PALIVOVÉ ČLÁNKY

RAEN, spol. s r.o.

PALIVOVÉ ČLÁNKY

OBSAH

1.0 Úvod

2.0 Princip činnosti palivového článku

3.0 Druhy palivových článků, elektrolyty, teploty, paliva, emise

4.0 Provozovaná zařízení s palivovými články

5.0 Výhled využití palivových článků, účinnosti, ceny

6.0 Porovnání palivových článků s konvenčními způsoby výroby energie

1.0 Úvod

Omezené zásoby fosilních paliv a rostoucí spotřeba energie tepelné i elektrické se současným zvyšováním emisí škodlivin vyvolávají tlak na aplikace nových technologií umožňujících vyšší konverzi paliva na využitelnou energii se současnou minimalizací emisí škodlivých látek vypouštěných do okolního prostředí.

Kombinovaná výroba tepla a el. energie při porovnání s monovýrobou těchto komodit je v tomto směru významným příspěvkem. Ve stávajících zařízeních na bázi parní nebo plynové či paroplynové kogenerace, v kterých je kombinovaná výroba uskutečňována, je však výroba el. energie realizována pomocí tepelných oběhů pro přeměnu tepelné energie paliva na energii mechanickou a následně energii elektrickou.

Palivové články jsou zařízením pracujícím na zcela odlišném principu. Jedná se o elektrochemické měniče energie přeměňující chemickou energii paliva přímo na elektrickou energii a reakční teplo. Na rozdíl od dosavadních způsobů výroby el. energie je u palivových článků vypuštěna transformace energie paliva na energii tepelnou. V důsledku toho je možno u palivových článků dosáhnout vyšší účinnosti výroby el. energie, další předností jsou velmi nízké emise škodlivin. Vzhledem k tomu, že palivové články neobsahují žádné pohyblivé součásti je jejich provoz tichý a spolehlivý.

Zdroje energie elektrické nebo elektrické a tepelné s palivovými články je možno koncipovat pro různá paliva, s různou úrovní elektrické účinnosti, různou teplotní úrovní využitelného reakčního tepla a ve velkém rozsahu výkonů. Je možno je tedy využít jak pro malé lokální tak pro velké zdroje zajišťující dodávku el. energie nebo tepla a el. energie do stávajících distribučních sítí.

Palivový článek, který byl původně využíván pouze v kosmických technologiích je v současné době předmětem intenzivního výzkumu v oblasti pohonu vozidel a stacionárních zdrojů pro kombinovanou výrobu tepla a el. energie. Předpokládá se, že během období řádově deseti let budou zdroje energie s palivovými články menších výkonů pro lokální využití komerčně dostupné v cenách konkurujícím stávajícím plynovým kogeneračním jednotkám.

2.0 Princip činnosti palivového článku

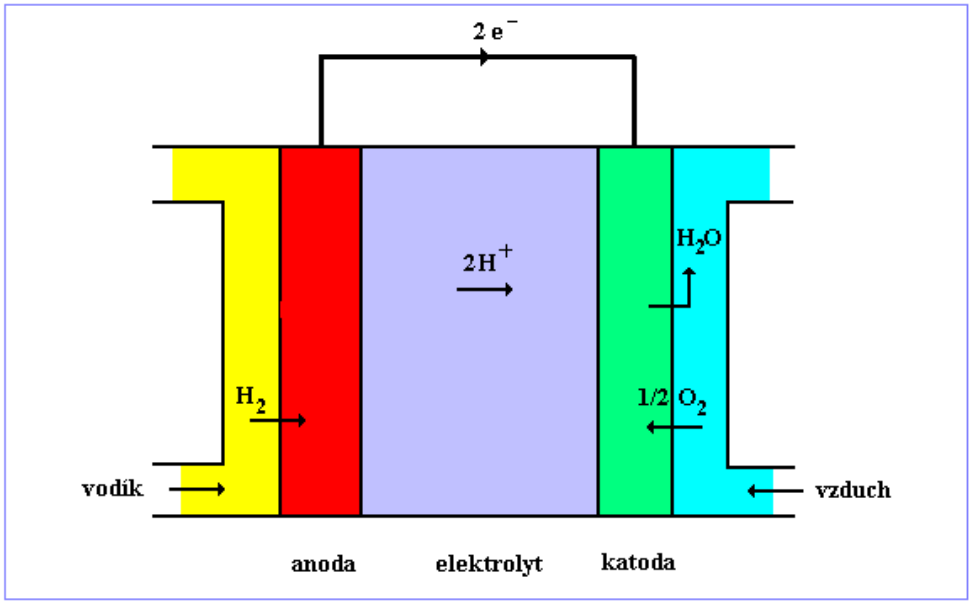
Palivový článek je zařízení k přímé přeměně chemické energie paliva na energii elektrickou se současným uvolňováním energie tepelné. Jedná se o kvalitativně zcela odlišný způsob výroby el. energie při porovnání s dosud používanými způsoby – chemickou energii paliva je nutno nejprve přeměnit na energii tepelnou, která se dále mění v tepelném cyklu na energii mechanickou a následně na energii elektrickou.Účinnost přeměny energie paliva na el. energii v palivovém článku je vyšší než u konvenčních kogeneračních zařízení protože není limitována účinností Carnotova tepelného cyklu.

Palivový článek je elektrochemický generátor pracující na bázi oxidačně – redukční reakce paliva a okysličovadla (proces inverzní k elektrolýze). Skládá se z porézních elektrod (anoda, katoda), elektrolytu a systému přívodu plynného paliva (obvykle vodík) a okysličovadla (kyslík, vzduch). Hlavní funkcí elektrod je oddělení prostoru elektrolytu od paliva a vzduchu a vytvoření tzv. třífázového rozhraní – elektroda, elektrolyt a reagenty vzniklé oxidací paliva a redukcí okysličovadla. Materiál a provedení porézních elektrod musí zajistit velkou reakční plochu, povrch elektrod je pokryt katalyzátorem podporující intenzitu reakce. Elektrody musí zajistit průchod plynu do elektrolytu ale současně musí být nesmáčivé aby zabránily průchodu elektrolytu do paliva a okysličovadla. Elektrolyt zajišťuje transport reaktantů a odvod produktů reakce (voda a oxid uhličitý).

Princip funkce palivového článku vodík – kyslík je patrný z obr.1. Vodík je přiváděn na anodu palivového článku, kyslík (vzduch) na katodu. Vodík je na anodě konvertován na elektron a kladný vodíkový iont, který je elektrolytem dopravován ke katodě. Elektrony jsou z anody vedeny na katodu jako využitelný elektrický proud, kde reagují s kyslíkem a kladnými vodíkovými ionty za vzniku vody. Voda částečně ředí elektrolyt a částečně je z palivového článku odváděna v kapalné i plynné formě společně s ostatními produkty reakce.

Na obr.1 je znázorněna funkce vodíkového palivového článku s nejjednodušími elektrochemickými reakcemi, pro jiné typy článků nemusí být palivem jen vodík, tomu také odpovídají složitější elektrochemické reakce na anodě i katodě.

OBR.1 - SCHEMA VODÍKOVÉHO PALIVOVÉHO ČLÁNKU



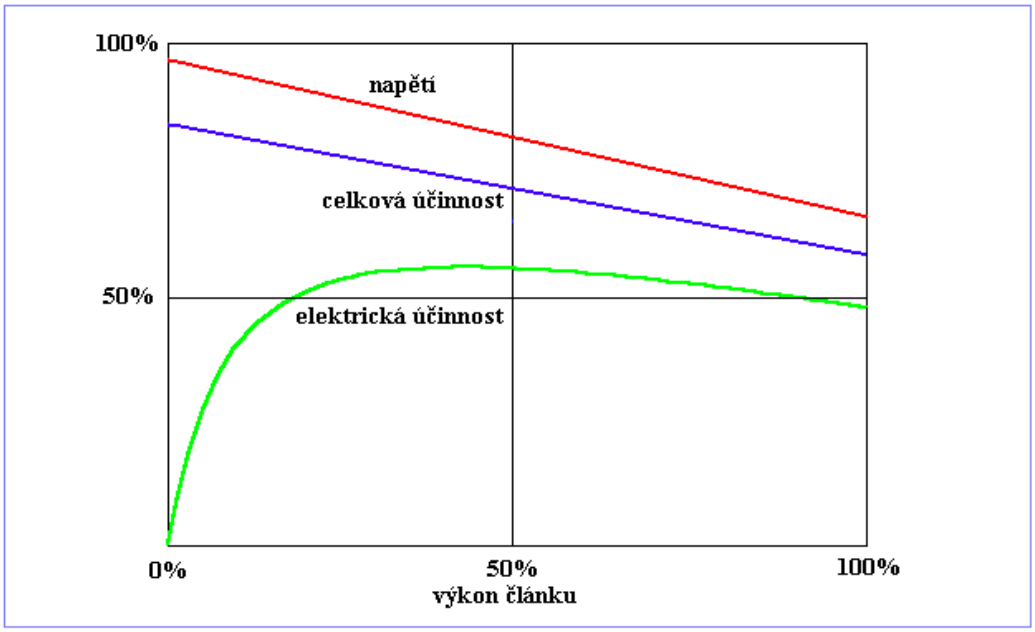
Palivový článek je zdrojem stejnosměrného proudu, teoretické maximální napětí jednoho článku se pohybuje podle typu článku v rozmezí cca 0,9 - 1,2 V, teoretická elektrická účinnost článku je cca 80%. Teoretických hodnot napětí a elektrické účinnosti však nemůže být dosaženo v důsledku nevratných ztrát, které jsou však konvertovány na využitelné teplo. Palivové články dosahují dle použitého elektrolytu a paliva za provozu reálné elektrické účinnosti v rozsahu cca 40 – 70% a napětí na jeden článek cca 0,6 - 0,7 V.

Pro praktické použití s dodávkou el. energie o vyšším využitelném napětí se proto palivové články řadí do baterií o stovkách až tisících článků, stejnosměrný proud je následně konvertován střídačem na proud střídavý.

Elektrická účinnost palivových článků (poměr el. výkonu k výkonu přiváděnému v palivu) je ovlivněna především plošnou proudovou hustotou tj. množstvím elektrického proudu generovaným na jednotkové ploše elektrod. Při vyšší proudové hustotě je účinnost nižší a naopak. Palivové články s vyšší proudovou hustotou a tedy s menší velikostí a hmotností jsou především využity při mobilních aplikacích, naopak ve stacionárních zdrojích energie jsou použity palivové články s nižší proudovou hustotou ale vyšší elektrickou účinností.

Tepelná účinnost palivového článku (poměr využitelného tepelného výkonu k výkonu přiváděnému v palivu) je závislá na typu a výkonu článku. Tepelná účinnost tvoří doplněk k elektrické účinnosti, celková účinnost článku (součet elektrického a tepelného výkonu k výkonu přiváděnému v palivu) se s rostoucím výkonem článku snižuje stejně jako napětí článku – viz závislost na obr.2 pro článek typu AFC.

OBR.2 - ELEKTRICKÁ A CELKOVÁ ÚČINNOST A NAPĚTÍ ČLÁNKU AFC



3.0 Druhy palivových článků, elektrolyty, provozní teploty, paliva, emise

Konstrukční provedení, materiál a způsob provozu palivového článku jsou určeny především druhem elektrolytu a tomu odpovídající provozní teplotou jejíž výše je pro využití palivového článku jako kogeneračního zdroje el. energie a tepla zcela zásadním určujícím hlediskem.

Dle provozní teploty se palivové články dělí na :

nízkoteplotní	60 – 130°C
středněteplotní	160 – 220°C
vysokoteplotní	600 – 1050°C

Dle druhu elektrolytu se palivové články dělí na články s :

1/ <u>alkalickým elektrolytem</u>

(AFC - Alkaline Fuel Cell)

elektrolytem je KOH

2/ <u>polymerickým elektrolytem</u>

(PEM - Polymer Electrolyte Membrane/Proton Exchange Membrane Fuel Cell)

elektrolytem je katexová iontoměničová membrána

3/ <u>kyselinou fosforečnou</u>

(PAFC - Phosphoric Acid Fuel Cell)

elektrolytem je 100% H_3PO_4

4/ <u>taveninou alkalických uhličitanů</u>

(MCFC - Molten Carbonate Fuel Cell)

elektrolytem je keramika z $LiAlO_2$ nasycená alkalickými uhličitany

5/ <u>pevným elektrolytem</u>

(SOFC – Solid Oxide Fuel Cell)

elektrolytem je kysličník kovu, obvykle Y_2O_3 nebo ZrO_2

Základní specifikace typů palivových článků

AFC

Vývoj tohoto typu nízkoteplotního článku se datuje od roku 1960, zpočátku byl využit pro kosmické aplikace, v současné době je jeho vývoj zaměřen převážně na použití pro pohon automobilů a lodí.

Podle koncentrace elektrolytu KOH jsou tyto články provozovány při teplotě :

85% KOH	provozní teplota cca 250°C
35 - 50% KOH	provozní teplota cca 80 - 120°C

Maximální teoretické napětí článku je 1,18 V.

Prakticky dosažitelná elektrická účinnost je cca 60%.

Palivem je vodík, okysličovadlem je vzduch, z kterého je nutno odstranit CO2 který by S KOH reagoval na K2CO3 a znehodnocoval elektrolyt.

Katalyzátorem je obvykle nikl, stříbro nebo jiné drahé kovy.

PEM

Jedná se o článek s pevným elektrolytem provozovaným však při nízké teplotě cca 80 – 120°C.

Maximální teoretické napětí článku je 1,17 V při teplotě 80°C.

Prakticky dosažitelná elektrická účinnost je cca 60%.

Palivem je vodík, okysličovadlem je vzduch. Jako katalyzátor na anodě i katodě vyžaduje tento typ článků platinu. V důsledku tohoto katalyzátoru musí koncentrace CO v přiváděném vzduchu dosahovat maximálně jednotek ppm.

PAFC

Provozní teplota těchto článků je vyšší, cca 150 – 220°C což umožňuje využití článků v kogenerační zdrojích s dodávkou tepla v teplé vodě nebo nízkotlaké páře.

Maximální teoretické napětí článku je 1,14 V při teplotě 205°C.

Prakticky dosažitelná elektrická účinnost je cca 45% (s respektováním spotřeby paliva na reformaci).

Palivem je vodík, okysličovadlem je vzduch. Katalyzátorem na anodě i katodě je rovněž platina. Z toho důvodu je nutno také limitovat koncentraci CO v přiváděném vzduchu jako u předchozího typu.

Konkrétní aplikace kogeneračních jednotek s těmito články používají jako palivo zemní plyn, palivovému článku PAFC je v tomto případě předřazen tzv. reformér konvertující zemní plyn na směs vodíku a oxidu uhličitého.

MCFC

Provozní teplota těchto článků dosahuje až cca 600 – 700°C což umožňuje využití článků v kogenerační zdrojích s dodávkou tepla ve vysokotlaké páře nebo lze zařadit za článek soustrojí s parní turbínou pro výrobu el. energie.

Maximální teoretické napětí článku je 1,03 V při teplotě 650°C.

Prakticky dosažitelná elektrická účinnost je cca 65%.

Palivem je kromě vodíku též oxid uhelnatý, okysličovadlem je vzduch. Katalyzátorem na anodě je nikl, na katodě oxid niklu, tyto levné katalyzátory jsou výhodou vůči předchozím typům článků. Naopak nevýhodou je velmi korozivní elektrolyt vyžadující konstrukci článku z nerezových materiálů.

V důsledku vysoké provozní teploty je možno reformér pro úpravu paliva koncipovat jako součást článku.

SOFC

Články vyvíjené již od konce padesátých let s nejvyšší provozní teplotou dosahující až 1100°C, která též umožňuje využití článků v kogenerační zdrojích s dodávkou tepla ve vysokotlaké páře nebo s výrobou el. energie pomocí parní turbíny.

Maximální teoretické napětí článku je 0,91 V při teplotě 1100°C.

Prakticky dosažitelná elektrická účinnost je cca 70%.

Palivem je také kromě vodíku též oxid uhelnatý a metan, okysličovadlem je vzduch. Katalyzátorem na anodě i katodě je tzv. perovskit (metatitanát vápenatý). V důsledku pevného elektrolytu jsou jednotlivé články koncipovány v různých geometrických tvarech (plošné desky, trubky monolit apod.).

V důsledku vysoké provozní teploty je reformér pro úpravu paliva také součástí článku.

Přehled elektrochemických reakcí v palivových článcích

Typ článku	Reakce na anodě	Reakce na katodě
AFC	$H_2 + 2(OH)^- \rightarrow 2H_2O + 2e^-$	$1/2O_2 + H_2O + 2e^- \rightarrow 2(OH)^-$
PEM	$H_2 \rightarrow 2H^+ + 2e^-$	$1/2O_2 + 2H^+ + 2e^- \rightarrow H_2O$
PAFC	$H_2 \rightarrow 2H^+ + 2e^-$	$1/2O_2 + 2H^+ + 2e^- \rightarrow H_2O$
MCFC	$H_2 + CO_3^{--} \rightarrow H_2O + CO_2 + 2e^-$ $CO + CO_3^{--} \rightarrow 2CO_2 + 2e^-$	$1/2O_2 + CO_2 + 2e^- \rightarrow CO_3^{--}$
SOFC	$H_2 + O^{--} \rightarrow H_2O + 2e^-$ $CO + O^{--} \rightarrow CO_2 + 2e^-$ $CH_4 + 4O^{--} \rightarrow 2H_2O + CO_2 + 8e^-$	$1/2O_2 + 2e^- \rightarrow O^{--}$

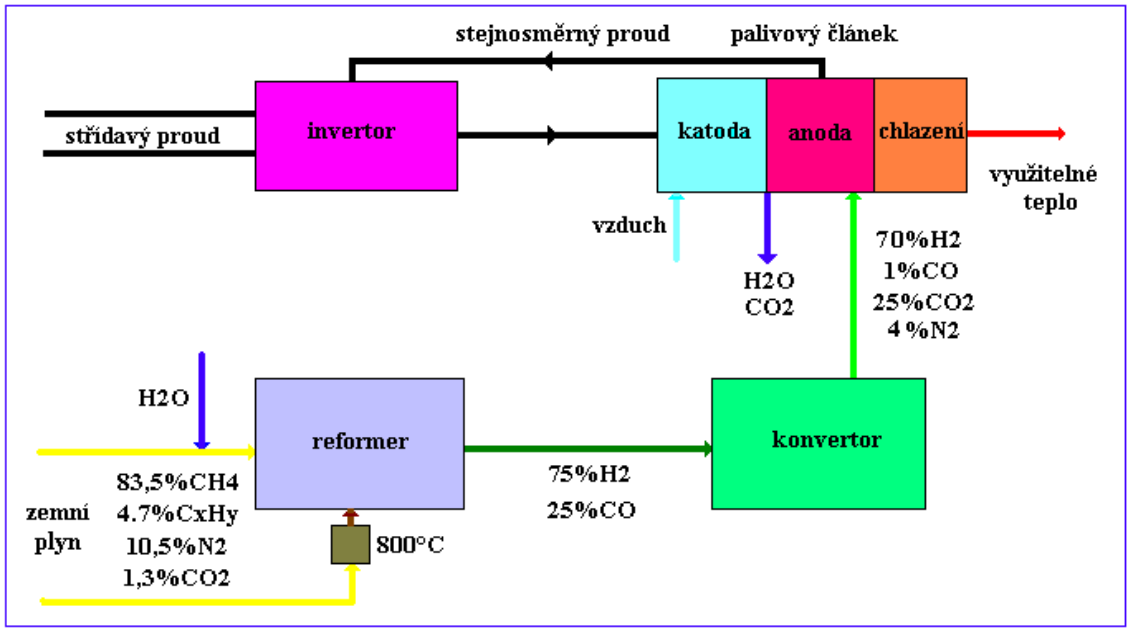
Paliva pro palivové články, jejich úprava a emise

Jak již bylo řečeno a je patrné z předchozí tabulky je základním palivem pro palivové články vodík. Ten je také většinou používán pro mobilní aplikace (palivové články AFC a PEM) z opakovaně plněného tlakového zásobníku.

Stacionární zdroje energie s palivovými články (palivové články PEM, PAFC, MCFC a SOFC) je však nutno upravit pro využití klasického plynného paliva – zemního plynu. To je zajištěno pomocí reforméru předřazeného palivovému článku, v kterém je zemní plyn reakcí s vodní parou (při teplotě cca 800°C) konvertován na tzv. syntézní plyn obsahující cca 75% vodíku a cca 25% oxidu uhelnatého, který následně reaguje s vodní parou na vodík a oxid uhličitý. Do palivového článku potom vstupuje plynná směs obsahující cca 70% vodíku, 25% oxidu uhličitého, 1% oxidu uhelnatého a 4% dusíku. (obr. 3).

Provoz reforméru vyžaduje tedy v případě PEM a PAFC článků s nižší teplotou reakce než je požadovaná teplota pro reformaci přívod dalšího množství zemního plynu pro udržení zmíněné endotermní reakce v reforméru.

OBR.3 - KOGENERACE S PALIVOVÝM ČLÁNKEM PAFC



V případě vysokoteplotních palivových článků (MCFC, SOFC) je jako paliva možno využít kromě zemního plynu též uhlí, biomasu nebo spalitelné odpady. Tato paliva je nutno ovšem nejdříve gasifikovat se současným odstraněním škodlivin, které by mohly poškodit palivové články. Úprava těchto paliv pro použití v případě článků MCFC a SOFC je zajištěna v důsledku vysokých provozních teplot reformací, která je koncipována společně s palivovým článkem přičemž pro udržení reakcí v reforméru je využito kalorického obsahu odpadních plynů z anody a katody. Reformace paliva u těchto dvou vysokoteplotních typů článků nevyžaduje tedy na rozdíl od PAFC přívod dalšího paliva.

Reformaci paliva pro palivové články lze provést dvěma způsoby, parní reformací a tzv. parciální oxidací. Zatímco parní reformace je vhodná pro úpravu zemního plynu, pro kapalná paliva je vhodnější parciální oxidace. Typické výsledné složení plynu po obou druzích reformace je uvedeno v následující tabulce (v molových procentech):

Složka	Parní reformace zemního plynu	Parciální oxidace oleje
H_2	52,9	48,0
CO	0,5	46,1
CO_2	13,1	4,3
CH_4	2,4	0,4
N_2	0,8	0,3
H_2O	30,4	0,9

V případě, že jako palivo pro palivové články má být užito uhlí je možno uhlí zplynit třemi způsoby - pomocí zplyňovače s tzv. sesuvným nebo fluidním ložem nebo tzv. hořákového zplyňovače.

Podíl hlavních složek ve výstupním plynu se podle výrobce zařízení a druhu uhlí pohybuje ve velmi širokém rozmezí jak je patrné z následující tabulky (%):

Složka	Rozsah podílu složky
H_2	16 – 34
CO	6 – 63
CO_2	2 – 16
CH_4	0,1 – 4,5
N_2	0,1 – 4,1
H_2O	2 – 62

Emise NOx a CO ve spalinách odcházejících ze zdrojů s palivovými články jsou v porovnání s plynovými kogeneračními jednotkami (které jediné se elektrickou účinností přibližují palivovým článkům) extrémně nízké – dosahují jen jednotek ppm. Kromě toho spaliny obsahují jen vodní páru a oxid uhličitý.

4.0 Provozovaná zařízení s palivovými články

Podrobnější popis současného stavu všech aplikací a předpokládaného vývoje palivových článků je mimo rámec této publikace, ta je proto zaměřena pouze na stručný popis aplikací palivových článků pro stacionární zdroje elektrické energie nebo kombinované zdroje tepla a elektrické energie.

V současné době je jednoznačně nejrozšířenější aplikací palivových článků ve stacionárních zdrojích energie kogenerační jednotka se střednědteplotním palivovým článkem typu PAFC o el. výkonu cca 200 kW a tepelném výkonu také cca 200 kW. Tato jednotka byla vyvinuta v International Fuel Cells Corporation a je vyráběna pod označením PC – 25 firmou ONSI Corporation (USA). Dosud bylo instalováno asi 200 kusů těchto jednotek (převážně v USA).

Palivem je zemní plyn, součástí kogenerační jednotky je proto kromě vlastního palivového článku ještě reformér do kterého je dodáván zemní plyn (viz obr.3). Dalšími součástmi této kompaktní jednotky je systém využití odpadního tepla pro jeho dodávku v teplé nebo horké vodě a invertor zajišťující přeměnu stejnosměrného el. proudu na proud střídavý. S respektováním popsané úpravy zemního plynu a účinností přeměny stejnosměrného proudu na proud střídavý je elektrická účinnost tohoto článku při provozu na jmenovitý výkon asi 40%, stejné hodnoty může dosáhnout i účinnost tepelná.

Rozměry celé kogenerační jednotky jsou 3 x 3 x 5 m, hmotnost 17 200 kg.
Velkou předností této kogenerační jednotky s palivovými články na bázi kyseliny fosforečné jsou extrémně nízké emise NOx (cca 2 mg/Nm3) a CO (cca 6 mg/Nm3) a velmi nízká hlučnost, cca 60 dB ve vzdálenosti 10 m.

Demonstrační kogenerační jednotky o výkonu 1 MW a 12 MW pracující s články PAFC na prakticky stejném principu byly během 90-tých let též instalovány japonskou firmou TEPCO.

Fa Ballard Generation Systems instalovala demonstrační kogenerační jednotku v roce 1997 pracující s palivovými články typu PEM a palivem zemním plynem o následujících parametrech :

- elektrický výkon	250 kW	
- tepelný výkon	240 kW	(teplá voda)
- elektrická účinnost	40%	
- tepelná účinnost	40%	
- rozměry	2,4 x 2,4 x 5,7 m	
- hmotnost	12 100 kg	

Provozní zkoušky této kogenerační jednotky mají být ukončeny v roce 2001, komerčně dostupná by jednotka měla být od roku 2002.

V současné době firma GE MicroGen v USA začíná budovat síť systémů s palivovými články typu PEM o el. výkonu až 35 kW. Od roku 2001 tato firma bude dodávat malé kogenerační jednotky s nízkoteplotními palivovými články typu PEM s označením GE HomeGen 7000 pro využití v domácnostech a rodinných domcích. Součástí těchto jednotek je kromě vlastního palivového článku též reformer, tyto jednotky lze tedy také provozovat přímo na zemní plyn nebo propan v místech bez dodávky zemního plynu. Parametry těchto jednotek budou následující :

- elektrický výkon	2 - 7 kW	
- tepelný výkon	2 - 11 kW	(teplá voda)
- elektrická účinnost	40%	(při 2 kW)
	29%	(při 7 kW)
- tepelná účinnost	35 – 46 %	
- rozměry	1,1 x 0,8 x 1,4 m	

Fa Energy Research Corporation (ERC) uvedla v roce 1996 do provozu demonstrační jednotku s palivovými články typu MCFC o el. výkonu 2 MW. S vnitřním reformací zemního plynu je dosahováno elektrické účinnosti až 49%.

Tato firma připravuje pro komerční využití kogenerační jednotky o parametrech :

elektrický výkon	2,8 MW	
tepelný výkon	1,2 MW	
elektrická účinnost	58%	(s vnitřní reformací zemního plynu)
tepelná účinnost	25%	

Fa ERC se též podílí společně s MTU Friedrichshafen (Daimler Benz) na komercializaci zatím demonstračního zdroje s palivovými články MCFC o elektrickém výkonu 300 kW, který má být vyráběn a převážně instalován v USA.

Konsorcium M-C Power Corporation instalovalo v roce 1997 demonstrační kogenerační jednotku v San Diegu (Kalifornie, USA) s články MCFC a externí reformací paliva o el. výkonu 250 kW, elektrické účinnosti 45% a dodávkou tepla v páře 0,8 MPa a 310°C.

Následně v roce 2001 je plánováno uvedení do provozu podobného kogeneračního zařízení s články MCFC v King County (Washington, USA) o elektrickém výkonu 1 MW, přičemž palivem mají být odpadní plyny z čistírny odpadních vod. Elektrická účinnost je předpokládána 52%.

Siemens Westinghouse Power Corporation provozuje dva zdroje na bázi palivových článků SOFC. Jeden o elektrickém výkonu 25 kW je testován v National Fuel Cell Research Center v Kalifornii, druhý o elektrickém výkonu 100 kW a tepelném výkonu 85 kW (horká voda 110°C) ve Westvoortu v Nizozemí. Elektrická účinnost tohoto většího zařízení je 45%, rozměry 2,8 x 3,6 x 8,4 m.

Mc Dermott Technology (Babcock Wilcox) vyvinul v roce 1994 malý demonstrační kogenerační zdroj s plochými palivovými články SOFC a interní reformací paliva o elektrickém výkonu 2 kW a dodávkou tepla v teplé vodě. Tento zdroj o velikosti chladničky může jako palivo používat jak zemní plyn tak kapalná paliva.

V České republice jsou palivové články vyvíjeny a vyráběny firmou ASTRIS s.r.o. Benešov, která je výzkumným a vývojovým pracovištěm pro svou mateřskou firmu stejného jména v Kanadě.

Předmětem zájmu této firmy jsou nízkoteplotní palivové články AFC (o elektrickém výkonu do 15 kW) a PEM (za spolupráce s výrobcem iontoměničových membrán, MEGA a.s., Stráž pod Ralskem). Firma Astris zatím vyrobila na zakázku několik kusů článků AFC o elektrickém výkonu až 4 kW pro výzkumné účely a připravuje seriovou výrobu těchto článků. Ke konci roku 2001 též firma předpokládá výrobu prvních prototypů PEM článků.

Aplikovaným výzkumem palivových článků se státní podporou se zabývá Výzkumné energetické centrum na VŠB – Technické universitě Ostrava s důrazem na použití palivových článků vyráběných firmou ASTRIS. Cílem je vývoj kogenerační jednotky o elektrickém výkonu 4 kW s palivovými články AFC (ASTRIS) provozované na zemní plyn – jednotka bude tedy obsahovat reformer a systém pro využití odpadního tepla.

5.0 Výhled využití palivových článků

Zatímco v současné době jsou z hlediska celkového instalovaného výkonu nejvíce provozované kogenerační systémy s palivovými články s kyselinou fosforečnou (PAFC) je vývoj v oblasti stacionárních zdrojů převážně soustředěn na zařízení pracující s palivovými články typu MCFC a SOFC o vyšších (řádově jednotky MW) a velmi vysokých výkonech (řádově až stovky MW). Tato zařízení jsou v důsledku vysoké provozní teploty obvykle komponována jako tzv. hybridní systémy. Hybridní systém je kombinací palivových článků se spalovací turbínou (bez spalovací komory) pohánějící generátor el. energie kde palivový článek nahrazuje spalovací komoru konvenční spalovací turbíny. Je evidentní, že pro tuto aplikaci je nutno instalovat tlakový palivový článek, ten má navíc v důsledku vyššího tlaku vyšší účinnost.

Hybridní systém s palivovými články je z hlediska snahy o dosažení co nejvyšší elektrické účinnosti tedy jakýmsi ekvivalentem konvenčního paroplynového cyklu složeného ze spalovací a parní turbíny.

Pro objasnění hlavních směrů v dalším vývoji je uveden stručný popis a schemata zapojení zařízení s palivovými články MCFC a SOFC.

Nízkotlaký systém s MCFC články pro zemní plyn

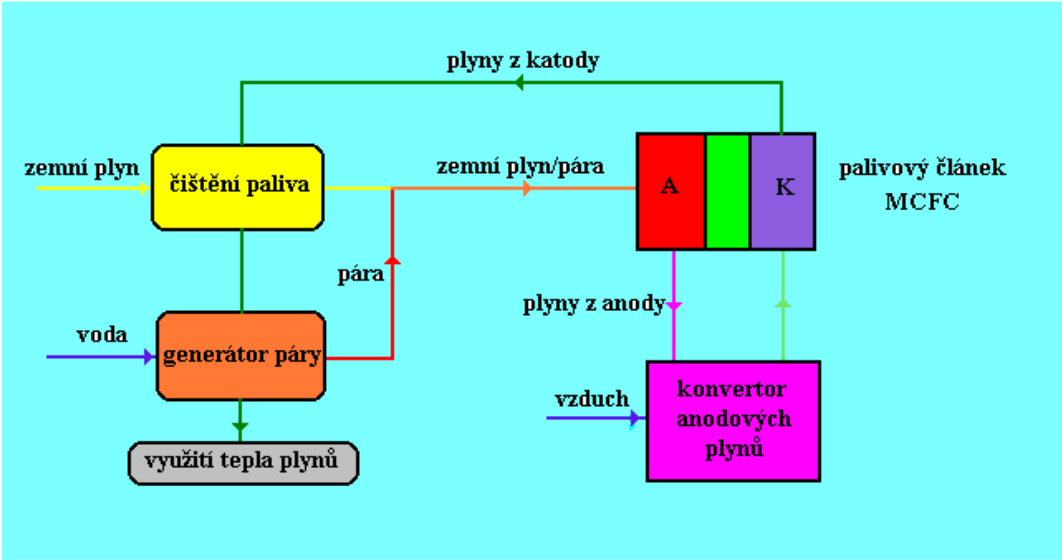
Je vyvíjen v Energy Research Cosporation (ERC) a má být dostupný po roce 2004. Systém má být dodáván v různých jmenovitých výkonech kolem hodnoty cca 3 MWe.

Schema zapojení systému je na obr.4. Zemní plyn je po vyčištění od stop síry mísen s vodní parou pro zajištění reformace zemního plynu (vnitřní reformace v palivovém článku). Vyčerpaná směs paliva proudící z anody je přiváděna do tzv. konvertoru anodových plynů společně se vzduchem, proud vzduchu bohatý na oxid uhličitý je přiváděn na katodu palivového článku.

Odpadní teplo plynů z katodové části palivových článků je využito nejen pro čištění plynu i výrobu páry ale i pro výrobu využitelného tepla - za generátorem páry mají plyny ještě teplotu více než 300°C – tím je možno zajistit kombinovanou výrobu el. energie a tepla.

Elektrická účinnost tohoto systému je kalkulována 58% a tepelná účinnost 20%. Takto specifikovaná tepelná účinnost je však vztažena jen na využití tepla pro čištění paliva a výrobu páry pro reformaci zemního plynu, při následném dalším využití tepla plynů se tepelná účinnost znatelně zvýší.

OBR.4 - KOGENERACE S ČLÁNKY MCFC S VNITŘNÍ REFORMACÍ



Vysokotlaký hybridní systém s články SOFC pro zemní plyn

Je vyvíjen společností Siemens Westinghouse, navržený elektrický výkon má být 4,5 MW. Pro dosažení vyššího napětí a účinnosti je systém navržen jako tlakový, to současně umožňuje koncipovat jej jako hybridní – obr.5.

Systém sestává ze dvou SOFC tlakových palivových článků, dvou spalovacích turbín z nichž jedna pohání vzduchový kompresor a druhá generátor el. energie, výměníku tepla a dvou odsiřovacích jednotek.

Zemní plyn je dodáván ve dvou tlakových úrovních, plyn o vyšším tlaku je po předehřevu odpadním teplem dodáván na anodu vysokotlakého (cca 0,9 MPa) palivového článku SOFC plyn o nižším tlaku podobným způsobem na anodu nízkotlakého článku SOFC (cca 0,3 MPa).

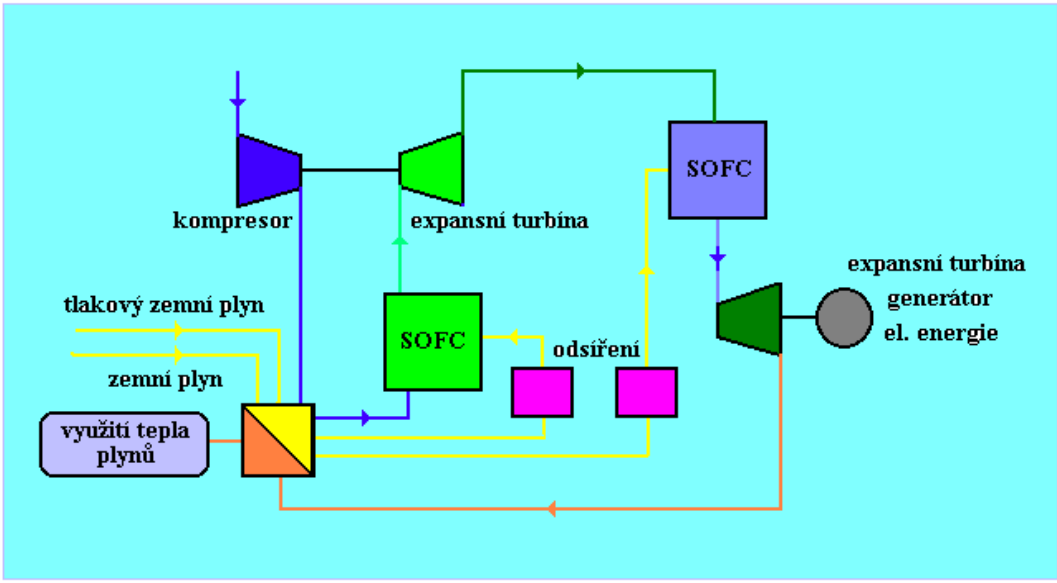
Tlakový vzduch z kompresoru je po předehřevu ve výměníku dodáván na katodu vysokotlakého článku, ve vysokotlakém článku probíhá interní reformace paliva. Odpadní plyny z tohoto článku (obsahují cca 15% kyslíku) po expanzi v první turbíně pohánějící kompresor slouží jako okysličovadlo pro druhý nízkotlaký článek

Odpadní plyny z druhého článku jsou (po využití části jejich entalpie v druhé turbíně pro výrobu el. energie) vedeny do rekuperátoru pro předehřev vzduchu a zemního plynu. Na výstupu z tohoto rekuperátoru mají plyny ještě teplotu cca 260°C tedy jsou využitelné pro dodávku dalšího tepla.

Na celkovém elektrickém výkonu systému 4,5 MW se palivové články podílí 3,1 MW a generátor poháněný druhou turbínou 1,4 MW. Elektrická účinnost celého systému je kalkulována 67% přičemž emise NOx by neměly být vyšší než 4 ppm !!

V uvedeném systému je použito expanzních plynových turbín bez spalovací komory ve spolupráci s tlakovými palivovými články, které tyto spalovací komory vlastně nahrazují.

OBR.5 - KOGENERACE S TLAKOVÝMI ČLÁNKY SOFC S VNITŘNÍ REFORMACÍ



Vrcholem v zatím předpokládaném vývoji palivových článků jsou dva dále popsané systémy jinak také označované jako „Vize 21“ („Vision for 21st Century“). První systém určený pro palivo zemní plyn dosahuje pomocí tzv. multi – článků extrémně vysoké elektrické účinnosti, druhý je koncipován pro výrobu el. energie z uhelného kalu pomocí kombinace palivových článků a zplyňování uhlí.

Hybridní systém s multi - články SOFC pro zemní plyn

Inovací v konstrukci palivových článků jsou stupňovité (mnohonásobné) články nebo tzv. multi – články vyvíjené v U.S.DOE.

Multi – článek má zajistit zjednodušení systémů koncipovaných s několika jednoduchými palivovými články zapojených v serii pro dosažení vyššího využití paliva. V takto koncipovaných systémech s navazujícími články je nutno použít výměníky pro zajištění optimální provozní teploty jednotlivých článků. Multi – článek je koncipován tak, že i bez použití výměníků pracuje v jednotlivých stupních v různých teplotách přičemž stupeň využití paliva v jednotlivých stupních článku se může značně lišit. Počet stupňů článku a využití paliva v jednotlivých stupních tak, aby z hlediska celého článku bylo dosaženo co nejpříznivější hodnoty se určuje pomocí optimalizačního postupu.

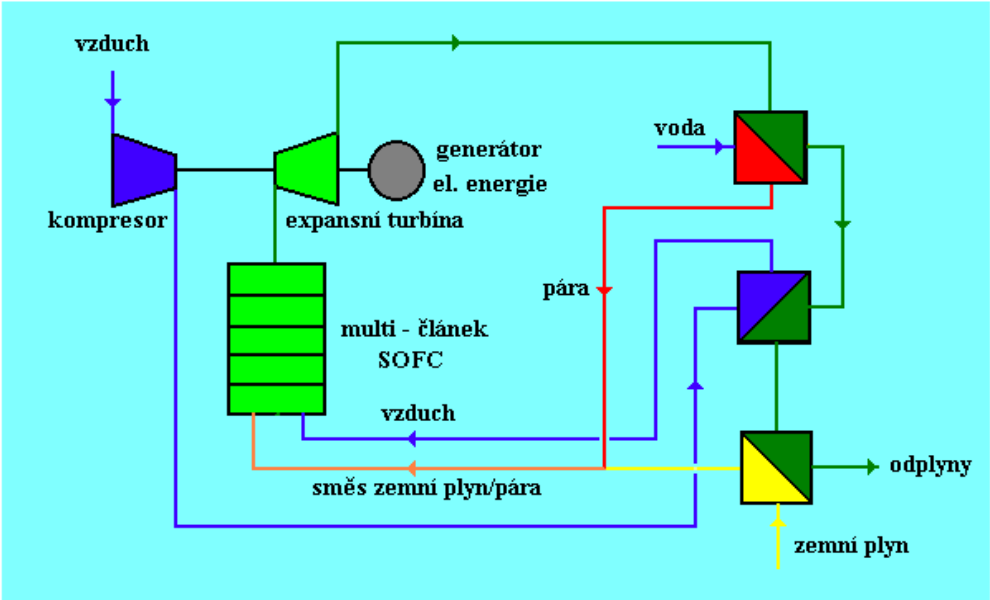
Pro ilustraci jsou v následující tabulce uvedeny hodnoty (%) týkající se 5–ti stupňového SOFC multi – článku.

Stupeň	**vstup paliva**	**výstup paliva**	**využití paliva ve stupni**	**využití paliva celkem**
1	100	81	19,0	19
2	81	62	23,5	38
3	62	43	30,6	57
4	43	24	44,2	76
5	24	6	75,0	94
celkem	100	6		**94**

Pro srovnání využití paliva (tzn. nejen na výrobu el. energie ale i tepla) v jednoduchém palivovém článku SOFC se obvykle pohybuje v rozsahu 75 – 85 %.

Systém s využitím multi – článku SOFC je navržen podle obr.6. Zemní plyn je předehřát a mísen s předehřátou vodou, přes odsiřovací stupeň je dodáván společně s tlakovým a předehřátým vzduchem do multi – článku. Odpadní plyny z článku jsou vedeny do expanzní turbíny pohánějící vzduchový kompresor a generátor el. energie. Teplota odpadních plynů na výstupu z posledního výměníku je cca 150°C, využití tohoto tepla je již tedy problematické. Uvedený systém je tedy navržen pouze pro monovýrobu elektrické energie, předpokládaná elektrická účinnost je extrémně vysoká, má dosahovat až 80% !!

OBR.6 - MULTI ČLÁNEK SOFC PRO VYSOKOU ELEKTRICKOU ÚČINNOST ("VIZE 21")



Vysokotlaký hybridní systém s články SOFC pro uhelné kaly

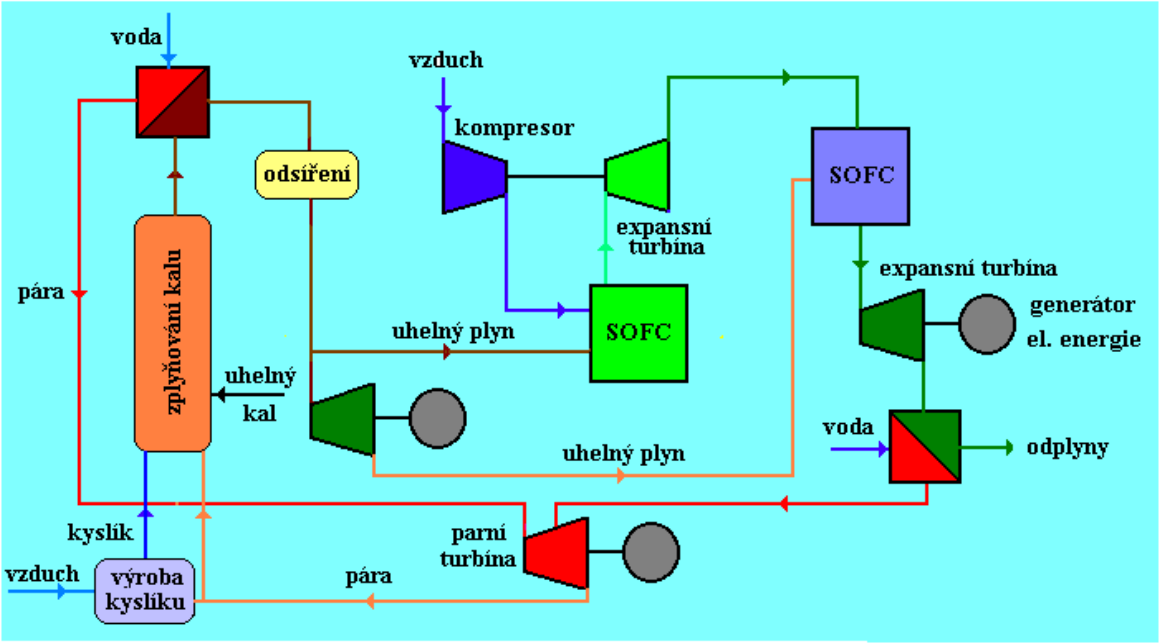
Systém je složitější variantou cyklu Siemens Westinghouse s články SOFC na obr.5. Sestává z hořákového zplynovače uhelného kalu fy Destec, dvou palivových článků SOFC (vysokotlakého a nízkotlakého), dvou expanzních plynových turbín (jedna pohání vzduchový kompresor a jedna generátor el. energie), jedné parní turbíny pro pohon generátoru el. energie, odsiřovacího zařízení a spalinového kotle (obr.7).

Uhelný kal je dodáván do tlakového zplynovače (1,5 MPa), teplo z ochlazení plynu je využito pro výrobu vysokotlaké páry. Surový plyn z uhelného kalu je po desulfurizaci veden jednak na anodu vysokotlakého palivového článku a jednak přes expander (pohánějící generátor el. energie) na anodu nízkotlakého článku. Entalpie odpadních plynů z prvního článku je v první expanzní plynové turbíně využita pro kompresi vzduchu, který je dodáván na katodu prvního článku. Plyny za turbínou o nízkém tlaku jsou vedeny na katodu druhého článku jako okysličovadlo. Odpadní plyny z tohoto článku jsou ještě využity pro výrobu el. energie pomocí druhé expanzní plynové turbíny a následně výrobu nízkotlaké páry. Nízkotlaká společně s vysokotlakou parou (z chladiče uhelného plynu) jsou využity pro výrobu další el. energie pomocí dvoutlakové parní turbíny.

Podobně jako u předchozího systému jsou jediným nevyužitým odpadním mediem odpadní plyny odcházející ze spalinového kotle o teplotě cca 130°C. Také tento systém je tedy koncipován pouze pro výrobu el. energie, celková účinnost je předpokládána cca 60%. Celkový elektrický výkon systému má být 563 MW přičemž podíl jednotlivých zařízení je následující :

palivové články	302 MW
expanzní plynová turbína	133 MW
parní turbína	118 MW
expander	10 MW

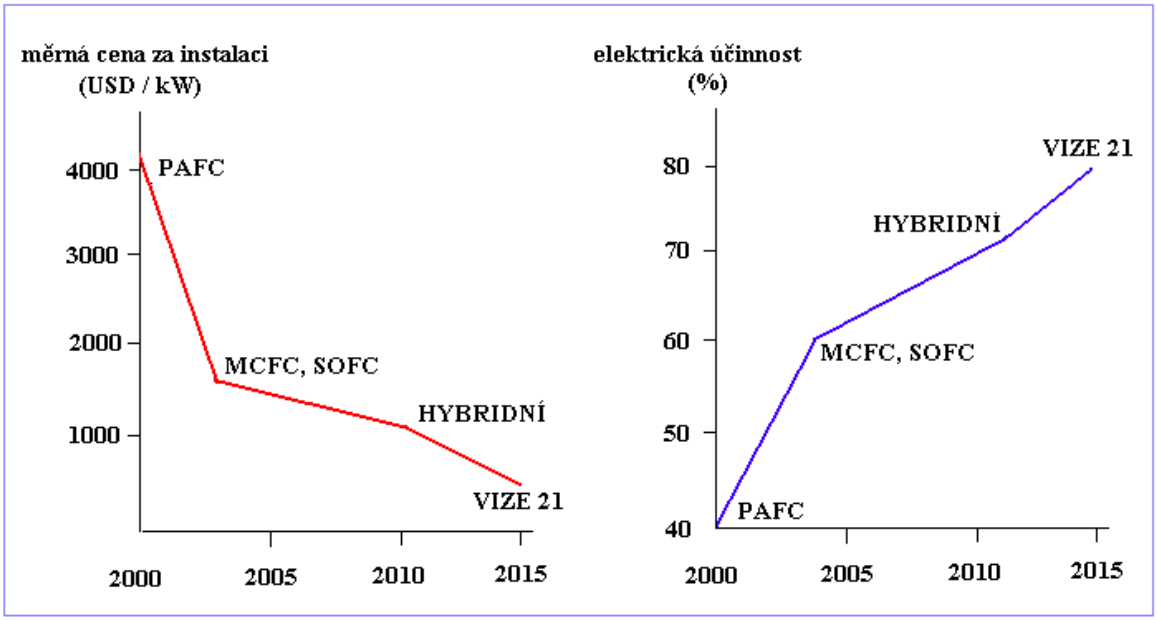
OBR.7 - TLAKOVÉ ČLÁNKY SOFC PRO VÝROBU EL. ENERGIE Z UHELNÉHO KALU ("VIZE 21")



6.0 Porovnání palivových článků s konvenčními způsoby výroby el. energie

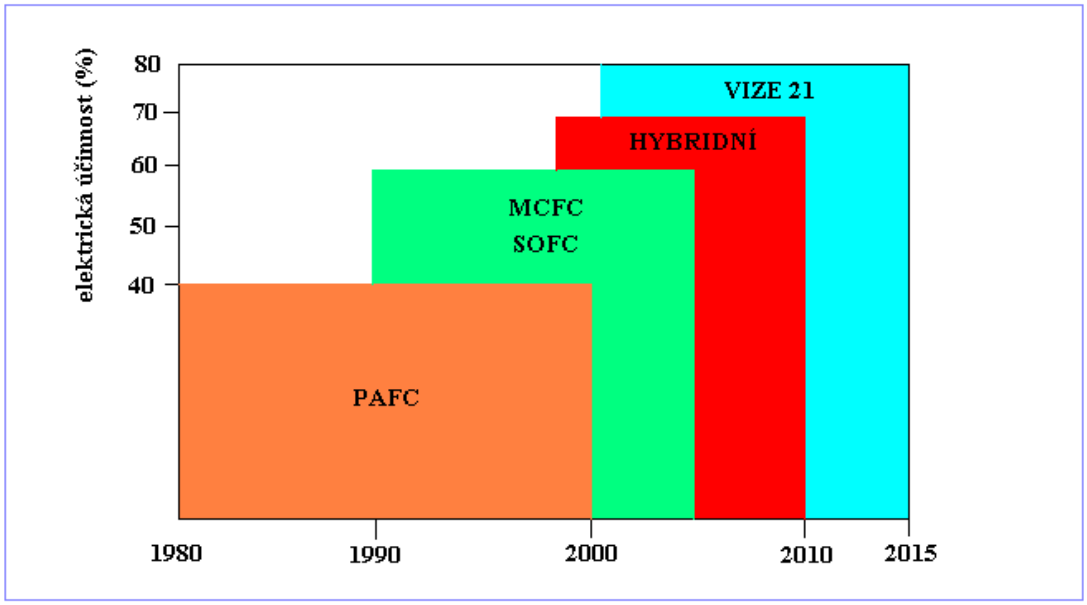
Předpokládaný vývoj měrné ceny (vztažené na instalovaný elektrický výkon) na instalaci zařízení pro výrobu elektrické energie s palivovými články různých typů a elektrické účinnosti, které tyto typy palivových článků jsou a budou schopné dosáhnout jsou uvedeny pro časové období let 2000 – 2015 na obr. 8.

OBR.8 - VÝVOJ CENY A ELEKTRICKÉ ÚČINNOSTI ZAŘÍZENÍ S PALIVOVÝMI ČLÁNKY



Pro doplnění je na obr.9 sumárně pro všechny typy palivových článků znázorněno období vývoje jednotlivých typů s maximálně dosažitelnou elektrickou účinností.

OBR.9 - VÝVOJ A ELEKTRICKÁ ÚČINNOST ZAŘÍZENÍ S PALIVOVÝMI ČLÁNKY

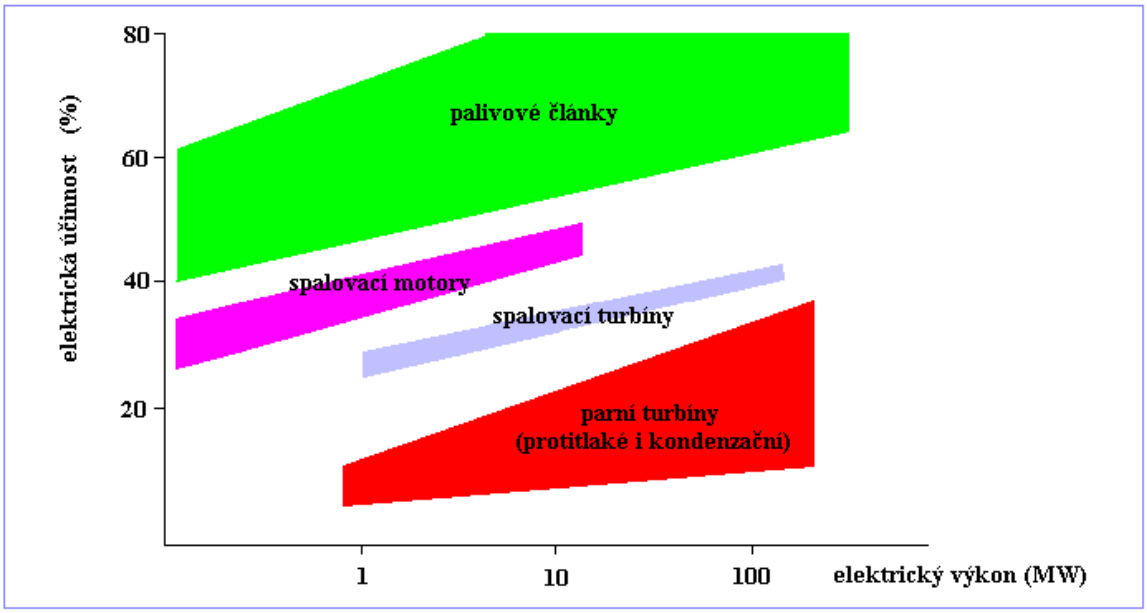


Porovnání provozních oblastí elektrického výkonu a dosažitelné elektrické účinnosti pro zařízení s palivovými články a pro stávající konvenční způsoby výroby elektrické energie (zařízení pohánějící generátor elektrické energie) je pro ilustraci uvedeno na obr. 10.

Přitom je třeba si uvědomit, že extrémní nárůst elektrické účinnosti zařízení s palivovými články nebude v blízké budoucnosti spojen s podstatně vyššími měrnými náklady na instalaci v porovnání se stávajícími způsoby výroby elektrické energie.

OBR.10

POROVNÁNÍ ELEKTRICKÉ ÚČINNOSTI PALIVOVÝCH ČLÁNKŮ A KONVENČNÍCH ZAŘÍZENÍ



V případě, že bude skutečně dosaženo měrných cen za instalaci palivových článků v období po roce 2015 cca 600 USD / kWe (viz obr.8) je možno již tuto hodnotu srovnávat s měrnými náklady stávajících zařízení, které se dle typu zařízení pohybují přibližně pro rozsah dodávaných elektrických výkonů v následujících úrovních (při kursu 40 Kč/USD):

druh konvenčního zařízení pro výrobu el. energie	**USD / kWe**
soustrojí s parní protitlakou nebo kondenzační turbínou	250 – 380
soustrojí se spalovací turbínou	500 – 625
soustrojí se spalovacím motorem	250 – 360

Uvedené srovnání je provedeno pro současné ceny konvenčních zařízení, které se v posledních letech mírně zvyšují, lze tedy s velkou pravděpodobností předpokládat, že v období po roce 2015 se ještě více přiblíží cenám palivových článků.

Protože zařízení s palivovými články jsou koncipována především jen pro výrobu el. energie je jejich cena srovnávána s cenou konvenčních zařízení, která jsou určena také jen pro výrobu jen el. energie (jen soustrojí bez využití odpadního tepla).

V případě že by při provozu zařízení s palivovými články bylo využito i odpadní teplo bylo by nutno cenu těchto zařízení srovnat s kompletními kogeneračními jednotkami se spalovacími motory nebo se spalovacími turbínami jejichž měrné ceny za instalaci by byly podstatně vyšší než jen soustrojí pro výrobu el. energie.

Pro porovnání ekonomie provozu zařízení s palivovými články a zařízení konvenčních je třeba kromě měrných investičních nákladů vzít do úvahy též podstatně vyšší elektrickou účinnost palivových článků proti konvenčním zařízením umožňující snížení spotřeby paliva a tomu odpovídající snížení provozních nákladů.

S přihlédnutím ke zvyšování tlaku na snížení emisí škodlivin při výrobě energie mají navíc palivové články s extrémně nízkými emisemi kysličníků dusíku a oxidu uhelnatého do budoucna naprosto jasnou převahu před stávajícími konvenčními zařízeními pro výrobu elektrické energie pracujícími na základě tepelných oběhů.