. 18–26.

10. Lebedev S.G. (2013) Nanographite Films for Solid State Electronic Applications. *Advances in High Energy Physics* Volume. 2013. Article ID 612582. 6 p.
11. Lebedev S.G. (2014) Field-effect switching in nano-graphite films. *Journal of Physics and Chemistry of Solids*. September. Vol. 75. Is. 9. P. 1029–1032.
12. Burlakov R.B. (2016) Three-probe method for measuring the surface resistance of electrically conductive layers. *Omsk University Bulletin*. No. 1 (79).
13. Kirillov P.L. (2010). *Handbook of thermohydraulic calculations in nuclear power*.
14. Available at: <https://dantex.ru/products> (date: 27.06.2021).
15. Ivakin V.N., Kovalev V.D. (2008) Current limiters for high-voltage electrical networks. *Bulletin of the Academy of Electrotechnical Sciences of the Russian Federation*. V. 2. P. 15–24.