



## Implementation of hydrogen generation system with resonant converter

Salih Nacar<sup>1\*</sup>, Selim Öncü<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Bandırma Onyedi Eylül University, Engineering and Natural Science Faculty, Department of Electrical Engineering, 10200, Bandırma, Balıkesir, Turkey

<sup>2</sup>Karabük University, Engineering Faculty, Department of Electrical-Electronic Engineering, 78050, Karabük, Turkey

### Highlights:

- The power control of series resonant converter fed alkaline electrolyzer
- The load characteristics of electrolyzer and the effect of temperature are obtained by mathematical modeling and experimental study
- Hydrogen at different rates is produced from the electrolyzer whose power flow is controlled by the FM controlled converter

### Keywords:

- Resonant converter
- Hydrogen
- Electrolysis
- Soft switching
- Series resonant converter

### Article Info:

Research Article  
Received: 27.05.2021  
Accepted: 04.12.2021

### DOI:

10.17341/gazimmfd.943982

### Acknowledgement:

This research was supported by Karabük University Research Fund (KBUBAP-17-DR-264).

### Correspondence:

Author: Salih Nacar  
e-mail:  
snacar@bandirma.edu.tr  
phone: +90 266 606 3555

### Graphical/Tabular Abstract

Electrolysis is one of the production methods of hydrogen, environmentally friendly energy carrier. Electrolyzers used in hydrogen production systems have nonlinear electrical load characteristic. Pulse width modulation (PWM) switching and resonant DC-DC converters are used to achieve the power flow from the energy source to the electrolyzer in a controlled manner. Hard switching, which is the result of PWM switching, hinders high efficiency at high switching frequencies. High efficiency at high switching frequencies is possible with resonant switching converters where soft switching techniques can be applied. In this study, the hydrogen production system implemented with resonant converter fed alkaline electrolyzer is given Figure A.

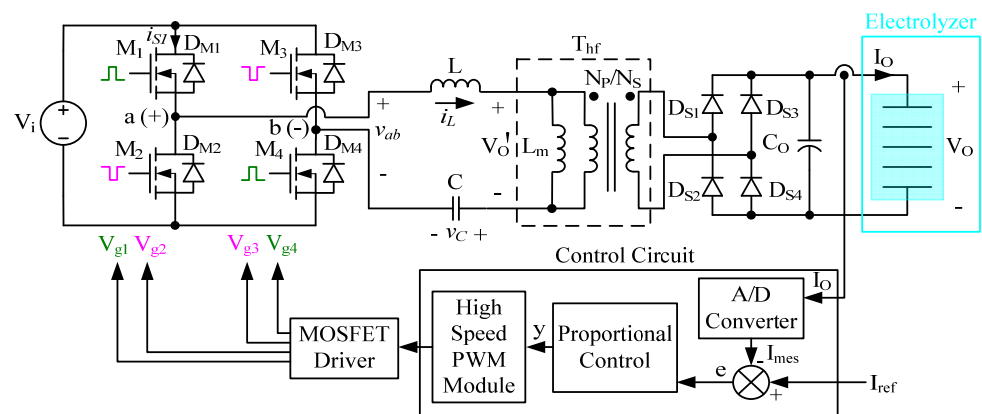


Figure A. The hydrogen production system

**Purpose:** To obtain the electrical load characteristic of alkaline electrolyzer that changes continuously with temperature for different operating conditions and to implement power control of the electrolyzer with the resonant converter to reduce the limitations of PWM switching at high switching frequencies.

### Theory and Methods:

Experimental setup consisting of alkaline electrolyzer, the converter and the control circuit was established. The electrical load characteristic of the electrolyzer was obtained for different electrolyte temperatures, constant operating voltage and constant operating current. The closed-loop control of the system was carried out by proportional control. The amount of hydrogen produced for different electrolyte temperatures (40°C and 50°C) and nominal operating current (10 A) were calculated and approximately measured. The calculation and measurement results were presented comparatively in tables.

### Results and Conclusion:

The current of electrolyzer must be controlled. The series resonant converter is suitable for applications with high input voltage and low output current, as the switching losses are reduced with decreasing the output current. In addition, the converter is simple in structure and easy to implement. For nominal operating current of electrolyzer, the efficiency and the switching frequency of the converter are 88% and 125 kHz, respectively. These efficiency and switching frequency values are higher than the efficiency and switching frequency value of insulated PWM converters realized for electrolysis applications. As a result of the calculations and measurements, it is observed that the energy, Faraday and cell efficiency of the electrolyzer are 80.05%, 74.47% and 59.61%, respectively. Moreover, these efficiency values increase with the increasing electrolyte temperature.



## Rezonans dönüştürücülü hidrojen üretim sisteminin gerçekleştirilmesi

Salih Nacar<sup>1\*</sup>, Selim Öncü<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Bandırma Onyedi Eylül Üniversitesi, Mühendislik ve Doğa Bilimleri Fakültesi, Elektrik Mühendisliği Bölümü, 10200, Bandırma, Balıkesir, Türkiye

<sup>2</sup>Karabük Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümü, 78050, Karabük, Türkiye

### Ö N E Ç I K A N L A R

- Seri rezonans dönüştürücü beslemeli elektrolizörün güç kontrolü
- Elektrolizörün yük karakteristiği ve sıcaklığın etkisi; matematiksel modelleme ve deneysel çalışma ile elde edilmiştir
- FM kontrollü dönüştürücü tarafından güç akışı kontrol edilen elektrolizörden farklı oranlarda hidrojen üretilmiştir

### Makale Bilgileri

Araştırma Makalesi

Geliş: 27.05.2021

Kabul: 04.12.2021

DOI:

10.17341/gazimmfd.943982

### Anahtar Kelimeler:

Rezonans dönüştürücü,  
hidrojen,  
elektroliz,  
yumuşak anahtarlama,  
seri rezonans dönüştürücü

### ÖZ

Bu çalışmada darbe genişlik modülasyonlu (DGM) anahtarlamanın yüksek anahtarlama frekanslarında çalışmaya getirmiş olduğu sınırlandırmaları azaltabilmek için rezonans dönüştürücülü alkali elektrolizör ile hidrojen üretim sistemi gerçekleştirilmiştir. Sistemin güç katında basit yapısı ve azalan çıkış akımı ile iletim ve anahtarlama kayıplarının azalmasından dolayı seri rezonans dönüştürücü (SRD) kullanılmıştır. SRD'nün rezonans frekansı üstü çalışma durumu için durum-düzlem yöntemi ile kararlı-durum karakteristiği elde edilmiştir. 400 W'lik dönüştürücünün tasarımı gerçekleştirilmiştir. Dönüştürücü, kontrol devresi ve alkali elektrolizörden oluşan sistem kurulmuştur. Dönüştürücünün güç anahtarları frekans modülasyon (FM) tekniği ile sürülmüş ve sıfır gerilim şartlarında iletime geçirilmiştir. DGM dönüştürücülerin aksine anahtar streslerini azaltmak için bastırma devrelerinin kullanılmasına gerek kalmadığı gibi 115 kHz üzerinde çalışarak yüksek verim elde edilmiştir. Elektrolizörün nominal çalışma akımı ve farklı elektrolit sıcaklıkları için üretilen hidrojen miktarları teorik olarak hesaplanmış ve yaklaşık olarak ölçülmüştür. Nominal çalışma akımı ve 50°C elektrolit sıcaklığı için hidrojen üretim değeri ile elektrolizörün enerji, Faraday ve hücre verim değerleri sunulmuştur.

## Implementation of hydrogen generation system with resonant converter

### H I G H L I G H T S

- The power control of series resonant converter fed alkaline electrolyzer
- The load characteristics of electrolyzer and the effect of temperature are obtained by mathematical modeling and experimental study
- Hydrogen at different rates is produced from the electrolyzer whose power flow is controlled by the FM controlled converter

### Article Info

Research Article

Received: 27.05.2021

Accepted: 04.12.2021

DOI:

10.17341/gazimmfd.943982

### Keywords:

Resonant converter,  
hydrogen,  
electrolysis,  
soft switching,  
series resonant converter

### ABSTRACT

In this study, hydrogen production system is implemented with resonant converter fed alkaline electrolyzer in order to reduce the limitations imposed by pulse width modulation (PWM) switching at high switching frequencies. The series resonant converter (SRC) is used in the power stage of the system due to its simple structure and decreasing conduction and switching losses with decreasing output current. The steady-state characteristic of SRC is obtained by the state-plane method for operating condition above the resonance frequency. The converter of 400 W is designed. The system consisting of the converter, the control circuit and alkaline electrolyzer is established. The power switches of the converter are driven with frequency modulation (FM) technique and switched on under zero voltage conditions. Unlike PWM converters, it is not necessary to use snubber circuits to reduce switch stresses and high efficiency is obtained by operating over 115 kHz. The amount of hydrogen produced for nominal operating current of electrolyzer and different electrolyte temperatures are calculated theoretically and measured approximately. Hydrogen production value and the energy, Faraday and cell efficiency values of the electrolyzer are presented for the nominal operating current and electrolyte temperature of 50°C.

## 1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

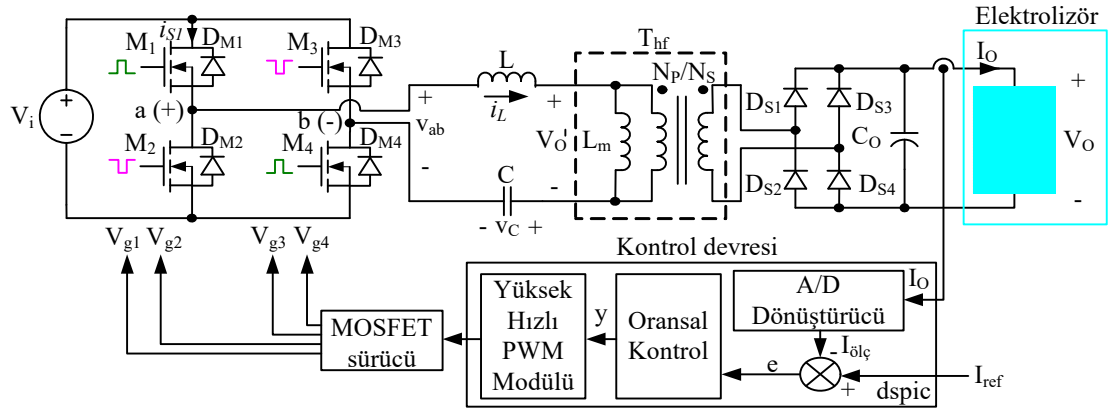
Elektroliz uygulamaları için gerçekleştirilen DGM dönüştürücülerin izolesiz ve izoleli yapıları bulunmaktadır. İzolesiz DGM dönüştürücüler arasında geleneksel alçaltıcı, yükseltici ve alçaltıcı-yükseltici tip dönüştürücüler [1, 4-7] olduğu gibi geleneksel alçaltıcı tip dönüştürücüdeki serbest geçiş diyotunun, iletim kayıplarını azaltmak amacıyla MOSFET ile yer değiştirildiği senkron alçaltıcı dönüştürücüler de bulunmaktadır [2, 3]. Elektroliz uygulamaları için izoleli DGM dönüştürücü olan push-pull'un kullanıldığı çalışmalarda [9, 10] çalışma frekansı 100 kHz seçilmiş ve verim %80 olarak elde edilmiştir. Bu uygulamalarda güç anahtarı olarak kullanılan IGBT'lerin gerilim streslerini azaltabilmek amacıyla her bir anahtar karşısına RC bastırma devreleri eklenmiştir. Böylece DGM anahtarlamasının sonucu olan sert anahtarlamadan kaynaklanan gerilim stresleri kayıplı bastırma devreleri ile önlenmeye çalışılmıştır. Gerçekleştirilen bu çalışmalarda [9, 10] bastırma devrelerinin kullanımı verimi etkilediği gibi maliyetin de artmasına sebep olmaktadır.

Elektroliz uygulamaları için gerçekleştiren rezonans dönüştürücü yapıları arasında da izolesiz ve izoleli dönüştürücüler bulunmaktadır [11-14]. İzolesiz olarak gerçekleştirilen rezonans anahtarlamalı dönüştürücü yapısı sıfır gerilim anahtarlamalı kısmi rezonans alçaltıcı tip dönüştürücüdür [14]. İzoleli olarak gerçekleştirilen rezonans anahtarlamalı dönüştürücü yapıları faz kaymalı (FK) sıfır gerilim anahtarlamalı (SGA) tam köprü [11], FM kontrollü seri rezonans [12] ve FK kontrollü LLC seri rezonans dönüştürücüdür [13]. FK kontrollü SGA tam köprü yapısında özellikle azalan yük akımı ile anahtarlardan bazılarının SGA şartları bozulmaktadır. Dahası azalan yük akımı ile bozulan SGA şartlarının giriş gerilim değerine de oldukça bağımlı olması bu dönüştürücü yapısının dar bir yük ve giriş gerilim aralığında çalışmasına neden olmaktadır. Bununla birlikte bu dönüştürücü önceden belirlenen giriş gerilim ve yük aralığında çalıştırıldığında anahtarların tamamı SGA şartlarında iletme geçmektedir [11]. Güç katında FM kontrollü SRD'nün kullanıldığı elektroliz sisteminde [12] SRD'nün tercih sebebi, doğal yapısı gereği akım kaynağı gibi davrandığından yüksek giriş gerilim ve düşük çıkış akım uygulamaları için uygun olmasıdır. Basit yapısı ile tasarımı ve analizi kolay olan SRD'de seri rezonans kondansatörü doğru akım bileşenleri bloke ettiği için yüksek frekans transformatörünün doyumu da önlenmektedir [15-17]. Ayrıca çalışmada [12] rezonans bobini olarak transformatörün kaçak endüktansı kullanılarak harici rezonans bobininin kullanımının önüne geçilmiştir. Kaçak endüktans değerinin istenen değerde elde edilmesinin zor olması kalite faktörünün seçimini sınırlandırmaktadır. Tasarımı gerçekleştirilen transformatörün kaçak endüktans değeri küçük olduğundan dönüştürücünün kalite faktörü de oldukça düşüktür. Dolayısıyla dönüştürücünün güç kontrolü için anahtarlama frekansı geniş bir aralıkta değiştirildiğinden artan anahtarlama frekansı ile anahtarlama kayıpları ve elektromanyetik girişimler de artmaktadır.

Bir diğer izoleli dönüştürücü yapısı olan FK kontrollü LLC seri rezonans dönüştürücü [13] esasında modifiyeli bir SRD'dür. Bu dönüştürücü daha geniş giriş gerilimi ve yük aralığı için SGA şartlarında çalışmakla birlikte mıknatıslanma endüktansının rezonans devresine dahil edilmesi ve mıknatıslanma endüktansı ile rezonans endüktansı arasında belirli oranların olması bu dönüştürücünün analizini ve tasarımını zorlaştırmaktadır. Ayrıca hangi dönüştürücü yapısı olursa olsun SGA çalışma; giriş gerilimindeki ve çıkış yükündeki değişimlere karşı bir yere kadar sürdürülebildiğinden çalışmada [13] LLC seri rezonans dönüştürücünün giriş gerilimi sıfır gerilim geçişli (SGG) yükseltici tip dönüştürücü ile belirli bir doğru gerilim değerine sabitlenmiştir. Böylece giriş gerilimindeki değişimlerden dolayı kaybolan SGA şartlarının önüne geçilmiştir. Ön kat olarak kullanılan SGG yükseltici tip dönüştürücü, sistemin karmaşıklığını ve maliyetini artırdığı gibi verimin de azalmasına neden olmaktadır.

Suyun elektrolizi; alkali, proton geçirgen membran ve katı oksit elektroliz yöntemleri ile gerçekleştirilmektedir [18, 19]. Bu yöntemlerden her birinin diğerlerine göre avantaj ve dezavantajları vardır. Bu çalışmada prototipi gerçekleştirilen sistemde en gelişmiş ve en basit elektroliz yöntemi olup ayrıca ticari olarak yüksek kapasitelerde hidrojen üretimi için uygun olan alkali elektroliz yöntemi tercih edilmiştir [20, 21]. Elektrolizörün sıcaklıkla değişen elektriksel yük karakteristiği matematiksel olarak modellenmiş ve deneysel çalışmalar ile elde edilmiştir. Böylece doğrusal olmayan elektriksel yük karakteristiğine, nominal çalışma akımına ve sıcaklığa sahip olan elektrolizörün güç kontrolünün gerçekleştirilmesi için karakteristik davranışı ortaya konulmuştur. Sistemin giriş gerilimi 200 V iken suyun elektrolizi için kullanılan ve 18 seri hücreden oluşan elektrolizörün nominal çalışma gerilimi/akımı 36 V/10 A'dir. Sistemin güç katında kullanılan dönüştürücü yapısının seçiminde giriş gerilim ve çıkış akım seviyesi dikkate alınarak yukarıda belirtilen avantajlarından dolayı FM kontrollü SRD yapısı kullanılmıştır.

Daha önce gerçekleştirilen çalışmadan [12] farklı olarak rezonans bobini haricen eklenerek kalite faktörünün belirlenmesinde herhangi bir sınırlandırmanın önüne geçilmiştir. Dönüştürücüde kalite faktörü yeterince yüksek seçilerek farklı oranlarda hidrojen üretiminin gerçekleştirilmesi için değiştirilmesi gereken anahtarlama frekansının değişim aralığı daraltılmıştır. Böylece rezonans frekansına yakın frekanslarda çalışılmış ve anahtarlama frekansı ile artan anahtarlama kayıpları ve elektromanyetik girişimler azaltılmıştır. Dönüştürücünün çalışma frekansı sağlamış olduğu avantajlardan dolayı rezonans frekansının üzerinde seçilmiştir [12]. Güç anahtarı olarak SGA şartlarında çalışma için daha uygun olan MOSFET kullanılmıştır. MOSFET'in iletme geçiş kayıpları, yalıtıma geçiş kayıplarına göre daha fazla olduğundan sıfır gerilimde iletme geçirilerek iletme geçiş kayıpları azaltılmıştır [12, 22].



Şekil 1. Hidrojen üretim sistemi (The hydrogen production system)

## 2. REZONANS DÖNÜŞTÜRÜCÜ BESLEMELİ ALKALİ ELEKTROLİZÖR (RESONANT CONVERTER FED ALKALINE ELECTROLYZER)

### 2.1. Tam Köprü Seri Rezonans Dönüştürücü (The Full-Bridge Series Resonant Converter)

Şekil 1’de rezonans dönüştürücü beslemeli alkali elektrolizörlü hidrojen üretim sisteminin devre yapısı verilmiştir. Sistemin güç katı olan izoleli tam köprü SRD; anahtarlama, rezonans ve doğrultma devresi olmak üzere üç bölümden oluşmaktadır. Anahtarlama devresi, %50 görev oranı ile  $M_{1-4}$  ve  $M_{2-3}$  MOSFET’lerinin dönüşümlü olarak sürüldüğü tam köprü devresidir. Bu anahtarlama işlemi sonucunda tam köprü devresinin a ve b terminallerinden tepe değeri giriş gerilimi  $V_i$  olan ve rezonans devresini besleyen kare dalga evirici gerilimi  $v_{ab}$  elde edilir.

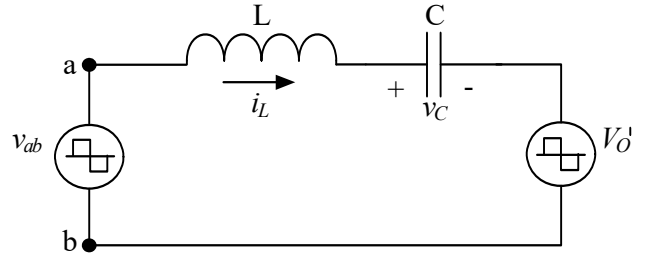
Rezonans devresi; dönüştürme oranı  $n$  ( $N_p/N_s$ ) olan yüksek frekans transformatörünün ( $T_{hf}$ ) mıknatıslanma endüktansı  $L_m$ , transformatörün kaçak endüktansını ve haricen eklenen endüktansı ( $L_r$ ) içeren rezonans bobini  $L$  ve rezonans kondansatörü  $C$ ’den oluşmaktadır. Doğrultma devresi ise yüksek frekans tam dalga doğrultucudan ve filtre kondansatörü  $C_o$ ’dan oluşmaktadır.

#### 2.1.1. Dönüştürücü eş değer devresi (The equivalent circuit of converter)

SRD’nün analizini gerçekleştirmek amacıyla aşağıda verilen varsayımlar kabul edilmiştir [23, 24].

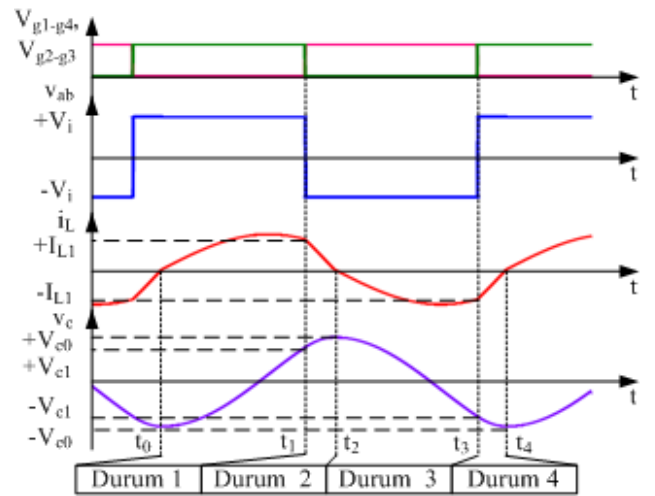
- Devre kararlı durum koşullarında çalışmaktadır.
- Çıkış filtre kondansatörü sabit gerilim için yeterince büyüktür.
- Tüm devre elemanları idealdir.
- Mıknatıslanma endüktansı  $L_m$ , rezonans endüktansı  $L$ ’den çok daha büyük olduğu için  $L_m$ ’nin rezonans frekansı  $f_r$ ’e olan etkisi göz ardı edilmiştir.
- Sekonder devresi primer tarafa kare dalga gerilim kaynağı  $V_o'$  ( $nV_o$ ) olarak aktarılmıştır.

Bu kabuller sonucunda elde edilen basitleştirilmiş eş değer devre Şekil 2’de verildiği gibidir.



Şekil 2. Dönüştürücünün eş değer devresi (The equivalent circuit of converter)

Dönüştürücünün rezonans frekansı üstü çalışma durumu için dört farklı çalışma aralığı ortaya çıkmaktadır. Bu çalışma aralıkları için güç anahtarlarının kontrol sinyalleri  $V_{g1-g4}$  ve  $V_{g2-g3}$ ’ün, evirici gerilimi  $v_{ab}$ ’nin, rezonans kondansatör gerilimi  $v_c$ ’nin ve rezonans akımı  $i_L$ ’nin dalga şekilleri Şekil 3’de verilmiştir [23].



Şekil 3. Dönüştürücünün rezonans frekansı üstü çalışma durumu için dalga şekilleri (The waveforms of converter working above resonance frequency)

Dönüştürücü dört farklı çalışma aralığı için seri LC eş değer devre yapısını korumakla birlikte güç anahtarlarının kontrol sinyallerine göre evirici geriliminin ( $v_{ab}$ ) ve  $V_{O'}$ 'nün polariteleri değişmektedir.

### 2.1.2 Dönüştürücü devre analizi (The circuit analysis of converter)

Dönüştürücünün rezonans akımının pozitif yarım periyodu, negatif yarım periyodun simetriğidir. Bu nedenle dönüştürücünün devre analizi yalnızca rezonans akımının pozitif olduğu Durum 1 ve Durum 2 için gerçekleştirilebilir [23, 24]. Dönüştürücünün analizinde kullanılmak üzere rezonans elemanlarına ve durumların çalışma aralıklarına bağlı olarak aşağıdaki eşitlikler verilmiştir (Eş. 1-Eş. 8).

$$Z_n = \sqrt{\frac{L}{C}} \quad (1)$$

$$\omega_r = \frac{1}{\sqrt{LC}} \quad (2)$$

$$\Delta t_1 = t_1 - t_0 = \frac{\theta}{\omega_r} \quad (3)$$

$$\Delta t_2 = t_2 - t_1 = \frac{\gamma}{\omega_r} \quad (4)$$

Bu eşitliklerde  $Z_n$  ve  $\omega_r$  sırasıyla karakteristik empedans ve açısal rezonans frekansıdır. Eş. 3 ve Eş. 4 Durum 1 ve Durum 2'nin zaman aralığıdır. Durum 1 ve Durum 2 için Şekil 3'deki başlangıç değerleri göz önüne alınarak çözümleri elde edilen  $v_C$ ,  $V_i$  ile  $i_L$ ,  $V_i/Z_n$  ile normalize edilmiş ve son değerleri Eş. 5'den Eş. 8'e kadar verilmiştir.

$$V_{C1N} = 1 - M - (1 - M + q_{C0})\cos(\theta) \quad (5)$$

$$I_{L1N} = (1 - M + q_{C0})\sin(\theta) \quad (6)$$

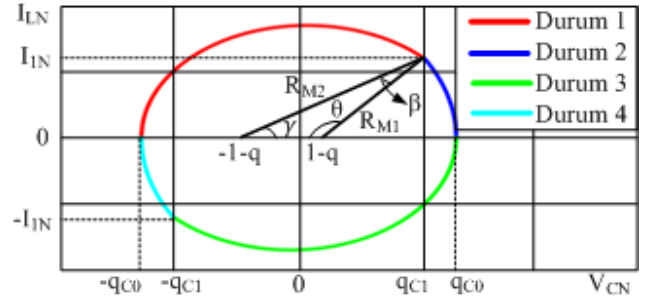
$$V_{C2N} = -1 - M + (1 + M + q_{C1})\cos(\gamma) + I_{L1N}\sin(\gamma) \quad (7)$$

$$I_{L2N} = -(1 + M + q_{C1})\sin(\gamma) + I_{L1N}\cos(\gamma) \quad (8)$$

Rezonans kondansatör geriliminin ve rezonans akımının normalize edilmiş eşitliklerindeki  $M$ ,  $V_{O'}$ 'nün normalize hali iken aynı zamanda dönüştürücünün doğru gerilim kazancıdır.  $q_C$ , kondansatör geriliminin normalize değeridir. Eş. 5 ve Eş. 6 kullanılarak Durum 1'in ayrıca Eş. 7 ve Eş. 8 kullanılarak Durum 2'nin durum-düzlem eşitlikleri elde edilebilir. Bir anahtarlama periyodu için dönüştürücünün durum-düzlem eğrileri Şekil 4'de verildiği gibidir.

Dönüştürücünün anahtarlama periyodunun yarısı için primer tarafa aktarılmış olan çıkış akımının ortalaması  $I_{O'}$ , rezonans kondansatörünün şarj yükü  $Q_C$ 'ye eşittir.  $Q_C$  rezonans kondansatörü uçlarında bir alternatif gerilime neden olduğundan ayrıca rezonans kondansatör geriliminin genliği ve çıkış akımı arasında da yakın bir ilişki vardır. Bu ilişkiler Eş. 9 ve Eş. 10'da verilmiştir.

$$Q_C = 2CV_{C0} = \int_0^{T_s/2} i_L(t)dt \quad (9)$$



Şekil 4. Dönüştürücünün durum-düzlem eğrileri (The state-plane curves of converter)

$$I_{O'} = \frac{2}{T_s} \int_0^{T_s/2} i_L(t)dt \quad (10)$$

Çıkış akımının kondansatör şarj yükü ile olan bağlantısı kullanılır ve durum-düzlem eğrisindeki üçgenin  $\beta$  açısı için kosinüs yasası uygulanırsa dönüştürücünün doğru gerilim kazanç denklemi Eş. 11'de verildiği gibi bulunur. Eş. 11'deki  $\rho$  normalize frekanstır ve  $\pi/f_n$ 'e eşittir.  $f_n$  ise frekans orandır ve  $f_s/f_r$ 'e eşittir.

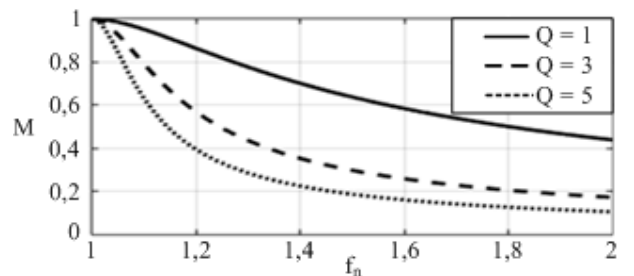
$$M = \frac{\sqrt{1 - \left(\frac{I_{ON}\rho}{2} + 1\right)^2 \cos^2\left(\frac{\rho}{2}\right)}}{\sin^2\left(\frac{\rho}{2}\right)} \quad (11)$$

Eş. 12'de verilen dönüştürücünün normalize yük parametresi  $Q$ 'nun dönüştürme oranına dahil edildiği eşitlik Eş. 13'de verilmiştir [24].

$$Q = \frac{I_{ON}}{M} = \frac{Z_n}{n^2 R_O} \quad (12)$$

$$M = \frac{\frac{Q\rho}{2}}{\tan^2\left(\frac{\rho}{2}\right) + \left(\frac{Q\rho}{2}\right)^2} \left[ -1 + \sqrt{1 + \frac{\left(1 - \cos^2\left(\frac{\rho}{2}\right)\right)\left(\tan^2\left(\frac{\rho}{2}\right) + \left(\frac{Q\rho}{2}\right)^2\right)}{\left(\frac{Q\rho}{2}\right)^2 \cos^2\left(\frac{\rho}{2}\right)}} \right] \quad (13)$$

Şekil 5'de farklı  $Q$  değerleri için dönüştürücünün doğru gerilim kazancına göre frekans oranı eğrileri verilmiştir.



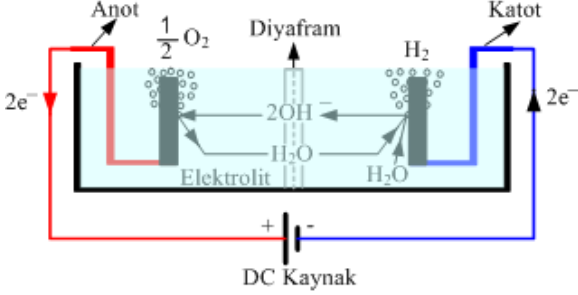
Şekil 5. Durum-düzlem kontrol karakteristiği (The state-plane control characteristics)

Şekil 5'den görüldüğü üzere dönüştürücü akım kaynağı gibi davranmakta, artan  $Q$  değeri ile birlikte doğru gerilim kazancı azalır iken tersi durumda artmaktadır.



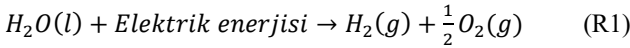
## 2.2. Alkali Elektroliz (Alkaline Electrolysis)

Çalışma prensibi Şekil 6'da verilen alkali elektrolizde doğru akım kimyasal tepkimenin başlaması için zorlayıcı güçtür. Elektrolit olarak genellikle potasyum hidroksit (KOH) sulu çözeltisi kullanılır iken çözeltinin derişim oranı %25 ile %30 aralığında seçilmektedir [25].

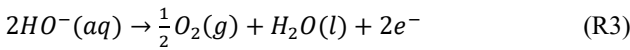
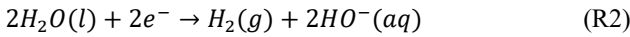


**Şekil 6.** Alkali elektrolizin çalışma prensibi  
(The working principle of alkaline electrolysis)

Alkali elektroliz işleminin toplam elektrokimyasal tepkime ifadesi Eş. R1'de verildiği gibidir. Doğru akımın elektrolite uygulanması ile elektroliz hücresinde katottan anoda doğru elektron akışı başlamaktadır.



Eş. R2'de verilen katot tepkimesine göre; katot elektrotundaki su, hidrojeni oluşturmak için parçalanmakta aynı zamanda hidroksit iyonları serbest kalmaktadır. Serbest kalan hidroksit iyonları diyaframdan geçerek oksijeni oluşturmak için tekrar anotta birleşmektedirler. Anot tepkimesi Eş. R3'de verilmiştir [25-27].



Elektroliz için gerekli olan enerji seviyesini belirlemek amacıyla Eş. 14'de verilen termodinamiğin birinci yasası "enerjinin korunumu"ndan faydalanılır [26-28].

$$\Delta G = \Delta H - T\Delta S \quad (14)$$

Elektroliz için gerekli olan gerilim değerini belirleyebilmek amacıyla Eş. 14'deki Gibbs enerji değişimi ( $\Delta G$ ) ile elektroliz hücre gerilimini ilişkilendiren ifade Eş. 15'de verilmiştir.

$$V_{rev} = \frac{\Delta G}{Fz} \quad (15)$$

Sistem kayıpsız bir şekilde çalıştığında elektroliz işleminin gerçekleşebilmesi için sisteme Eş. 15'deki tersinir gerilimden ( $V_{rev}$ ) daha büyük bir gerilim uygulanmalıdır. Eş. 14'deki parametrelerin değerleri 1 atm ve 25°C için dikkate alındığında  $V_{rev}$ 'in değeri 1,23 V'dur. Ancak elektroliz

hücresine ısı verilmediği dolayısıyla bütün enerjinin elektrik enerjisi ile sağlandığı bir sistemde hücre potansiyeline termo-nötral gerilim ( $V_{tn}$ ) denilmektedir.  $V_{tn}$  sisteme ısı verilmediği için  $\Delta S=0$  kabul edilerek Eş. 16 ile 1,481 V olarak bulunur.

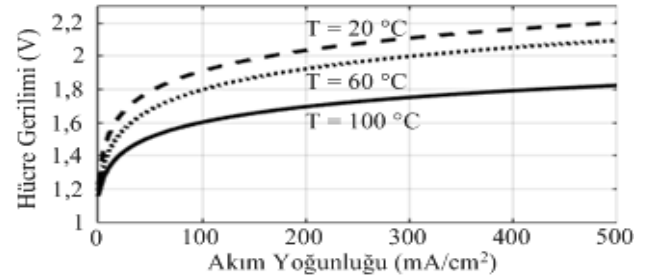
$$V_{tn} = \frac{\Delta H}{Fz} \quad (16)$$

Gerçek uygulamalarda elektrot ve elektrolitten kaynaklı direnç kayıplarının ayrıca hidrojen ve oksijen aşırı gerilimlerinin olmasından dolayı hücre başına uygulanması gereken gerilim  $V_{tn}$ 'den daha büyüktür [18, 29, 30].

Elektroliz Hücresinin akım-gerilim eğrilerinin modellenmesinde deneysel olarak elde edilen eğriler kullanılmaktadır. Bu eğriler elektrot akım yoğunluğuna göre hücre gerilimidir. Bu eğrilerin elde edilmesinde basınç, elektrotlar arası mesafe ve derişim oranı sabit kabul edilirken asıl etken olarak elektrolitin sıcaklığı kabul edilmektedir. Eğrilerin elde edilmesinde kullanılan ifade Eş. 17'de verilmiştir [31, 32]. Eş. 17'deki T, elektrolitin santigrat derece cinsinden sıcaklık değeridir.

$$V_h = V_{rev} + \frac{r_1+r_2T}{A}I_e + (s_1 + s_2T + s_3T^2)\log\left(\frac{u_1+\frac{u_2}{T}+\frac{u_3}{T^2}}{A}I_e + 1\right) \quad (17)$$

Eş. 17 ile farklı sıcaklık değerleri için bir hücrenin akım yoğunluğuna göre gerilim eğrileri çizdirilmiş ve Şekil 7'de verilmiştir. Şekil 7'de görüldüğü üzere sıcaklık artışı ile elektrolizörün elektriksel iletkenliği artmakta ve hücre gerilimi düşmektedir.



**Şekil 7.** Elektroliz hücresinin farklı sıcaklık değerleri için akım yoğunluğuna göre gerilim eğrileri  
(The curves of current density versus voltage at the different temperature values of electrolysis cell)

Alkali elektrolizörün hücre enerji verimi ( $\eta_V$ ) %62 ile %82 arasında değişmekte [18, 21] ve Eş. 18 ile hesaplanabilmektedir. Eş. 18'deki  $V_h$  hücre gerilimidir [26]. Eş. 18'den enerji verimliliğinin azalan hücre gerilimi ile artışı anlaşılmaktadır.

$$\eta_V = \frac{V_{tn}}{V_h} \quad (18)$$

Alkali elektrolizörün hücre verimi ( $\eta_E$ ) %50 ile %71 aralığında değişir [30, 32, 33] iken belirlenmesinde kullanılan ifade Eş. 19'da verilmiştir [34].

$$\eta_E = \eta_V \eta_F \quad (19)$$

Eş. 19'daki  $\eta_F$ , Faraday verimidir ve Eş. 20 ile elde edilmektedir.

$$\eta_F = \frac{F_{H_2M}}{F_{H_2C}} \quad (20)$$

Eş. 20'deki  $F_{H_2M(kg/h)}$  elektrolizör tarafından üretilen hidrojenin akış miktarı iken  $F_{H_2C(kg/h)}$  teorik hesaplama sonucu elde edilen hidrojenin akış miktarıdır. Hidrojen üretiminde kullanılan elektrolizörün enerji ve Faraday verimi, deneysel çalışmalar sonucunda tespit edilen  $V_h$  ve  $F_{H_2M}$ 'nin sıra ile Eş. 18 ve Eş. 20'de kullanılması ile elde edilmiştir. Elektrolizör hücre verimi; enerji ve Faraday veriminin Eş. 19'da kullanılması ile bulunmuştur.

### 3. DENEYSEL ÇALIŞMALAR (THE EXPERIMENTAL STUDIES)

Deneysel çalışma düzeneğinin görünümü Şekil 8'de verilmiştir. Dönüştürücünün giriş gerilimi, ayarlı alternatif geriliminin doğrultulması ile elde edilmiştir.

Dönüştürücünün tasarımı dönüştürme oranının bir olduğu rezonans frekansına ve alkali elektrolizörün nominal çalışma gerilimi 36 V'a göre gerçekleştirilmiştir. Tasarımda kayıplar göz önüne alınarak dönüştürücünün verimi ( $\eta$ ) %90 ve dönüştürücünün doğru gerilim kazancı (M) 0,9 kabul edilmiştir. Bu kabuller sonucunda tasarımı gerçekleştirilen dönüştürücünün parametreleri Tablo 1'de verilmiştir.

Yüksek frekans transformatorünün ( $T_{hf}$ ) ve haricen eklenen rezonans bobininin ( $L_r$ ) imalatında 3C90 ETD59/31/21 kullanılmıştır.

### 3.1. Alkali Elektrolizör ve Yük Karakteristiği (The Alkaline Electrolyzer and Load Characteristics)

Deneysel çalışmalarda kullanılan alkali elektroliz ünitesinin fiziksel bağlantısı ve görünümü Şekil 9'da verildiği gibidir.

Doğal dolaşımli olan elektroliz ünitesi; elektrolizörden, elektrolit tankından ve manometreden oluşmaktadır. Elektrolizörün hücrelerinin gerçekleştirilmesinde çelik elektrot ve hücreler içerisindeki elektrolitin sızmasını önlemek amacıyla polipropen ve kauçuk contalar kullanılmıştır. Elektrolit olarak potasyum hidroksit (KOH) çözeltisi kullanılmıştır. Molaritesi 4,81 mol/L olan çözeltiyi hazırlamak için plastik kap içerisine 405 gram KOH konulmuş ve üzerine su eklenerek çözelti miktarı 1,5 litreye tamamlanmıştır. Üretilen hidrojen miktarını ölçmek amacıyla gaz veya sıvıların basıncını ölçmede kullanılan ve Şekil 10'da fiziksel bağlantısı ile birlikte görünümü verilen manometre tasarlanmıştır.

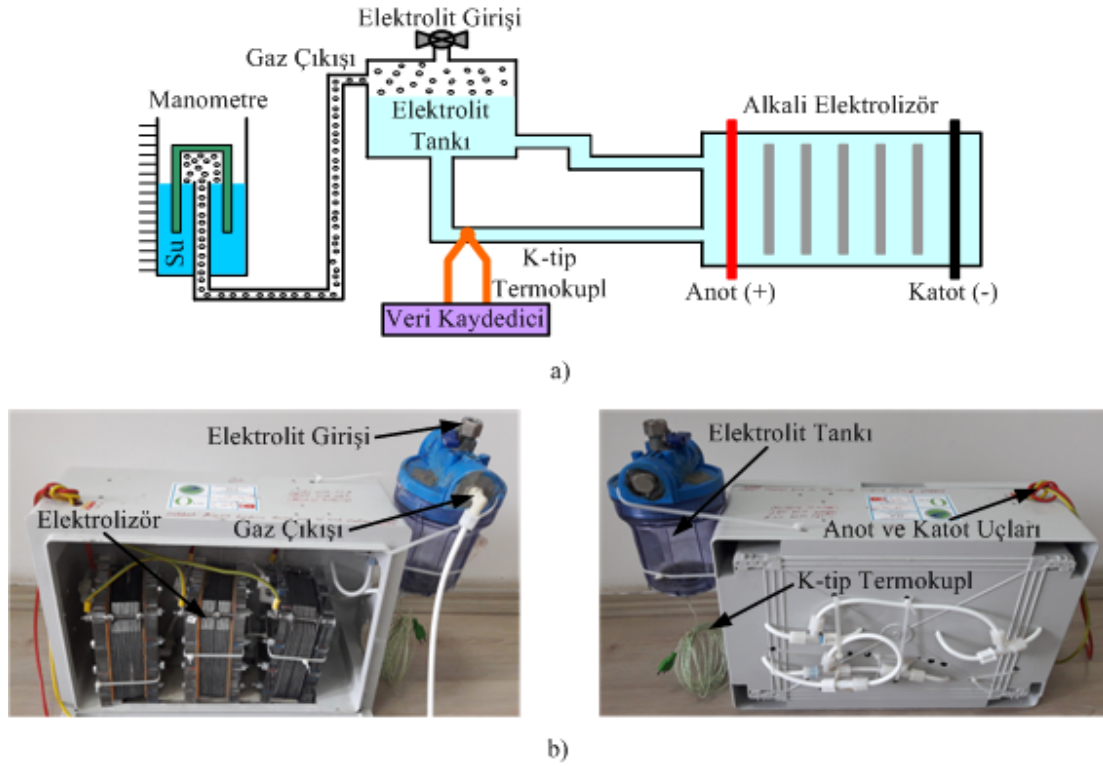
Alkali elektrolizörün yük karakteristiği büyük ölçüde elektrolitin derişim oranına ve sıcaklığına bağlıdır [25]. Bununla birlikte elektrolitin derişim oranının başlangıçta belirlendiği ve değişmediği kabul edildiğinde elektrolizörün yük karakteristiği sıcaklıkla birlikte değişmektedir. Elektrolitin üç farklı sıcaklık değeri için elektrolizöre 0-36 V aralığında gerilim uygulanmıştır. Farklı gerilim değerleri için elektroliz akımı ölçülerek elektrolizörün akım-gerilim eğrisi elde edilmiş ve Şekil 11'de verilmiştir. Farklı sıcaklık değerlerinde elektrolizöre uygulanan gerilimler eşit olsa da elektroliz akımları eşit değildir. Uygulanan gerilime göre akım bir noktaya kadar yaklaşık olarak doğrusal bir şekilde artar iken bir noktadan sonra uygulanan gerilimdeki küçük değişimler büyük akım değişimlerine neden olmaktadır.



Şekil 8. Deney düzeneğinin görünümü (The appearance of experimental setup)

Tablo 1. Dönüştürücünün parametreleri (The parameters of converter)

$V_i$	$V_o$	$P_o$	$n$	$L$	$L_m$	$C$	$f_r$
200 V	36 V	360 W	18:4	191 $\mu$ H	3252 $\mu$ H	10 nF	115 kHz



**Şekil 9.** Alkali elektroliz ünitesi a) fiziksel bağlantısı b) farklı açılardan görünümü  
(Alkaline electrolysis unit a) the physical connection b) the view from different angles

Elektrolizörün sıcaklığının, geriliminin ve akımının değişimini gözlemleyebilmek amacıyla sistem bir süre çalıştırılmıştır. Çalışma süresince gerçekleştirilen ölçümler sonucu elde edilen elektrolizörün gerilim-sıcaklık-akım değişimi Şekil 12’de verilmiştir.



**Şekil 10.** Manometrenin fiziksel bağlantısı ve görünümü  
(The physical connection and the view of the manometer)

Başlangıçta elektrolit sıcaklığı 27°C ’dir. Şekil 13’den görüldüğü gibi 27°C ’den 35°C ’ye kadar olan sıcaklık değişiminde elektrolizöre sabit 36 V uygulanmıştır. 27 °C sıcaklık için elektroliz akımı 6,4 A iken 35°C elektrolit sıcaklığı için elektroliz akımının 10,01 A olmaktadır. Dolayısıyla elektrolizöre sabit 36 V gerilim uygulandığında artan elektrolit sıcaklığı ile birlikte elektroliz akımı da artmaya devam etmektedir. Devam eden çalışma süresinde elektroliz akımının 10 A’e ulaşması ile elektrolizörün akımı sabit tutularak çalışmaya devam edilmiştir. Sabit akım çalışması boyunca elektrolit sıcaklığının artmaya devam ettiği ve elektrolizör geriliminin azaldığı görülmektedir.

Tablo 2’de farklı elektrolit sıcaklıkları ve elektrolizörün nominal çalışma akımı için elektrolizör gerilimi ( $V_o$ ), hücre gerilimi ( $V_h$ ) ve enerji verimi ( $\eta_v$ ) verilmiştir. Hücre gerilimi  $V_h$ ; elektrolizör geriliminin elektrolizörün seri hücre sayısı 18’e bölünmesi ile elde edilmiştir.

**Tablo 2.** Elektrolizörün gerilim ve verim parametreleri  
(The voltage and efficiency parameters of electrolyzer)

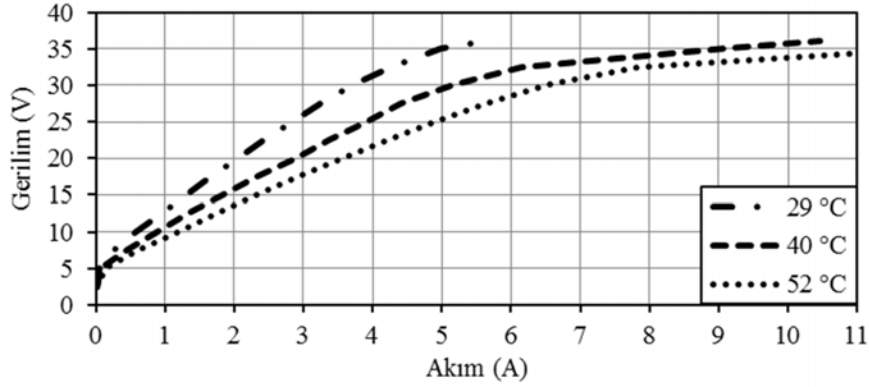
Sıcaklık (°C)	$I_o$ (A)	$V_o$ (V)	$V_h$ (V)	$\eta_v$ (%)
40	10	34,8	1,93	76,73
50	10	33,3	1,85	80,05

Alkali elektrolizörde nominal çalışma akımı için artan elektrolit sıcaklığı ile hücre gerilimi azalmaktadır. Dolayısıyla hücre gerilimi ile ters orantılı olan enerji verimi artmaktadır.

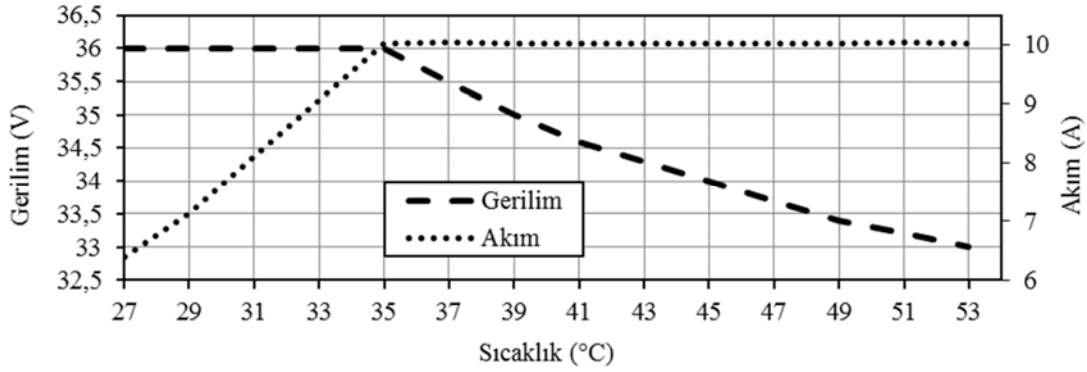
### 3.2. Hidrojen Üretimi ve Ölçümü (The Hydrogen Production and Measurement)

Farklı oranlarda hidrojen üretmek amacıyla oransal kontrol kullanılarak FM kontrollü dönüştürücünün çıkış akımı 50°C elektrolit sıcaklığı için sıra ile 8 A ve 10 A referans akım değerlerine sabitlenmiştir. Şekil 13’de 8 A ve 10 A referans akım değerleri ve 50°C elektrolit sıcaklığı için alkali elektrolizörün gerilim ve akım dalga şekilleri verilmiştir. Şekil 13’deki dalga şekillerinden oransal kontrol tekniği ile elektroliz akımının referans akım değerini takip ettiği ve değişen elektroliz akımı ile de elektrolizör geriliminin değiştiği görülmektedir.

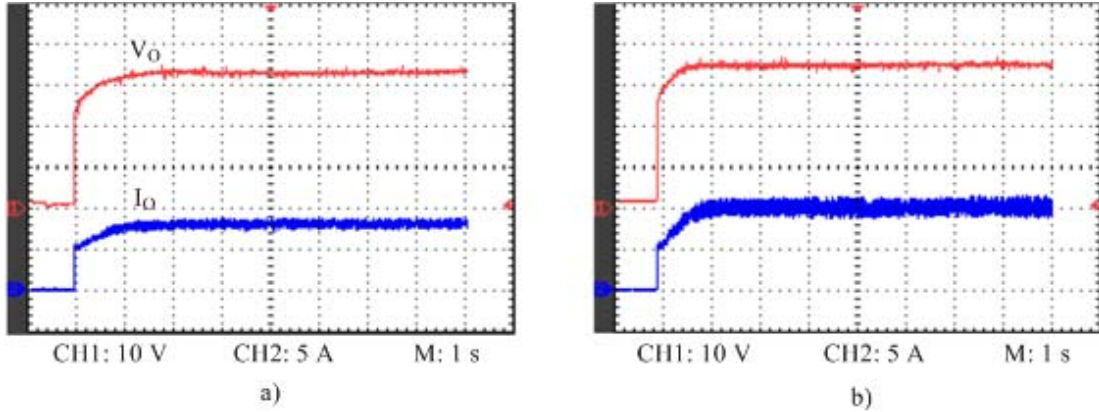




**Şekil 11.** Farklı sıcaklıklar için elektrolizörün akım-gerilim eğrileri  
(The current-voltage curves of electrolyzer at different temperatures)



**Şekil 12.** Elektrolizörün gerilim-sıcaklık-akım değişimi (The voltage-temperature-current variation of electrolyzer)



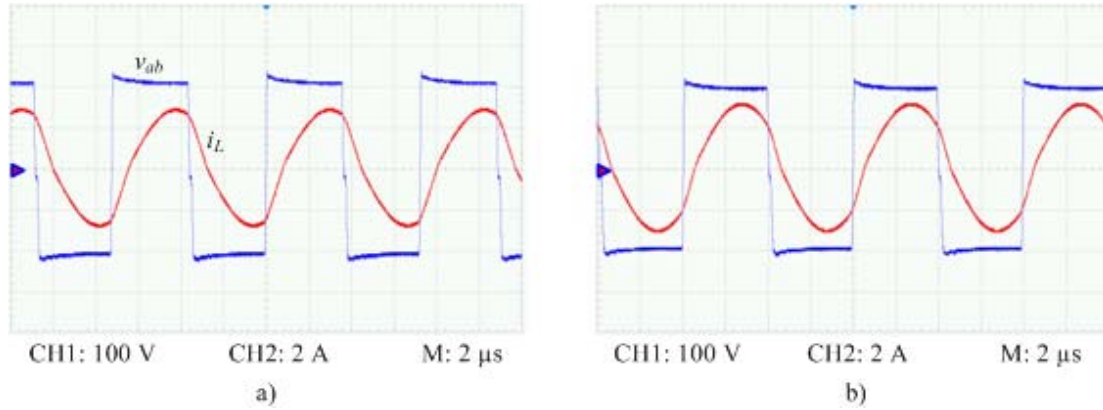
**Şekil 13.** 8 A ve 10 A referans akım değerleri ve 50°C elektrolit sıcaklığı için alkali elektrolizörün gerilimi ve akımı  
a) 8 A b) 10 A

(The voltage and current of alkaline electrolyzer for 8 A and 10 A of reference current values and electrolyte temperature of 50°C a) 8 A b) 10 A)

8 A ve 10 A referans akım değerleri için dönüştürücünün çıkış gücü sıra ile 264 W ve 350 W iken verim değeri sırasıyla %87 ve %88 dir. Bu verim değerleri elektroliz uygulamalarında kullanılan izoleli push-pull DGM dönüştürücüye göre daha yüksek olduğu gibi güç anahtarları uçarındaki gerilim streslerini azaltmak için herhangi bir devre elemanı kullanılmamıştır. Şekil 14'de 8 A ve 10 A referans akım değerleri ve 50°C elektrolit sıcaklığı için kontrol edilen dönüştürücünün evirici gerilim ve rezonans akım dalga şekilleri verilmiştir. 8 A ve 10 A çıkış akım

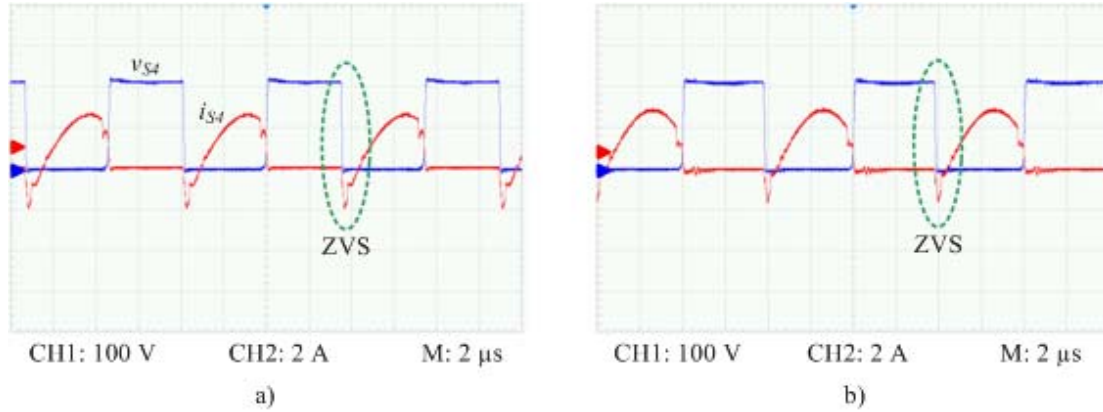
değerleri için dönüştürücünün anahtarlama frekansı sıra ile 138 kHz ve 125 kHz'dir. Dönüştürücüde azalan çıkış akımı ile birlikte rezonans akımı da azalmaktadır. Ayrıca rezonans devre akımı evirici geriliminden geri fazlı olduğundan güç anahtarları için SGA şartları sağlanmaktadır.

Şekil 15'de 8 A ve 10 A referans akım değerleri ve 50°C elektrolit sıcaklığı için M<sub>4</sub> anahtarının gerilim (v<sub>s4</sub>) ve akım (i<sub>s4</sub>) dalga şekilleri verilmiştir. M<sub>4</sub> MOSFET'i her iki çıkış akım değeri için de negatif rezonans akımını taşıyan gövde



**Şekil 14.** 8 A ve 10 A referans akım değerleri ve 50°C elektrolit sıcaklığı için dönüştürücünün evirici gerilimi ve rezonans akımı a) 8 A b) 10 A

(The inverter voltage and resonant current of converter for 8 A and 10 A of reference current values and electrolyte temperature of 50°C a) 8 A b) 10 A)



**Şekil 15.** 8 A ve 10 A referans akım değerleri ve 50°C elektrolit sıcaklığı için M<sub>4</sub> anahtarının gerilimi ve akımı a) 8 A b) 10 A

(The voltage and current of switch M<sub>4</sub> for 8 A and 10 A of reference current values and electrolyte temperature of 50°C a) 8 A b) 10 A)

diyotunun ( $D_{M4}$ ) gerilimine kenetlendiğinden sıfır gerilim ile iletme geçmektedir. Böylece MOSFET'lerin iletme geçiş kayıpları önlenmekte ancak sert anahtarlama şartlarında yalıtıma geçmelerinden dolayı yalıtıma geçiş kayıplarının önüne geçilememektedir.

Oransal kontrol ile elektroliz akımı kontrol edilen sistemde üretilen hidrojen miktarını ölçmek amacıyla nominal çalışma akımı 10 A ve iki ayrı elektrolit sıcaklığı 40°C ve 50°C için sistem 10<sup>7</sup> ar saniye çalıştırılmıştır. Her bir elektrolit sıcaklık değeri için üretilen hidrojen miktarları manometre ile ölçülmüştür. Ayrıca bu çalışma parametreleri için elektrolizörün seri hücreleri tarafından üretilen hidrojen miktarının teorik olarak hesaplanmasında Eş. 21'de verilen ideal gaz denklemi kullanılmıştır [35].

$$V = \frac{R I_0 T t}{F P z} n_h \quad (21)$$

İdeal gaz denkleminde;  $V(L)$  gaz hacmi,  $R=0,0820577$  atmL/molK olarak evrensel gaz sabiti,  $P(\text{atm})$  basınç,  $t(\text{s})$  zaman ve  $n_h$  elektrolizörün hücre sayısıdır. İdeal gaz denkleminde basınç değeri 1 atm'dir. Ayrıca deneysel çalışmalarda kullanılan elektrolizörün seri hücre sayısı

18'dir. Tablo 3'de ölçme ve hesaplama sonucu elde edilen hidrojen miktarları verilmiştir. Ölçülen ve hesaplanan hidrojen miktarları arasındaki fark, elektrot ve elektrolitten kaynaklı direnç kayıplarından ve ayrıca hidrojen ve oksijen aşırı gerilimlerinden kaynaklanmaktadır.

**Tablo 3.** Nominal çalışma akımı ve farklı sıcaklık değerleri için üretilen hidrojen miktarları

(The produced hydrogen amount for nominal operating current and different temperature values)

T (°C)	Ölçülen H <sub>2(L)</sub>	Hesaplanan H <sub>2(L)</sub>
40	0,17	0,2397
50	0,185	0,2473

Tablo 3'de verilen her bir sıcaklık değeri için elektrolizörün hücre veriminin hesaplanabilmesi için ölçme ve hesaplama sonucu elde edilen hidrojen miktarının akış oranının bilinmesi gerekmektedir. Eş. 22'de verilen yoğunluk (d) eşitliği ile öncelikle farklı sıcaklık değerleri için hesaplama ve ölçme sonucu elde edilen hidrojenin kütlesi daha sonra da elde edilen kütle değeri ve geçerli süre olan 10 saniye kullanılarak hidrojenin akış oranı hesaplanmıştır.

$$d = \frac{m}{V} \quad (22)$$

Eş. 22'deki  $d_{(kg/m^3)}$  gazın yoğunluğu,  $m_{(kg)}$  gazın kütlesi ve  $V_{(m^3)}$  gazın hacmidir. Tablo 4'de farklı sıcaklık değerleri için hidrojenin yoğunluğu, teorik olarak hesaplanan hidrojenin hacmi, kütlesi ve akış miktarı  $F_{H2C(kg/h)}$  verilmiştir.

**Tablo 4.** Farklı sıcaklık değerleri için hidrojenin yoğunluğu ve hesaplama sonuçları  
(The density of hydrogen and calculated results for different temperature values)

$T(^{\circ}C)$	$d_{(kg/m^3)}$	$V_{(m^3)}$	$m_{(kg)}$	$F_{H2C(kg/h)}$
40	0,0773	0,0002397	0,0000185	0,00666
50	0,0749	0,0002473	0,000185	0,00666

Tablo 5'te farklı sıcaklık değerleri için hidrojenin yoğunluğu, ölçme işlemi sonucu elde edilen hidrojenin hacmi, kütlesi ve akış oranı  $F_{H2M(kg/h)}$  verilmiştir.

**Tablo 5.** Farklı sıcaklık değerleri için hidrojenin yoğunluğu ve ölçme sonuçları  
(The density of hydrogen and measured results for different temperature values)

$T(^{\circ}C)$	$d_{(kg/m^3)}$	$V_{(m^3)}$	$m_{(kg)}$	$F_{H2M(kg/h)}$
40	0,0773	0,00017	0,0000131	0,00471
50	0,0749	0,000185	0,0000138	0,00496

Faraday verimi; Tablo 4 ve Tablo 5'teki farklı sıcaklık değerleri için elde edilen hidrojen akış oranlarının kullanılması ile elde edilmiştir. Elektrolizör hücre verimi ise daha önceki deneysel çalışmalarda elde edilen enerji verim değerlerinin (Bkz. Tablo 2) Faraday verim değerleri ile çarpılması sonucu hesaplanmıştır. Elektrolizörün Faraday, enerji ve hücre verim değerleri farklı sıcaklık değerleri için Tablo 6'da verilmiştir.

**Tablo 6.** Farklı sıcaklık değerleri için elektrolizörün Faraday, enerji ve hücre verimi  
(Faraday, energy and cell efficiency of electrolyzer for different temperature values)

$T(^{\circ}C)$	$\eta_F$ (%)	$\eta_V$ (%)	$\eta_E$ (%)
40	70,72	76,73	54,26
50	74,47	80,05	59,61

Nominal çalışma akımı ve iki ayrı elektrolit sıcaklığı için gerçekleştirilen deneysel çalışma ve hesaplama sonuçlarına göre elde edilen Tablo 6'da değişen sıcaklık ile verim değerlerinin değiştiği ve 50°C elektrolit sıcaklığı için elektrolizörün enerji, Faraday ve hücre veriminin 40°C'ye göre daha yüksek olduğu görülmektedir.

## 4. SİMGELER (SYMBOLS)

### 4.1. Kısaltmalar (Abbreviations)

DGM : Darbe genişlik modülasyonu  
FM : Frekans Modülasyon  
SRC : Series Resonant Converter

SRD : Seri Rezonans Dönüştürücü  
FK : Faz Kaymalı  
PWM : Pulse width modulation  
SGA : Sıfır Gerilim Anahtarlama  
SGG : Sıfır Gerilim Geçişli

### 4.2. Semboller ve Birimler (Symbols and Units)

$C$  : Rezonans kondansatörü ( $\mu F$ )  
 $C_O$  : Çıkış filtre kondansatörü ( $\mu F$ )  
 $d$  : Yoğunluk ( $kg/m^3$ )  
 $D_{M1-M4}$  : MOSFET gövde diyotu  
 $D_{R1-R4}$  : Doğrultma diyotları  
 $D_{S1-S4}$  : Hızlı güç diyotları  
 $f_n$  : Frekans oranı  
 $f_r$  : Rezonans frekansı (kHz)  
 $f_s$  : Anahtarlama frekansı (kHz)  
 $F$  : Faraday sabiti (C/mol)  
 $F_{H2C}$  : Ölçülen hidrojen akış oranı (kg/h)  
 $F_{H2M}$  : Hesaplanan hidrojen akış oranı (kg/h)  
 $i_L$  : Rezonans akımı (A)  
 $i_S$  : Anahtar akımı (A)  
 $I_e$  : Elektrolit içerisinden geçen akım (mA)  
 $I_O$  : Dönüştürücünün çıkış akımı (A)  
 $I_{ölç}$  : Dönüştürücünün ölçülen çıkış akımı (A)  
 $I_{ref}$  : Referans akımı (A)  
 $L$  : Rezonans bobini ( $\mu H$ )  
 $L_m$  : Transformatörün mıknatıslanma endüktansı ( $\mu H$ )  
 $L_r$  : Haricen eklenen rezonans bobini ( $\mu H$ )  
 $m$  : Kütle (kg)  
 $M$  : Dönüştürücünün doğru gerilim kazancı  
 $M_{1-4}$  : MOSFET  
 $n$  : Transformatörün dönüştürme oranı  
 $n_h$  : Elektrolizörün hücre sayısı  
 $N_p$  : Transformatörünün primer tur sayısı  
 $N_s$  : Transformatörünün sekonder tur sayısı  
 $OH^-$  : Hidroksit iyonu  
 $q_C$  : Rezonans kondansatör geriliminin normalize değeri  
 $Q$  : Normalize yük parametresi  
 $Q_C$  : Rezonans kondansatörünün elektriksel yükü (C)  
 $P$  : Basınç (atm)  
 $r$  : Elektrolitin direnç parametresi ( $\Omega cm^2$ )  
 $R$  : Evrensel gaz sabiti (atmL/molK)  
 $R_{M1-M2}$  : Durum-düzlem dairelerinin yarıçapları  
 $R_O$  : Dönüştürücünün omik çıkış yükü ( $\Omega$ )  
 $s$  : Elektrot aşırı gerilim kat sayısı (V)  
 $T$  : Sıcaklık Kelvin (K) veya santigrad derece ( $^{\circ}C$ )  
 $T_{hf}$  : Yüksek frekans transformatörü  
 $u$  : Elektrot aşırı gerilim kat sayısı ( $cm^2 mA^{-1}$ )  
 $v_{ab}$  : Evirici gerilimi (V)  
 $v_C$  : Rezonans kondansatör gerilimi (V)  
 $v_M$  : Anahtar gerilimi (V)  
 $V$  : Gaz hacmi litre (L) veya metre küp ( $m^3$ )  
 $V_C$  : Rezonans kondansatör gerilimi (V)  
 $V_{g1-g4}$  :  $M_{1-4}$  MOSFET'lerinin kontrol sinyalleri (V)  
 $V_h$  : Elektrolizör hücresinin gerilimi (V)  
 $V_i$  : Dönüştürücünün giriş gerilimi (V)

$V_O$	: Dönüştürücünün çıkış gerilimi (V)
$V_{rev}$	: Tersinir gerilim (V)
$V_{tn}$	: Termo-nötral gerilim (V)
$y$	: Oransal kontrol çıkışı
$z$	: Hidrojen molekülünün açığa çıkması için verilen elektron sayısı
$Z_n$	: Karakteristik empedans ( $\Omega$ )
$\beta$	: Durum-düzlem eğrilerinden elde edilen üçgenin iç açısı (rad)
$\gamma$	: Durum-düzlem eğrilerinden elde edilen üçgenin iç açısı (rad)
$\Delta G$	: Gibbs enerji değişimi (kJ/mol)
$\Delta H$	: Sistemin entalpi değişimi (kJ/mol)
$\Delta S$	: Sistemin entropi değişimi (kJ/mol)
$\eta$	: Dönüştürücü verimi
$\eta_E$	: Elektrolizör hücre verimi
$\eta_F$	: Faraday verimi
$\eta_V$	: Elektroliz hücresinin enerji verimi
$\theta$	: Durum-düzlem eğrilerinden elde edilen üçgenin iç açısı (rad)
$\rho$	: Normalize frekans
$\omega_r$	: Açısal rezonans frekansı (rad/s)

## 5. SONUÇLAR (CONCLUSIONS)

Yapılan bu çalışmada elektroliz sürecinde yük karakteristiği devamlı olarak değişen elektrolizörün güç kontrolü için FM kontrollü SRD kullanılmıştır. SRD'nün 264 W ile 350 W arasındaki çıkış gücünün kontrolü 138 kHz ile 125 kHz anahtarlama frekansı aralığında oransal kontrol ile gerçekleştirilmiştir. 125 kHz çalışma frekansı ve 10 A elektroliz akımı için dönüştürücü verimi %88 dir. Sistemin kapalı çevrimli kontrolü dspic33fj16gs502 sayısal sinyal denetleyicisi ile gerçekleştirilmiştir. Elektroliz akımı farklı referans akım değerlerine sabitlenerek hidrojen üretimi gerçekleştirilmiştir. Ayrıca nominal çalışma akımı ve farklı elektrolit sıcaklığı için üretilen hidrojen miktarlarının hesaplanması ve ölçülmesi sonucunda elektrolizör hücre verim değerinin artan elektrolit sıcaklığı ile arttığı gözlemlenmiştir.

## TEŞEKKÜR (ACKNOWLEDGMENT)

Bu çalışma Karabük Üniversitesi Rektörlüğü Bilimsel Araştırma Projeleri Birimi tarafından desteklenmiştir. (Proje Numarası: KBUBAP-17-DR-264).

## KAYNAKLAR (REFERENCES)

1. Yodwong, B., Guilbert, D., Phattanasak, M., Kaewmanee, W., Hinaje, M. and Vitale, G., Proton exchange membrane electrolyzer modelling for power electronics control: a short review, *Journal of Carbon Research*, 6 (2), 1-20, 2020.
2. Jiang, W., Wu, Y. K., Yang, T., Yu, F. Y., Wang, W. and Hashimoto, S., Identification and power electronic module design of a solar powered hydrogen electrolyzer, *Power and Energy Engineering Conference (APPEEC)*, Asia-Pacific, 1-4, 27-29 March, 2012.
3. Şahin, M. E., Okumuş, H. İ. and Aydemir, M. T., Implementation of an electrolysis system with DC/DC synchronous buck converter, *Int. J. Hydrogen Energy*, 39 (13), 6802-6812, 2014.
4. Valverde, R. G., Miguel, C., Bejar, R. M. and Urbina, A., Optimized photovoltaic generator-water electrolyser coupling through a controlled DC-DC converter, *Int. J. Hydrogen Energy*, 33 (20), 5352-5362 2008.
5. Dahbi, S., Aboutni, R., Aziz, A., Benazzi, N., Elhafyani, M. and Kassmi, K., Optimised hydrogen production by a photovoltaic electrolysis system DC/DC converter and water flow controller, *Int. J. Hydrogen Energy*, 41 (45), 1-9, 2016.
6. Koïwa, K., Umemura, A., Takahashi, R. and Tamura, J., Stand-alone hydrogen production system composed of wind generators and electrolyzer, *Industrial Electronics Society, IECON 2013 - 39th Annual Conference of the IEEE, Vienna-Austria, 1873-1878, 10-13 November, 2013.*
7. Ursua, A., San Martin, I. and Sanchis, P., Design of a programmable power supply to study the performance of an alkaline electrolyzer under different operating conditions, *2012 IEEE International Energy Conference and Exhibition, Florence-Italy, 259-264, 9-12 September, 2012.*
8. Vinnikov, D., Hoimoja, H., Andriyanovits, A., Roasto, I., Lehtla, T. and Klytta, M., An improved interface converter for a medium-power wind-hydrogen system, *International Conference on Clean Electrical Power, Capri-Italy, 426-432, 9-11 June, 2009.*
9. Garrigos, A., Lizan, J. L., Blanes, J. M. and Gutierrez, R. A., Combined maximum power point tracking and output current control for a photovoltaic-electrolyzer DC/DC converter, *Int. J. Hydrogen Energy*, 39 (36), 20907-20919, 2014.
10. Garrigos, A., Blanes, J. M., Carrasco, J. A., Lizan, J. L., Beneito, R. and Molina, J. A., 5 kW DC/DC converter for hydrogen generation from photovoltaic sources, *Int. J. Hydrogen Energy*, 35 (12), 6123-6130, 2010.
11. Török, L., Nielsen, C. K., Munk-Nielsen, S., Romer, C. and Flindt, P., High-efficiency electrolyzer power supply for household hydrogen production and storage systems, *17th European Conference on Power Electronics and Applications, Geneva- Switzerland, 1-9, 8-10 September, 2015.*
12. Nacar, S. and Öncü, S. Hydrogen production system with fuzzy logic-controlled converter, *Turk J Elec Eng & Comp Sci*, 27 (2019), 1885-1895, 2019.
13. Gautam, D. S. and Bhat, A. K. S., A comparison of soft-switched DC-to-DC converters for electrolyzer application, *IEEE Trans. Power Electron.*, 28 (1), 54-63, 2012.
14. Scheible, G., Solmecke, H. and Hackstein, D., Low cost soft switching DC-DC converter with autotransformer for photovoltaic hydrogen systems, *23rd International Conference on Industrial Electronics, Control and Instrument, New Orleans-USA, 780-785, 14 November, 1997.*
15. Karafil A., Comparison of the various irregular pulse density modulation (PDM) control pattern lengths for

- resonant converter with photovoltaic (PV) integration, *Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University*, 36 (3), 1595-1611, 2021.
16. Joshi, T. G. S. and John, V., Circuit-parameter-based audiosusceptibility model for series resonant converter, *IEEE Trans. Power Electron.*, 34 (6), 5927-5939, 2019.
  17. Jia, P. and Yuan, Y., Analysis and implementation of LC series resonant converter with secondary side clamp diodes under DCM operation for high step-up applications, *J. Power Electron.*, 19 (2), 363-379 2019.
  18. Stolten, D., *Hydrogen production: by electrolysis*, Editor: Godula-Jopek, A., Wiley-VCH Verlag GmbH & Co., Weinheim, Germany, 2015.
  19. Buttler, A. and Spliethoff, H., Current status of water electrolysis for energy storage, grid balancing and sector coupling via power-to-gas and power-to-liquids: A review, *Renewable Sustainable Energy Rev.*, 82 (2018), 2440-2454, 2018.
  20. Chi, J. and Yu, H., Water electrolysis based on renewable energy for hydrogen production, *Chin. J. Catal.*, 39 (2018), 390-394, 2018.
  21. Carmo, M., Fritz, D. L., Mergel, J. and Stolten, D., A comprehensive review on PEM water electrolysis, *Int. J. Hydrogen Energy*, 38 (2013), 4901-4934, 2013.
  22. Özbay, H., Karafil, A. and Öncü, S., Sliding mode PLL-PDM controller for induction heating system, *Turk J Elec Eng & Comp Sci.*, 2021 (29), 1241-1258, 2021
  23. Barbi, I. and Pötker, F., *Series resonant converter operating above the resonant frequency*, *Soft Commutation Isolated DC-DC Converters*, Springer, Switzerland, 115-138, 2019.
  24. Witulski, A. F. and Erickson, R. W., Design of the series resonant converter for minimum component stress, *IEEE Trans. Aerosp. Electron. Syst.*, 22 (4), 356-363, 1985.
  25. David, M., Ocampo-Martinez, C. and Sanchez-Pena, R., Advances in alkaline water electrolyzers: A review, *J. Energy Storage*, 23 (2019), 392-403, 2019.
  26. Ulleberg, Ø., Modelling of advanced alkaline electrolyzers: a system simulation approach, *Int. J. Hydrogen Energy*, 28 (1), 21-33, 2003.
  27. Kumar, S. S. and Himabindu, V., Hydrogen production by PEM water electrolysis – a review, *Mater. Sci. Energy Technol.*, 2 (2019), 442-454, 2019.
  28. Buttler, A. and Spliethoff, H., Current status of water electrolysis for energy storage, grid balancing and sector coupling via power-to-gas and power-to-liquids: A review, *Renewable Sustainable Energy Rev.*, 82 (2018), 2440-2454, 2018.
  29. Philips, R. and Dunnill, C. W., Zero gap alkaline electrolysis cell design for renewable energy storage as hydrogen gas, *R. Soc. Chem.*, 6 (102), 100643-100651, 2016.
  30. Zeng, K. and Zhang, D., Recent progress in alkaline water electrolysis for hydrogen production and applications”, *Prog. Energy Combust. Sci.*, 36 (2010), 307-326, 2010.
  31. Teng, Y., Wang, Z., Li, Y., Ma, Q., Hui, Q. and Li, S., Multi-energy storage system model based on electricity heat and hydrogen coordinated optimization for power grid flexibility, *CSEE J. Power Energy Syst*, 5 (2), 266-274, 2019.
  32. David, M., Ocampo-Martinez, C. and Sanchez-Pena, R., Advances in alkaline water electrolyzers: a review”, *J. Storage Mater.*, 23 (2019), 392-403, 2019.
  33. Buttler, A. and Spliethoff, H., Current status of water electrolysis for energy storage, grid balancing and sector coupling via power-to-gas and power-to-liquids: A review, *Renewable Sustainable Energy Rev.*, 82 (2018), 2440-2454, 2018.
  34. Rashid, M. M., Mesfer, M. K. A., Naseem, H. and Danish, M., Hydrogen production by water electrolysis: a review of alkaline water electrolysis, PEM water electrolysis and high temperature water electrolysis, *Int. j. eng.*, 4 (3), 80-93, 2015.
  35. Chang R., *Gases, Chemistry*, 10th Edition, Mc Graw Hill, Boston, 172-227, 2010.



