

ТЕХНИЧЕСКИ ПОДОБРЕНИЯ И ПРЕОБОРУДВАНИЯ ЗА ПОВИШАВАНЕ НА ЕНЕРГИЙНАТА ЕФЕКТИВНОСТ НА КОРАБНА ЕЛЕКТРОЕНЕРГИЙНА СИСТЕМА

Христо Милушев, Димитър Цветанов
ВВМУ „Н.Й.Ванцаров“, 9000 Варна, България

TECHNICAL IMPROVEMENTS AND RETROFITS TO INCREASE THE ENERGY EFFICIENCY OF SHIP POWER SYSTEM

Hristo Milushev, Dimitar Tsvetanov
NKOLA VAPTSAROV NAVAL ACADEMY, 9000, Varna, Bulgaria
E-mail: h.milushev@nvna.eu, d.tsvetanov@naval-acad.bg

Abstract

The purpose of this paper is to show a potential technical upgrades and retrofits for energy efficiency optimization of Ship Power System. To achieve reduction of energy consumption and improvement of the efficiency of energy system, it is necessary to ensure the quality of the power supply, accurate sizing of the machines, implementation of high efficient electric motors and power converters reduction of losses and improved operation and maintenance of the equipment.

Keywords: *ship, energy efficiency, retrofit, improvement*

ВЪВЕДЕНИЕ

В техническата система кораб има няколко основни области с повишени загуби на енергия, водещи до намаляване на ефективността и повишаване на консумацията на гориво. Това са енергийната система, съпротивлението на корпуса спрямо водата и вятъра и задвижването на кораба. Върху тези области може да се въздейства, да бъдат направени технически подобрения, преоборудвания и да се приложат мерки за повишаване на енергийната ефективност. Мерките се разделят основно на два вида в зависимост от приложението си – такива които се прилагат при проектиране (за нови кораби) и мерки при ремонт (за съществуващи кораби).

В статията са представени мерки, които могат да бъдат приложени за оптимизиране на енергийната система и оборудването при ремонт на съществуващи кораби. Повишаването на ефективността в отделните елементи на системата чрез преоборудване и модернизация ще осигури цялостно подобрение на енергийната ефективност и опазване на околната среда.

ОПТИМИЗИРАНЕ НА ЕНЕРГИЙНАТА СИСТЕМА И ОБОРУДВАНЕТО

Енергийната система на кораба включва източници на електрическа енергия (генератори), устройства за предаване и преобразуване на енергията (трансформатори, изправители, регулатори на честота) и консуматори. За повишаване на ефективността на енергийната система е необходимо да се осигури качествено електрозахранване, намаление на загубите от разпределение, точно оразмеряване на машините, прилагане на високоефективни генератори, двигатели и честотни инвертори, както и подобрена експлоатация и поддръжка на оборудването.

- Прилагане на дизел-електрическа задвижваща система

Прилагането на интегрирана електрозадвижваща система позволява генериране на енергия чрез комбиниране на дизелови двигатели, газови и парни турбини. Паралелно работещите генератори се включват в зависимост от натоварването на двигателите и осигуряват повишаване на оперативната ефективност на системата. Намалава общата инсталирана мощност на кораба, което увеличава товарното пространство. Дизел електрическото задвижване осигурява оптимално натоварване на двигателя при всички режими, по-голяма гъвкавост и надеждност. Консумацията на енергия от двигателя намалява и ефективността се повишава с до 30% при прилагане на честотни преобразуватели и фиксиран винт. [2], [3]

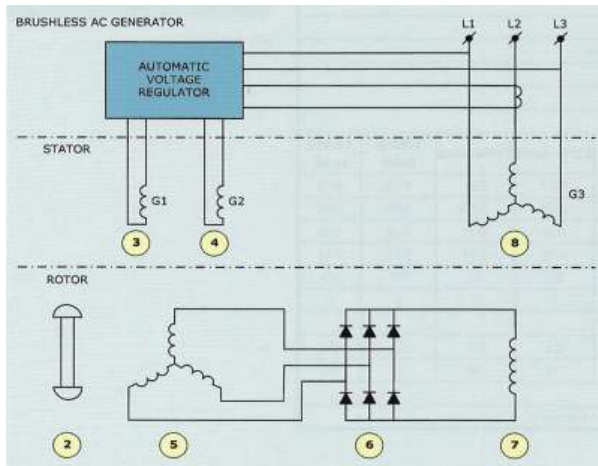
За повишаване на енергийната ефективност може да се приложи и постояннотокова мрежа за предаване и разпределяне на енергията (ABB). Концепцията включва използване на двигатели с променлива скорост и хибридни системи с акумулатори и горивни клетки за допълнителна мощност. Постига се намаление на горивна консумация с около 20% и на вредните емисии с около 30%.[2]

- Подобряване на ефективността на генераторите на енергия

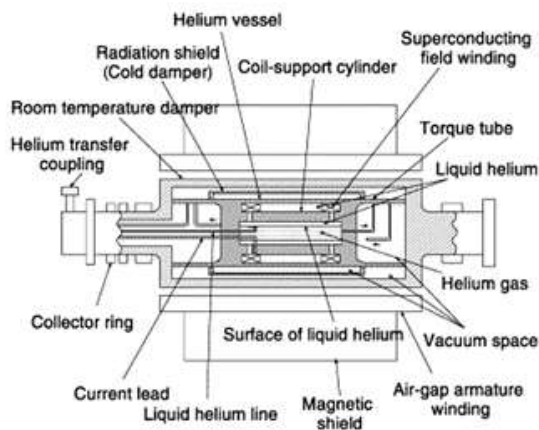
Приложението на валогенераторни системи на борда на корабите осигурява повишаване на експлоатационната ефективност, спестяване на гориво и емисии. [2] Те са разположени на главния вал на витлото и се задвижват от главния двигател, като доставят енергия към електрическата мрежа. Имат няколко основни предимства: осигуряват по-евтина електрическа енергия за консуматорите; надеждни са и не замърсяват; спестяват пространство и не изискват големи инвестиции.

Съвременните новопостроени плавателни съдове стандартно са оборудвани с такива системи., така наречените Power Take-Off (PTO) systems, но компанията Wärtsilä осъществи успешно първото в морската индустрия преоборудване на съществуващ кораб. Направена е модернизация на системата с вграден валогенератор на кораб за насипни товари Berge Toubkal, на базираната в сингапур компания Berge Bulk. Системата включва система за управление Wärtsilä, както и преобразувател, който позволява на генератора да работи в широк диапазон от обороти. Междинният вал и лагерите са заменени за да поемат увеличеното тегло. Това преоборудване ще повиши Energy Efficiency Existing Ship Index (EEXI) и ще осигури намаление на емисиите CO₂. [7]

Повишаване на ефективността на корабната електроенергийна система се постига чрез осъществяване на мониторинг и управление на енергията. Получената информация за параметрите и загубите, дава възможност да се вземе решение за преоборудване и замяна на ниско ефективните генератори, двигатели и оборудване с нови енергоефективни. Прилагат се високо ефективни синхронни генератори с хибридно възбуждане (постоянни магнити и електромагнити) с наклонени канали на статора за подобряване на магнитната индукция във въздушната междина и качеството на електроенергията. [2], [3]



Фиг.1.а) [6]



б)[12]

Съвременните синхронни генератори за променлив ток обикновено се състоят от три машини (фиг.1а): подвъзбудител – генератор с постоянни магнити; безчетков възбудител – синхрона машина с неподвижни възбудителни намотки и въртящ се токоизправител; основен синхронен генератор с въртящи се възбудителни намотки и автоматичен регулатор на напрежението. Синхронните машини с хибридно възбуждане увеличават ефективността тъй като се прилагат постоянни магнити (ПМ), които осигуряват поддържане на постоянно възбудително поле и повишение на фактора на мощността и електромагнити, които служат за регулиране на магнитния поток.

За повишаване на ефективността може да се направи преоборудване със синхронни генератори и двигатели с ПМ, направени от сплави на редки метали, като неодим, желязо и

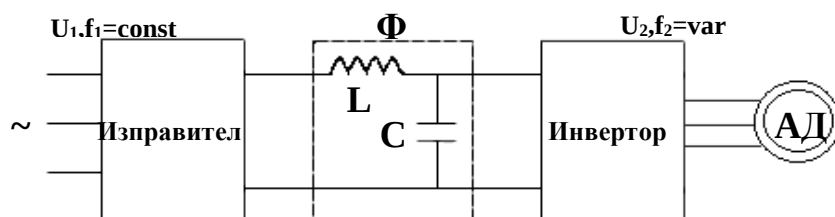
бор ($\text{Nd}_2\text{Fe}_{14}\text{B}$), самарий-кобалт (Sm-Co); и др. Те имат висока остатъчна намагнитеност, висока магнитна енергия и нисък коефициент на температурни изменения. Синхронните генератори с ПМ са с облекчен режим на самовъзбуждане, намалени габарити, имат по-висок $\cos\phi$ и висока надеждност. [2]

Оптимизиране на електрическата система може да се постигне и чрез използване на електрически машини със свръхпроводящи намотки. Свръхпроводниците имат нулево съпротивление при определена температура, съответно имат по-висока плътност на тока и следователно са по-ефективни. Прилагат се основно високо температурни свръхпроводящи материали, които работят при температура около точката на кипене на течния азот ($\sim 77\text{K}$). [2], [3]

При генераторите с възбудителни намотки от високотемпературни свръхпроводящи материали (фиг.1б) няма загуби в роторните намотки, осигурява се ток с висока плътност. В сравнение с конвенционалните машини, те са с по-малки размери и по-леки, което осигурява по-малка горивна консумация и позволява да се увеличи товарното пространство на кораба. Те имат висока ефективност при всички натоварвания - намаляват оперативните разходи с около 10% или повече в зависимост от натоварването.[2] Чрез преоборудване с генератори с високотемпературни свръхпроводящи намотки се спестява енергия. Те са с висока надеждност, опростена поддръжка, инсталационните и капиталови разходи са намалени. Прилагането им повишава енергийната ефективност, намаляват загубите и замърсяването.

- Оптимизация на електрозадвижващите системи

Електрозадвижванията на кораба консумират до 80-90% от произвежданата електроенергия и тяхната оптимизация ще осигури най-големи спестявания. Мерките за повишаване на ефективността включват: подходящ избор на механизмите и двигателите за осигуряване на оптимално натоварване на електрозадвижването; внедряване на по-ефективни електродвигатели и преобразуватели на електроенергия; осъществяване на подобрена експлоатация - извършване на редовна диагностика. Чрез управление на енергията и прилагане на най-добрите експлоатационни практики може да се постигне спестяване с до 15% и да се повиши енергийната ефективност. [4], [8], [9] За да се намали консумацията на задвижващата система се използват различни устройства, които регулират работата на двигателите, като най-ефективен е метода основан на честотното регулиране. На фиг.2 е показана блок-схемата на преобразовател на честота със звено на постоянен ток. Преобразователят се състои от управляем или неуправляем изправител, междинно звено на постоянен ток с филтър и изходен преобразовател – автономен инвертор на напрежение или автономен инвертор на ток. В зависимост от типа на автономния инвертор звеното на постоянен ток осигурява постоянно напрежение (обикновено като C или LC филтър), или като звено поддържащо постоянен ток (като последователен L филтър). [9] Най-разпространени са инверторите с две или три нива. Инверторите с много нива (каскадни инвертори) се използват при мощни електрозадвижвания. Изходното напрежение на тези преобразователи се получава от няколко източника на постоянно напрежение. Предимствата на тези преобразователи са: голяма мощност при малко съдържание на хармоници; ниски загуби на превключване; добро качество на електроенергията; високо напрежение.



Фиг.2 Блок-схема на преобразовател на честота със звено на

Те имат няколко фазово изместени превключвателя. Има три типа такива преобразователи: с отсичащи диоди; с отсичащи кондензатори; с H-мостове. Принципът има

на работа е основан на формиране на изходното напрежение чрез последователно свързване на отделните източници на постоянно напрежение. Броят на нивата е ограничен поради необходимостта от балансиране на напреженията. Тези преобразователи имат висока ефективност поради еднаквата честота на превключване на всички вентили и възможност за рекуперация. Използват се различни топологии и методи за модулация и управление. Използват се следните методи за модулация (ШИМ): с потискане на определени хармоници; чрез пространствен вектор; синусоидална. ШИМ с потискане на определени хармоници се използва при ниска честота на превключване и голяма мощност. Чрез промяна честотата на въртене на двигателя се регулира напорно-разходната характеристика на помпата. Намаляването на честотата на въртене води до намаление на производителността, при което консумираната мощност също намалява. Основното предимство на оптимизирането на тези системи е, че се изискват минимални инвестиции и срока за възвръщане е минимален. [8], [9]

- Качество на електрическата енергия

В корабната електроенергийна система основните причини за влошеното качество на енергията и загубите са смущенията причинени от висши хармоници, преходни процеси, несиметрии и нелинейни товари. Най-критичните области са електрическите задвижвания, управлението и комуникациите. Един от проблемите с качеството на електроенергията са хармониците, те се формират в резултат от работата на силовите полупроводникови устройства, нелинейни товари, резонанси и др. Те започват да влияят на оборудването и могат да предизвикат повреда, увеличаване на загубите, повишено ниво на шум и смущения, когато нивото им се повиши, при включване на множество товари или при преходни процеси. [1], [11] Други проблеми са трептене, дисбаланс и провал на напрежението, които се получават при пускане на мощни двигатели, големи товари, превключване на кондензаторни батерии, несиметрични товари или еднофазни къси съединения. Може да се причини прекъсване на електрозахранването при повреда на кабели, задействане на защитни комутационни апарати и др. Влошаването на качеството на електроенергията може да се определи като отклонение на напрежението и тока от тяхната идеална синусоидална форма. Може да се приложи хармоничен анализ за определяне на степента и характера на изкривяването. Процентът на общите изкривявания (THD - Total Harmonic Distortion),

$$THD = \sqrt{\sum_{h=2}^{40} (u_h)^2} \quad (1)$$

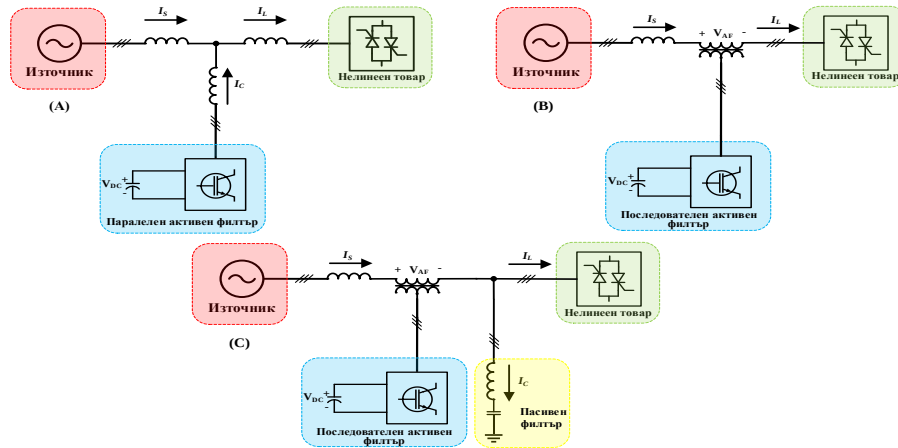
където u_h представлява относителната амплитуда на хармоник h , спрямо основното хармонично напрежение.

Устройствата за подобряване на качеството на електроенергията могат да се разделят на две групи ([5], [10]): дискретни устройства и компенсиращи устройства. Дискретните устройства регулират напрежението чрез управляеми превключватели на напрежение или комутируеми кондензатори. Компенсиращите устройства включват преобразователи на напрежение, които могат да бъдат разделени на три основни типа: компенсатори на ток, напрежение и комбинирана.

За повишаване на ефективността основно се прилага потискане на нивото на хармоничните изкривявания в електрозахранващата мрежа, чрез инсталиране на хармонични филтри. В зависимост от входния и изходния сигнал, както и вътрешните работни сигнали, филтрите могат да бъдат класифицирани като аналогови или цифрови. В аналоговите филтри работните сигнали са различни напрежения и токове, докато в цифровите филтри те са кодирани в двоичен формат. Филтрите за непрекъснато време и дискретизирани данни винаги са аналогови филтри, но филтрите с дискретно време могат да бъдат и аналогови, и цифрови. Аналоговите филтри могат да бъдат класифицирани според техните съставни

компоненти, като: *пасивни RLC филтри; механични филтри; микровълнови филтри; активни RC филтри; филтри с комутирани кондензатори.*

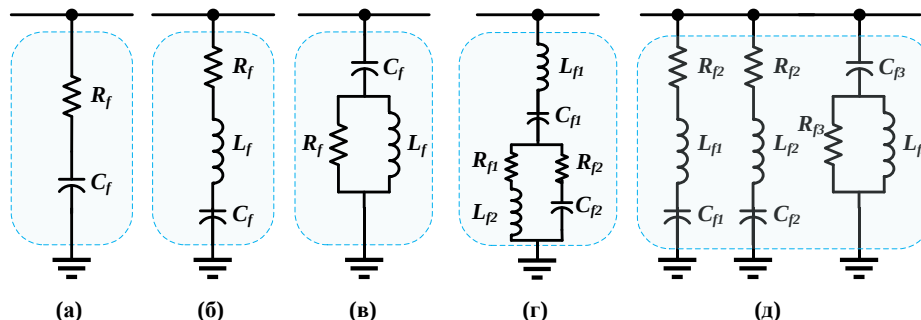
Филтрите за активна мощност могат да бъдат класифицирани въз основа на типа на преобразувателя, топологията, схемата за управление и компенсационните характеристики. Най-популярната класификация по топология включва паралелни, последователни и хибридни филтри. (фиг.3)



Фиг. 3 Топологии на филтри за активна мощност, реализирани с ШИМ инвертор на напрежение: а) паралелен филтър; б) последователен филтър; в) хибриден филтър

Паралелните филтри за активна мощност (фиг.3а) се използват за компенсиране на токови хармоници, реактивна мощност и небалансиран ток на товара. Те могат също да бъдат използвани като генератор на статична променлива в електрическите мрежи за стабилизиране и подобряване на напрежението. Последователните филтри (фиг.3б) се свързват последователно с променливотоковата мрежа преди товара чрез свързващ трансформатор, с цел елиминирание на хармониците на напрежението, балансиране и регулиране на напрежението на товара или линията. Хибридната конфигурация представлява комбинация от последователен активен филтър и пасивен паралелен филтър (фиг.3в). Тази топология е изключително полезна за компенсиране на системи с висока мощност, тъй като номиналната мощност на активния филтър е значително намалена (около 10% от товара). Използването на активни филтри намалява консумацията на електрическа енергия с до 30%.

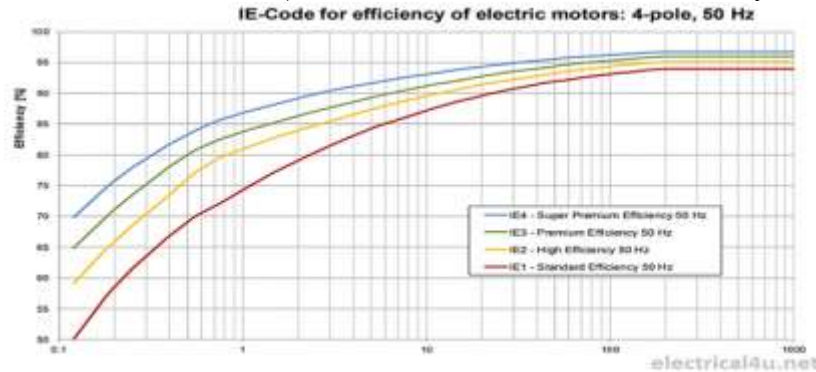
Пасивните хармонични филтри се състоят от резонансни филтри (фиг.4), които включват реактори и кондензатори, настроени да премахнат определен хармоник, обикновено от нисък ред (5-ти, 7-ми, 11-ти и т.н.). Това се постига чрез настройване на резонансната честота за съответния хармоник. При необходимост от премахване на други хармоници, трябва да се добавят допълнителни пасивни LC филтри, настроени за тези различни хармоници.



Фиг.4. Видове пасивни филтри: а) демпфращ високочестотен филтър от първи ред, б) последователен резонансен лентов филтър от втори ред, в) демпфращ високочестотен филтър от втори ред, г) двоен лентов филтър от четвърти ред, д) съставен филтър - два лентови филтъра и един високочестотен филтър

- Замяна на двигателите с високоефективните електродвигатели (ВЕЕД)

Те са с подобрена конструкция (увеличаване на сечението на проводника, подобряване на метода и техниката за навиване), което води до намаляване на загубите в намотките.



Фиг. 5 Сравнение на ефективността на стандартен двигател IE1 спрямо тази на високоефективни ЕД клас IE2, IE3, IE4 [13]

Подобрени са формата и сечението на роторните канали; използват се повече висококачествени материали, оптимизират се производствените методи, което води до намаление на магнитните загуби от хистерезис и вихрови токове. ВЕЕД консумират по-малко електрическа енергия, те са по-надеждни, имат по-дълъг експлоатационен срок, осигуряват по-висок КПД и спестяване на енергия.[2], [9] Замяната на двигателите с по-енергоефективни от енергийните класове IE2, IE3, IE4 изисква определени първоначални инвестиции, но те се възвръщат в кратък срок (1-2 години), тъй като се осигурява намаление на експлоатационните разходи. Прилагането на ВЕЕД ще осигури значителна икономия на електрическа енергия и повишаване на енергийната ефективност.

- Подобрена експлоатация и поддръжка на оборудването

Осъществяването на периодична диагностика и документиране на повредите също е важно и е необходимо за осигуряване на безпроблемна работа на машините. Чрез подходяща експлоатация се намалява консумацията на двигателите и съответно разходите, както и въглеродните емисии. Профилактичната поддръжка повишава надеждността и ефективността на оборудването. Мерките за оптимизирана поддръжка на системата включват следните дейности: тестове на намотките и съпротивлението на изолацията на машините; контрол на температурата; изключване на ненатовареното оборудване; точно оразмеряване на работната машина (помпа, вентилатор компресор); замяна на двигателя и работната машина с високо ефективни; регулиране на скоростта на задвижването.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Необходимо е да се създаде база с данни за оборудването и елементите на енергийната система, която да включва: техническите характеристики, тестове, данни за ремонти и поддръжка. Тази информация може да послужи за откриване и предпазване от проблеми или да се използва за осигуряване на подходящ ремонт или замяна на двигател или работен механизъм с по-ефективен. В статията са предложени различни технологии и мерки, които могат да се приложат при преоборудване и модернизация на корабна електроенергийна система за повишаване на енергийната ефективност.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Жежеленко И.В., Высшие гармоники в системах электроснабжения промпредприятий, 4-е издание, Москва, Энергоиздат, 2000, 331 с.
- [2] Кателиева Е., Енергийна ефективност на морския транспорт, монография, Колор Принт, Варна, 2022, 131с., ISBN: 97-954-760-543-5
- [3] Кателиева Е., Възможности за повишаване на енергийната ефективност на кораби, Научната трудове, ВВМУ "Н. Й. Вапцаров", 2012, стр. 123 ÷ 129, ISSN 1312-0867

- [4] Кателиева Е., Повишаване на енергийната ефективност на корабни електрозадвижващи системи, Годишник на ТУ-Варна, Том I, 2013, стр.100 ÷ 107, ISSN 1311-896X
- [5] Babu P.N., Choudhury B.K., Kar B., Halder B., Modelling of a hybrid active power filter for power quality improvement using synchronous reference frame theory, International Journal of Engineering Research & Technology, Vol.6, No.3, March 2017, pp.369-374.
- [6] Borstlap R., Hans ten Katen, Ships Electrical System, Dokmar Maritime Publishers; First Edition (January 1, 2011), ISBN-10: 9071500179
- [7] Buitendijk M., performs first ever inline shaft generator retrofit, Feb 9, 2023, [<https://swzmaritime.nl/news>]
- [8] Katelieva E., Analysis and improvement of energy efficiency of ship power system, IAMU 18th, AGA2017, NVNA, 2017, ISBN 978-954-8991-95-7, Vol.1, pp 439 – 449
- [9] Katelieva E., Energy efficiency improvement of ship motor driven systems. high efficient motors and drives, JMTE - Vol. II, 2013, pp. 25 ÷ 32, ISSN 1844-6116
- [10] Power Theories for Improved Power Quality, Editors, Grzegorz Benysek, Marian Pasko, Springer 2012, 216 p. ISBN 978-1-4471-2785-7.
- [11] Samudre V.S., Power quality standards problems and their solutions, International Journal of Engineering Sciences & Research Technology IJESRT, Vol.5, No.12, December 2016, pp.219-227. DOI: 10.5281/zenodo.192584.
- [12] What are the benefits of using a superconducting generator, Electrical, Jun 2019, 1/1, [<https://forumautomation.com>]
- [13] what-is-eff1-eff2-eff3-ie1-ie2-ie3-ie4-ie5-efficiency-class, [<https://www.electrical4u.net>]