

САВРЕМЕНО НАОРУЖАЊЕ И ВОЈНА ОПРЕМА
 СОВРЕМЕННОЕ ВООРУЖЕНИЕ И ВОЕННОЕ ОБОРУДОВАНИЕ
 MODERN WEAPONS AND MILITARY EQUIPMENT

Конвенционалне подморнице остају дуже под водом¹

Подморничке снаге имају све већу потребу за дејствовањем у приобалним водама у дужем интервалу.

Захваљујући својим способностима да остану невидљиве током боравка испод воде, дизел-електричне подморнице постају врло ефикасне платформе за забрану и одвраћање пловидбом морским површинама.

Међутим, за разлику од нуклеарних подморница, дизел-електричне подморнице не могу неограничено остати под водом због ограничења енергетског складиштења. Дизел-електричне подморнице на површини користе своје дизел-генераторе за стварање електричне енергије, али се они гасе приликом заређавања, па се електрична енергија за погон и друге оперативне системе, као и за системе одржавања, обезбеђује из акумулатора.



Подморница шведске морнарице класе Gotland користи погон независан од ваздуха Stirling, снаге 75 kW, који јој омогућује да се две недеље креће под водом брзином до 4 чвора

Дизел-мотори не раде док је подморница под водом, јер им је потребан кисеоник за сагоревање горива, а поред тога емитују штетне гасове. Када се акумулатори истроше, дизел-електрична подморница мора да изрони потпуно или на дубину перископа како би могла употребити шноркел који би усисавао свеж ваздух помоћу кога би прорадили дизел-мотори и генератори, чиме би почео процес пуњења акумулатора.

¹ Janes Navy International January February 2021

Израњање подморнице на површину или на дубину перископа је опасно, јер може бити лакше откривена и нападнута. Чак и при малим брзинама, подморница која користи оловне акумулаторе мора да изрони на дубину перископа сваких три до пет дана ради пуњења акумулатора. Ту би дошао до изражаја погон независан од ваздуха, који користи хемијске или електричне процесе ради генерисања струје.

Системи независни од ваздуха укључују дизел-моторе затвореног циклуса, горивне ћелије као и погоне *Stirling*. Сви ови системи захтевају кисеоник и гориво. Кисеоник се складишти криогено у резервоарима као течност под ниским-средњим притиском и употребљава се за производњу струје у горивним ћелијама и конверторском систему за производњу водоника. Овај процес може генерисати довољно струје која би дизел-електричној подморници омогућио останак под водом и до три недеље.

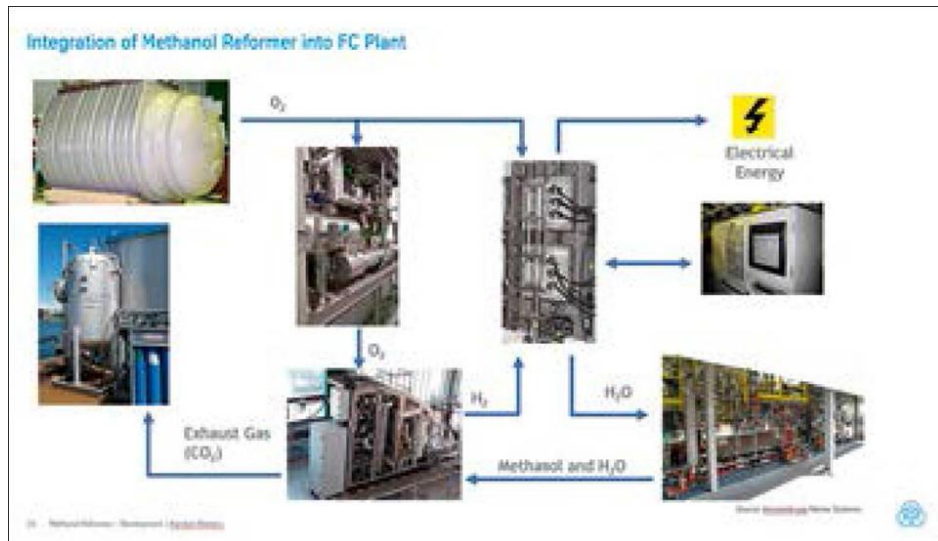
Алтернативни приступи

Циклични систем независан од ваздуха под називом *Stirling* развила је шведска компанија *Kockums* (сада у власништву компаније *Saab*) и први пут је уграђен у подморнице шведске ратне морнарице крајем осамдесетих година. *Stirling* је топлотни погон који користи стандардно дизел-гориво са малим процентом сумпора и ускладиштеног кисеоника. Извор топлоте долази од константног горења, али без експлозија карактеристичних за обичан дизел-мотор. На тај начин погон је врло тих и без вибрација. Енергија се користи за грејање радне течности, у овом случају инертног гаса, који се шири и скупља када је охлађен што покреће цилиндри који покрећу мотор.

Мотор је повезан са перманентним магнетским генератором који се налази у простору који је звучно изолован, а који генерише струју и пуни акумулаторе. Једини издувни гас је угљен-диоксид који се раствара у расхладној течности пре него што буде избачен са подморнице. Овакав поступак обезбеђује да се не појаве мехури који би могли открити положај подморнице. Део поступка сагоревања који ствара топлотну енергију је спољни у односу на део погона независног од ваздуха који конвертује топлотну енергију у механичку. То значи да постоји могућност бољег управљања издувним производима и проблемима акустике. Подморница класе *Gotland* користи два система независна од ваздуха типа *Stirling*, снаге од по 75 kW. Овакав погон омогућава подморници да остане под водом две недеље развијајући брзину до 4 чвора.

Алтернатива систему независном од ваздуха је водонична горивна ћелија, технологија коју је почела да развија компанија *Siemens* у сарадњи са немачким бродоградилштвом *Howaldtswerke Deutsche Werft (HDW)* које сада припада компанији *Thyssen Krupp Marine Systems (TKMS)*. Водоничне горивне ћелије користе водоник и кисеоник у процесу електролизе за генерисање струје. Компанија *Siemens* употребљава полимерску електролитску мембрану или мембрану за размену протона за своју горивну ћелију типа *SINAVY PEM*. У оваквом систему модули горивних

ћелија смештени су заједно са системом погона независног од ваздуха и заједно генеришу струју за акумулаторе и електрични мотор.



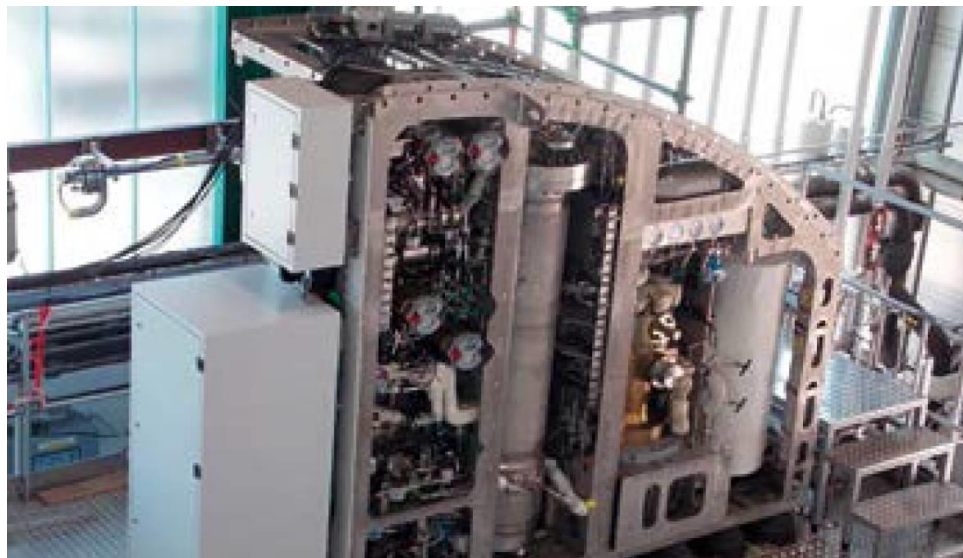
Дијаграм система TKMS/SENER MRFC који интегрише конвертер метанола у систем горивних ћелија у метал-хидридне цилиндрице. Употреба овог система, као извора водоника који снабдева горивну ћелију, значи да подморница не мора ускладиштити водоник.

Предност горивне ћелије јесте да она као нуспроизвод ствара воду и топлоту, што је лако уклонити за разлику од штетних гасова од сагоревања горива. Међутим, изазов за горивне ћелије се састоји од потребе складиштења велике количине водоника. Складиштење запаљивих гасова као што је водоник под високим притиском, нарочито у затвореном простору подморнице, може бити опасно иако примена металних хидрида донекле помаже у овој ситуацији. Ипак, иако су развијене безбедносне процедуре за складиштење водоника под нижим притиском и ван трупа, и даље постоји забринутост да је тај поступак врло скуп и да компликује допуњавање горивом.

Решење за складиштење водоника је у употреби реагенсног горива које би стварало водоник у самој подморници. Компанија *SENER*, у сарадњи са компанијом *TKMS*, настоји да реши безбедносне проблеме горивних ћелија погона независног од ваздуха. Проблем је у томе што је погон независан од ваздуха ограничен складишним простором, јер подморница може носити само одређени број цилиндара са водоником.

Ова компанија развија горивну ћелију са метанолом као реагенсом, где погон независан од ваздуха добија водоник тако што га извлачи из метанола.

Компанија наводи да је складиштење метанола у течном стању много безбедније него складиштење водоника, а да је процес екстраховања водоника из метанола већ доказан у комерцијалној сфери. Такође, тврди се да је овај процес ефикаснији и да се као нуспроизвод јавља само мала количина угљен-диоксида.



Систем екстраховања водника из метанола

Горивна ћелија са метанолом као реагенсом ради кроз парно реформатовање метанола. Кисеоник се доводи у реформатор под високим притиском у облику гаса на околној температури. То смањује потрошњу енергије током процеса конверзије. У овом процесу се течни кисеоник ниског притиска у резервоару доводи у помоћни контејнер где делимично испарава, а притисак повећава све док не достигне високе вредности и испари помоћу воде, а затим гас одлази у реформатор.

Ради континуиране испоруке кисеоника употребљава се други помоћни контејнер за спровођење истог процеса када је први контејнер испразњен и депресуризован за поновни почетак процеса у коме се снабдева реформатор.

Гориник који ради на кисеоник обезбеђује топлотну енергију која загрева вишак воде из горивне ћелије у пару. Реформатор одваја водоник, угљен-диоксид, угљен-моноксид и воду, који затим одлазе у модул за пречишћавање. То екстрахује чисти водоник за употребу у горивним ћелијама, а угљен-диоксид се раствара у морској води ради одлагања.

Главни технолошки изазов јесте спровођење процеса у тихим условима, без компромитовања подморнице. Због тога је потребно да се гас у потпуности раствори тако да се појаве мехури ваздуха у води. Дакле,

систем избацује гас у морску воду у облику мехурића чиме се завршава процес растварања.

Количина ускладиштеног метанола зависи од оперативних захтева погона независног од ваздуха. Ради смањења просторног захтева ускладиштени метанол се налази у неколико структурних резервоара. Празни резервоари метанола користе се за складиштење воде коју производи погон независан од ваздуха, тако да је тежина равномерно компензована.

Реформатирање помоћу дизел-горива

Претходни погон независан од ваздуха француске компаније *Naval Group* носи назив *Module d'Énergie Sous-Marin Autonome (MESMA)*; ради се о парној турбини затвореног циклуса која сагорева етанол и ускладиштени кисеоник. Процес производи топлоту која покреће парни генератор, турбину и алтернатор који генерише струју. Међутим, овај систем користи велику количину кисеоника у процесу што га чини мање ефикасним, иако обезбеђује високу излазну снагу од 200 kW, која омогућава две недеље подводних операција брзином од 4 чвора.

Компанија *Naval Group* сада ради на новој водоничној горивној ћелији друге генерације *Fuel Cell 2nd Generation (FC2G) AIP system* која је приказана 2018. године на изложби поморског наоружања у Паризу. Компанија је изнела решење складиштења водоника за реформатор дизела. Навела је да претходне генерације погона независних од ваздуха карактерише висока потрошња кисеоника и/или врло мала густина горива. Оба захтевају велике количине ускладиштеног реагенса, ограничавајући укупну количину енергије која се може обезбедити. Овај погон независан од ваздуха карактеришу смањена потрошња кисеоника са великом густином горива, што омогућава значајно унапређење у густини енергије.

Према компанији *Naval Group*, смештање хидридних цилиндара ван подморнице представља ризични изазов у смислу подморничке архитектуре и баланса тежине, а уз то је неефикасно. Наиме, од 160 тона хидрида који се транспортују као део погона независног од ваздуха, само 1% чини водоник који се може употребити у горивној ћелији, што је неефикасно и скупо. Ту су и импликације логистичке подршке пуњења подморница горивом ултрачистим водоником и кисеоником које захтевају посебне објекте за третман гаса, камионе који су кондиционирани у складу са строгим прописима за транспорт водоника, као и квалификације и процедуре за одржавање чистоће водоника и обезбеђивање интегритета подморнице и њене посаде. Према компанији, то је сложен и скуп логистички ланац, који, штавише, није доступан ни у једној луци.

Анализа коју је спровела компанија *Naval Group* показала је да у поређењу са другим изворима водоника, као што је метанол, дизел- гориво има вишу тачку паљења, што смањује ризик од пожара. Такође, најмање је токсичан када је изложен, а посаде су обучене за руковање њиме. Процес

његовог утовара и истовара је једноставан, доступан је широм света, а што се тиче перформанси има бољи енергетски одзив и густину водоника.



Тестирање новог погона независног од ваздуха FC2G који користи дизел-гориво као извор водоника за горивне ћелије

Сматрало се да је метанол превелики ризик: у случају цурења његова висока токсичност за људе и кратко време реакције угрозили би период у којем би подморница могла да остане под водом. Компанија *Naval Group* је саопштила да је метанол веома запаљив на температури од 12°C навише, што је прекорачење у свим условима рада подморнице. Дизел је пожељнији с обзиром на то да је једино гориво које није запаљиво, односно улази у запаљиво стање на температури већој од 55°C. .

За производњу водоника у систем *FC2G* гориво се сагорева да би се обезбедио извор топлоте ради добијања температуре потребне за обраду течности (што треба да се одржава кроз процес каталитичког реформисања). Компанија *Naval Group* је навела да оксидирано дизел-гориво даје више топлоте као извор енергије од метанола за око 130% и да то чини ефикасније. Такође, има већу густину водоника, садржи 20% више водоника по литру у поређењу са метанолом.

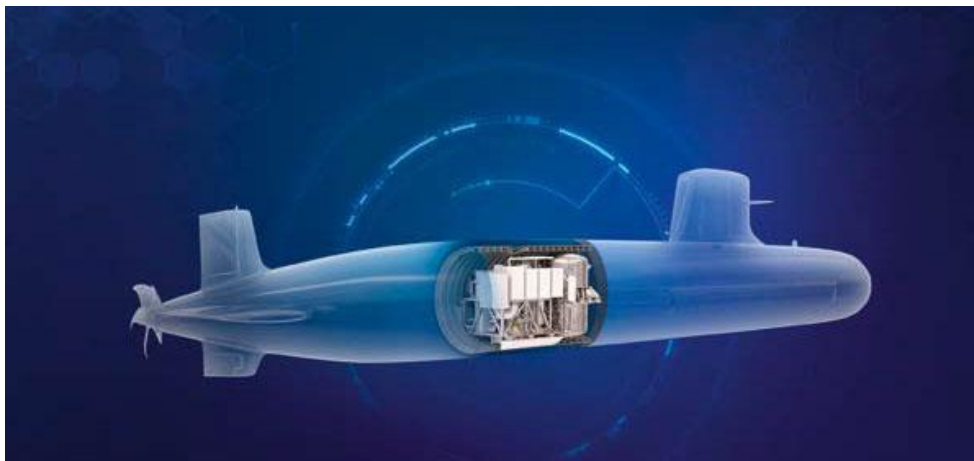
Главне компоненте система *FC2G* укључују реформатор, који се напаја дизел-горивом, кисеоником и паром (која се рециклира), претварајући ову мешавину у синтетички гас богат водоником. „Промена реактора” покреће реакцију „померања воде-гаса” која претвара угљен-моноксид у угљен-диоксид, заједно са конверзијом воде у водоник. То повећава садржај водоника у синтетичком гасу на максимум који је доступан и елиминише већину угљен-моноксида, повећавајући принос водоника.

Гас затим пролази кроз мембране за пречишћавање израђене од специјалних металних легура које пропуштају само водоник, чиме се одваја

од синтетичког гаса који се задржава унутар цеви. То осигурава чистоћу водоника који се користи у *PEM* горивим ћелијама за производњу електричне енергије. Кисеоник за горивну ћелију долази из истих модула за складиштење развијених за *MESMA* систем који такође обезбеђује кисеоник за контролу атмосфере подморнице, али је уместо тога помешан са азотом како би се олакшала његова употреба у *PEM* горивној ћелији.

Све компоненте су интегрисане на посебном делу са еластичним монтажама и висећим постољима како би се избегао било какав утицај на акустични потпис.

Дизајн реактора за реформисање и катализатора модификован је тако да мешавина реагенса и температура реакције избегавају стварање чађи, што је део изазова у развоју водоничних горивних ћелија да се пронађе прави баланс између перформанси и издржљивости.



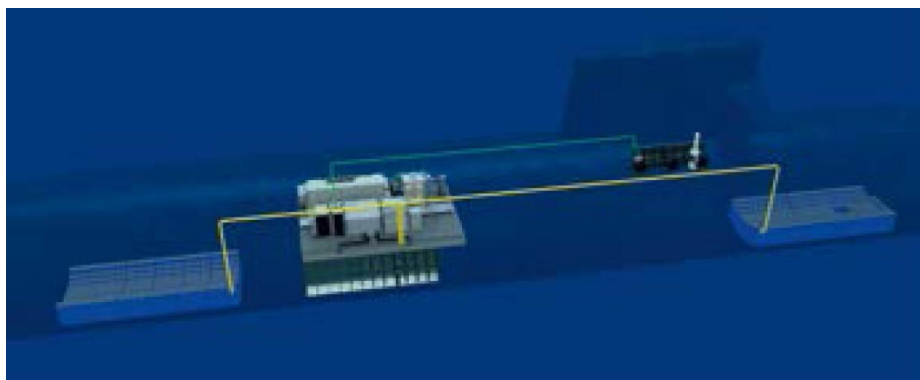
Нови систем FC2G независан од ваздуха који се види као модул у оквиру дизајна подморнице Scorpene, компаније Naval Group. Очекује се да ће компанија понудити ову могућност будућим корисницима својих подморница класе Scorpene како се потражња за погоном независним од ваздуха повећава.

Управљање термичком интеграцијом и смањење потрошње кисеоника су, такође, суштински елементи система. Компанија *Naval Group* наводи да се термичком интеграцијом управља враћањем калорија преко измењивача топлоте, што оптимизује ефикасност и минимизира потрошњу кисеоника. Штавише, дизајн хемијског реактора постављен је да повећа ефикасност кисеоника до максимума, као и да омогући одговарајућу издржљивост. То је посебно важно, јер ће одлучујући фактор у оперативној издржљивости бити потрошња кисеоника, па је цео процес у функцији оптимизације.

За систем *FC2G* емисије угљен-диоксида избацују се из подморница на исти начин као и код система *MESMA* и у нуклеарним подморницама. Компанија *Naval Group* је саопштила да постоје две оперативне предности: прво, систем ради под високим притиском, што му омогућава да се користи

у читавом опсегу оперативних дубина подморнице без потребе за додатним актуатором затвореним на издувном систему, друго, третман пре пражњења спречава да он утиче на акустични и инфрацрвени потпис подморнице, постижући његово растварање неколико метара од подморнице.

Систем *FC2G* је развијен од индустријских горивних ћелија да би имао користи од побољшања доступних на комерцијалном тржишту, али је затим прилагођен да задовољи потребе морнарице. Развој је био фокусиран на збијање горивних ћелија, узимајући у обзир типичне потребе подморнице за простором, као и разматрања везана за одржавање, односно олакшавање укрцавања, искрцавања и приступа посади. Још један кључни аспект прилагођавања подморском окружењу је строга контрола емисије водоника на броду. Горивне ћелије су дизајниране тако да им није потребно складиште водоника за рад, заједно са дубоким смањењем протока прочишћавања. То омогућава већу контролу квалитета атмосфере и бољу безбедност када систем независан од ваздуха није у употреби.



Компјутерска слика најбољег погона независног од ваздуха уграђеног у нове подморнице S-80P шпанске морнарице. Компанија Navantia се одлучила за реформаторски систем етанола као метод за производњу водоника за своју горивну ћелију.

Систему *FC2G* потребно је шест сати да се покрене, што укључује загревање свих компоненти, посебно реформатора, како би се постигла максимална ефикасност. Систем се укључује непосредно пре достизања тачке зарањања, тако да је спреман за употребу када то захтева командант подморнице.

Компанија не верује да ће бити потребни додатни чланови посаде подморнице за управљање системом *FC2G*, јер ће то бити још један систем за рад подморнице који ће спроводити исти оператер који врши контролу погона и надгледа систем независан од ваздуха из контролне собе.

Компанија *Naval Group* је потврдила да је систем *FC2G* прошао више од 7.000 сати тестирања на копну како би се оптимизирала ефикасност сваке компоненте и потврдили периоди одржавања. Тестови су обављени

са репрезентативним профилом мисије подморнице који је узимао у обзир максимални високи притисак који је подморница издржала и био је повезан са подморничким батеријама и контролисан од једног оператера преко система за управљање интегрисаном платформом.

Током „патролне демонстрације” 2019. године, систем *FC2G* био је квалификован за издржљивост од 18 дана, али са ефикасним процесом који се односи на кисеоник и резервоаре за складиштење може да постигне и до три недеље. Подводна издржљивост, у ствари, зависи од равнотеже између перформанси и тежине платформе коју желе купци, са запремином складиштења течног кисеоника као параметром. Могуће је премашити тронедељну издржљивост, али за сада за ту алтернативу нема интересовања купаца. Компанија *Naval Group* наставља рад на побољшању ефикасности процеса реформисања за већу оперативну доступност, укључујући оптимизацију термичке интеграције са мањом потрошњом кисеоника и већом производњом водоника уз напредак у материјалима за смањење величине и тежине и лакоћу одржавања.

Алтернативе погону независном од ваздуха

Од појаве технологија за погон независан од ваздуха за подморнице и њихове доступности на међународном тржишту, читав низ земаља је набавио нове подморнице и избегавао ову опцију. Иако из доступних информација није могуће прецизно утврдити који су разлози за такву одлуку, може се говорити о неколико општих трендова. Државе као што су Бангладеш, Индонезија, Мијанмар и Вијетнам изабрали су подморнице које немају погон независан од ваздуха због приступачности. Алжир тренутно не размишља о таквом погону због трошкова у својој флоти. У међувремену, одлука Бразила је вероватно узела у обзир планове да његове подморнице на нуклеарни погон преузму дугорочне дужности, док Русија, због постојећег развијеног дизајна нуклеарних и обичних дизел-електричних подморница, за сада не разматра ове опције.

Јапан је више од деценије опремао своје подморнице системом независним од ваздуха *Kockums Stirling AIP*, али је недавно одлучио да прекине ову праксу и примени технологију литијум-јонских батерија. Ове батерије имају значајне предности у односу на класичне акумулаторе и могу за неке оператере постати алтернативно решење за испуњавање њихових потреба за перформансама у будућности.

Кључни фактори перформанси укључују степен нечујности, брзину напредовања и оперативну флексибилност. Погон независан од ваздуха је веома ефикасан, омогућавајући неколико недеља рада под водом, у поређењу са неколико дана за конвенционалну подморницу. Литијум-јонске батерије, у зависности од хемије, имају густину енергије која је више него двоструко већа од оловне батерије за одређену запремину и стога такође имају велики потенцијал.

Још једна предност литијум-јонских батерија јесте да се могу пунити брже од оловних батерија и до било ког степена. Оне не само да смањују

време изложености близу површине током употребе шноркела већ и смањују ограничења која су инхерентна при пуњењу класичне оловне батерије у фазама.

Литијум-јонске батерије такође нуде неке предности подводне брзине. Пуна снага батерије је доступна у свим стањима напуњености, дајући више опција убрзавања за подморницу које се јављају чешће када се комбинују са поменутим карактеристикама пуњења. Типичне инсталације погона независног од ваздуха имају тенденцију да обезбеде издржљивост и домет при малим брзинама, али се и даље ослањају на инсталиране батерије за већу брзину напредовања.

Још једна предност коју нова технологија батерија може да пружи у поређењу са оловним јесте смањена сложеност система подршке за батерије. Ради се о смањењу захтева за циркулацијом киселине, хлађењем, вентилацијом и испирањем, јер се ризици од корозивних течности и експлозивних гасова могу избећи дизајном затворених литијум-јонских ћелија које се не одржавају.

У зависности од оперативних захтева, нека литијум-јонска подешавања могу донети побољшања у односу на традиционалне системе оловних батерија и могу се упоредити са сложеношћу, захтевима за простором за реагенсе и машине, трошковима набавке током целог века одржавања и лакоћом допуњавања горива разних система погона независним од ваздуха. Међутим, литијум-јонска технологија се и даље суочава са неким изазовима, међу којима је и постизање потребних нивоа безбедности за употребу у подморницама у односу на поузданост доказаних оловних батерија које се користе више од једног века.

Комбинација нових батерија и погона независним од ваздуха у међувремену обећава да ће још више затворити јаз између подморница на конвенционални погон и подморница на нуклеарни погон, пре свега у контексту веће цене.

Одржива решења

Шпанско бродоградилште Navantia такође је развило сопствени систем горивних ћелија под називом *Bio-Ethanol Stealth Technologies (BEST)*, који користи реформатор етанола за производњу водоника. Navantia је развила систем у партнерству са шпанском морнарицом и компанијама *Collins Aerospace*, *Abengoa*, и *Bionet*. Компанија *Collins* је испоручила *PEM* горивну ћелију, која је посебно дизајнирана за војне операције. Компанија *Abengoa* је развила минијатурни био-етанолни реформатор, а компанија *Bionet* систем за одлагање угљен-диоксида. *BEST* такође укључује систем за подешавање снаге и контролни систем. Главне компоненте могу се заменити кроз логистички отвор од 800 мм у подморници. Према компанији Navantia погон обезбеђује 300 kW снаге и њиме се управља преко система за управљање интегрисаном платформом.

Процес реформисања етанола је сличан оном који се користи за дизел-гориво и реформисање метанола у системима *MRFC* и *FC2G*. Процес се састоји од две фазе каталитичке реакције, почевши од реформисања горива, која разлаже угљоводоник у водоник и друге нуспроизводе као што су угљен-диоксид, метан или угљен-моноксид. Након тога следи пречишћавање тока реформатора, што повећава производњу водоника и смањује угљен-моноксид. Компанија *Navantia* навела је да је главна разлика система компанија *Naval Group* или *SENER* у томе што су *BEST* горивне ћелије дизајниране тако да раде директно на реформатираним гасу, док друге захтевају реформисање под високим притиском и мембране како би се добио чисти водоник, што овај систем чини једноставнијим и поузданијим.



Систем Stirling, који је у употреби од 80-их година, ажурира се како би се осигурало да остане конкурентан новим системима заснованим на горивним ћелијама.

Према компанији *Navantia*, ћелије су израђене од порозних биполарних плоча за пасивно управљање водом и равномерно, континуирано мембранско влажење без потребе за овлаживањем или системима за уклањање течне воде. Овај напредни дизајн не само да чини горивну ћелију једноставнијом на нивоу система већ, такође, обезбеђује двоструки радни век у поређењу са тржишним стандардом који ради на реформатираним гасу и чистом кисеонику (не ваздуху). Тиме се избегава потреба за системима за пречишћавање водоника, као што је мембрана, или симулацијом ваздуха, што је додатно поједностављење система.

Развој је завршен у фебруару 2020. године. Компанија *Navantia* је заговарала употребу биоетанола због његове доступности, лакоће руковања, његове безбедности, као и због високог нивоа ефикасности уз минималне конверзије.

Компанија је саопштила да постоје ограничења у коришћењу других горива. Дизел-гориво потребно за реформирање захтева посебне процесе и опрему за уклањање сумпора пре укрцавања. Наиме, реформирање за производњу водоника са алкохолом трајније је и робустније у поређењу са другим угљоводоничним горивима. Метанол је такође алкохол, али је веома токсичан и канцероген, што представља додатни безбедносни изазов за дизајн платформе.

Коришћење биогорива (биоетанола уместо синтетичког етанола) има додатне предности које се односе на логистику, доступност у било којој земљи са развијеном пољопривредном индустријом, и вођење бриге о одрживости животне средине. Систем *BEST* је дизајниран да омогући подморници да остане под водом до три недеље, а планирано је да буде инсталиран у нове подморнице шпанске морнарице *Isaac Peral (S-80 Plus)*, почевши са трећом подморницом из класе *Cosme Garcia (S 83)*. Прве две подморнице се већ увелико граде, тако да ће добити систем *BEST* током свог првог већег ремонта.

Међутим, увођење система горивних ћелија заснованих на реформатору не значи да је складиштење метал-хидрида прошлост. У септембру 2019. на Конференцији о подморницама у Килу, у Немачкој, компанија *TKMS* је лансирала сопствени нови погон независан од ваздуха *FC4G*, назвавши га системом четврте генерације. У саопштењу за штампу компанија је навела да овај систем побољшава доступност, редундантност и невидљивост на основу „модуларног система састављеног од редундантних компоненти” који наставља да користи металне хидридне цилиндрице за складиштење водоника. Ускладиштени водоник се и даље користи у подморницама и, упркос тврдњама о супротном.

Stirling еволуира

Компаније *Saab Kockums* и *FMV* и даље верују у развој Стирлинговог погона независног од ваздуха. Потреба горивне ћелије за водоником, било да се складишти у резервоарима или је производи реформатор, озбиљно ограничава систем.

Подморнице које складиште водоник у резервоарима имају неколико стотина тона цеви у којима се налази водоник. За пуњење ових резервоара потребно је неколико контејнера у поморској бази и 10 до 12 великих приколица са водоником, а сам процес пуњења траје отприлике 36 сати.

Претпоставља се да је то предуго за подморницу у луци у ратном сценарију. Подморница са погоном независним од ваздуха *Stirling* може много брже напунити све залихе – дизел, оружје, храну итд. Допуна се, такође, може извршити на мору са било ког брода за снабдевање. Ћелије се и даље морају послати назад добављачу на одржавање. Ако систем горивних ћелија добије водоник из реформатора, вишак се изненада драматично смањује. Још не постоји оперативна подморница са реформатором, али ако икада буде постојала вероватно ће бити само један реформатор на броду, док систем *Stirling* има велики број

појединачних мотора, нуди доста редувантности и погодан је за одржавање на мору.

Компанија *FMV* је проценила да би, када се ради о трошковима, упоредиви систем горивних ћелија на подморници морао бити бар десет пута већи у поређењу са системом *Stirling*, са истим односом који се односи на допуну горива и кисеоника. Систем *Stirling* је веома робустан и исплатив. То је систем који ради у ратном сценарију, јер је логистика врло једноставна у поређењу са системом горивних ћелија.


Систем *Stirling* је достигао своју пету итерацију. Најновија верзија, позната као *Double Stirling Module (DSM)*, комбинује два *Stirling* мотора од 75 kW (генеришући комбиновану снагу од 150 KW) у простору који је претходно заузимао један модул. То је постигнуто побољшањем интеграције свих компоненти система како би се минимизирао физички отисак на броду. Постоје неке компоненте са веома високом доступношћу које би могле да се деле између два или више мотора без ризика од укупне редувантности и доступности, што ће резултирати компактнијим системом са више инсталиране енергије по јединици запремине.

Енергетска ефикасност је од суштинског значаја како би се обезбедило максимално коришћење расположиве електричне енергије. Компанија *Saab Kockums* развија начине да искористи отпадну топлоту из мотора *Stirling* за загревање унутрашњости чамца или регенерацију јединица за апсорпцију угљен-диоксида.

Друга област која се разматра јесте коришћење паре за производњу хладне воде у систему за апсорпцију. На тај начин могли би сезаменити бучни компресори веома тихим пумпама и истовремено уштедети електрична енергија.

У току су истраживачки програми који испитују различита горива са већом густином енергије од дизела како би се искористила способност мотора *Stirling* да користи било који извор топлоте. За сада су резултати веома обећавајући, а у року од неколико година очекује се да се издржљивост још више повећа.

Драган М. Вучковић (*Dragan M. Vučković*),
e-mail: draganvuckovic64@gmail.com,

ORCID iD:  <https://orcid.org/0000-0003-1620-5601>