

HİBRİT ELEKTRİKLİ ARAÇLARDA KULLANILAN YÜKSELTEN DC/DC DÖNÜŞTÜRÜCÜNÜN KARŞILAŞTIRMALI ANALİZİ

¹Murat TUNA

²Ayşe ERGÜN AMAÇ

³Muhlis AK

^{1,2,3}Elektrik Eğitimi Bölümü

Teknik Eğitim Fakültesi

Kocaeli Üniversitesi, Umuttepe Merkez Yerleşkesi

¹e-posta: tunamurat41@mynet.com.tr

²e-posta: ayseergun@kou.edu.tr

³e-posta: muhlisak@mynet.com.tr

Anahtar sözcükler: Genelleştirilmiş Durum Uzay Ortalama Yöntemi, DC/DC Boost Dönüştürücüler.

ÖZET

Güç elektroniği dönüştürücüleri anahtarlamalı yapıları sebebiyle periyodik olarak değişen sistemlerdir. Bu nedenle, dönüştürücülerin dinamik davranışları doğrusal olmayan özellik gösterir. Böyle sistemlerin analizi ve tasarımı oldukça zordur. Bu durumda modelleme ve benzetim; güç elektroniği devrelerinin analiz ve tasarım sürecinin en önemli unsurlarından biri haline gelmektedir. Genelleştirilmiş durum uzay ortalama yöntemi (GSSA), sistemin doğrusal olmayan denklemlerini doğrusal durum uzay sistemine dönüştürür. Böylece sistem doğrusallaştırılmış olur. Bu yöntem sayesinde sistemin durum değişkenleri arasındaki ilişki doğrusal denklemler ile açıklanabilir. Bu çalışmada hibrit elektrikli araçlarda (HEA) kullanılan yükselten DC/DC dönüştürücü için, GSSA yöntemi ile yapılan benzetim sonuçları; PSIM programı ile yapılan gerçek zaman benzetimleri ve iyi bilinen durum uzay ortalama (SSA) yönteminden alınan sonuçlarla karşılaştırılmış ve önerilen yöntemin geçerliliği ispatlanmıştır.

1. GİRİŞ

Hibrit elektrikli araçlar (HEA), enerjinin iki ya da daha fazla enerji deposundan sağlandığı ve bu enerji depolarından en az bir tanesinin elektrik enerjisi verdiği bir araç olarak tanımlanmıştır. Bu araçlar içten yanmalı motor, batarya, süperkondansatör ve yakıt pili ünitelerinden oluşmaktadır.

Hibrit elektrikli araç uygulamalarında genellikle farklı gerilim seviyesine bağlı sistemlerin (yakıt pili, akü grubu veya alçak gerilim beslemesine ihtiyaç duyan elektronik devreler vb.) birbirine bağlanması ve DC motor kontrolü amacıyla DC/DC dönüştürücüler kullanılmaktadır [1].

DC/DC dönüştürücülerin modellenmesinde çeşitli benzetim programları (MATLAB, PSIM, PSPICE,

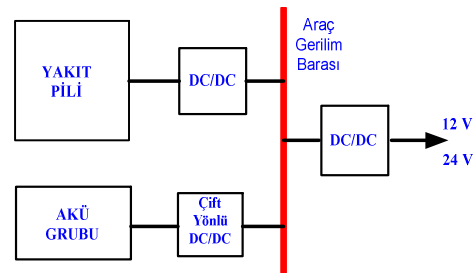
vb.) ya da geleneksel matematiksel yöntemler (State Space Averaging-SSA) kullanılmaktadır.

Benzetim programlarının geniş bilgisayar kaynaklarına ve uzun benzetim zamanlarına ihtiyaç duyması, geleneksel ortalama yöntemlerini avantajlı hale getirmiştir. Çünkü bu yöntem anahtarlamalı modellere göre daha hızlıdır ve çok fazla bilgisayar kaynağına gereksinim duymaz. Ancak; geleneksel ortalama modeller hızlı ve büyük sinyal hareketlerini takip edemez [2-3].

Bu çalışmada, yakıt pili çıkışına bağlanan ideal bir yükselten DC/DC dönüştürücünün modellenmesinde; geleneksel durum uzay ortalama yönteminin dezavantajını ortadan kaldıran genelleştirilmiş durum uzay ortalama (GSSA) yöntemi kullanılmıştır. Bu yöntemde, harmonik durum değişkenlerinin ortalaması da hesaba katılmaktadır.

2. GSSA YÖNTEMİ ve YÜKSELTEN DC/DC DÖNÜŞTÜRÜCÜ

Hibrit elektrikli araçlarda kullanılan farklı seviyedeki DC gerilimlerin araç gerilim barasına paralel bağlantı ilişkisi şekil 1'de verilmiştir.

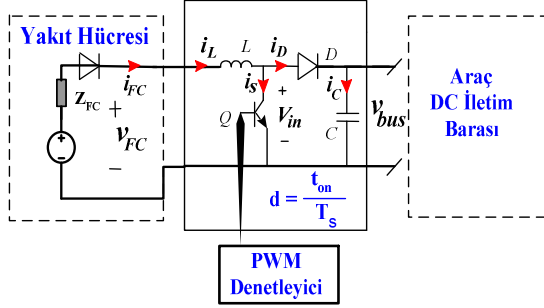


Şekil 1. Hibrit elektrikli araçlarda güç sistemi.

Burada, yakıt pilini baraya bağlayabilmek için güç yönetim sistemi adı da verilen yükselten DC/DC

dönüştürücü kullanılmıştır. Dönüştürücü aynı zamanda ideal olmayan güç kaynağı durumundaki yakıt pili çıkış geriliminin regülasyonunu da sağlamaktadır.

Şekil 2’de yakıt pilini araç iletim barasına bağlayan, sürekli iletim modunda (CCM), T_s anahtarlama periyodu ve d görev devri ile çalışan PWM yükseltilen DC/DC dönüştürücü gösterilmektedir.



Şekil 2. PWM yükseltilen DC/DC dönüştürücü ($V_{in}=20$ V, $R_o=10\Omega$, $L=1$ mH, $C=50$ μ F, $T_s=0.1$ ms).

Genelleştirilmiş durum uzay ortalama yöntemi; periyodik olmayan sinyaller için Fourier dönüşümünden çıkartılmıştır. Bu metod, herhangi bir “ $x(t)$ dalgı şekline (t-T, T] sonlu zaman aralığında Fourier dönüşümünün sonlu katsayıları kullanılarak keyfi doğrulukla yaklaşılabılır” prensibine dayanmaktadır. Bu bağıntı;

$$x(t) = \sum_{k=-n}^n \langle x \rangle_k(t) e^{jk\omega t} \quad (1)$$

$$\langle x \rangle_k(t) = \frac{1}{T} \int_{t-T}^t x(\tau) e^{-jk\omega\tau} d\tau \quad (2)$$

ile hesaplanmaktadır. Burada, $\langle x \rangle_k(t)$ kompleks Fourier katsayılarıdır. (1)’de n’in değeri doğruluğun derecesine bağıdır. Burada n sonsuza giderse, yaklaşım hatası da sifıra gider. Eğer bir durum değışkeninin herhangi bir salınımı yok ve aynı zamanda sabitse, sadece $k=0$ terimi kullanılarak alınan sonuç, durum uzay ortalama metodu ile elde edilen sonucu verir. Bunun yanı sıra, eğer durum değışkeninin sinüs dalgasına benzer yalnızca tek bir salınımı varsa, $k=-1, 1$ terimi kullanılır. Bu yöntem birinci harmonik yaklaşımı olarak adlandırılır. Eğer bir durum değışkeninin bir DC değeri ve aynı zamanda bir salınımı da varsa, $k=-1, 0, 1$ terimi kullanılır. Burada ne kadar çok terim hesaba katılırsa doğruluğa o kadar yaklaşılmaktadır [4-5-6].

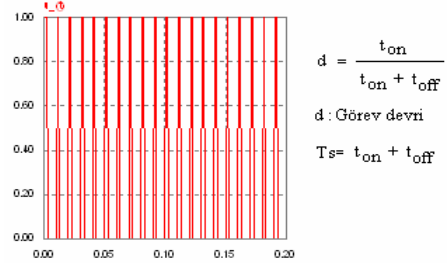
Genelleştirilmiş durum uzay ortalama yöntemini uygulamak için önce anahtarlama fonksiyonu $u(t)$ belirlenir. Şekil 3’te gösterilen anahtarlama fonksiyonu, devre topolojisinin zamana göre

değışimine karar veren devre anahtarlama kontrolüne bağıdır.

$$u(t) = \begin{cases} 1, & 0 < t < dT \\ 0, & dT < t < T \end{cases} \quad (3)$$

$$V_{in} = (1 - u(t)) \cdot v_o \quad (4)$$

$$i_D = (1 - u(t)) \cdot i_L \quad (5)$$



Şekil 3. Anahtarlama fonksiyonu $u(t)$.

3. GSSA YÖNTEMİN ÖNERİLEN DÖNÜŞTÜRÜCÜYE UYGULANMASI

Sürekli iletim modunda çalışan yükseltilen DC/DC dönüştürücü devresinde; birleşik durum değışkenlerine (4-5)’teki anahtarlama denklem takımları uygulandığında;

$$\frac{di_L}{dt} = \frac{1}{L} [v_{in} - (1 - u(t)) \cdot v_o] \quad (6)$$

$$\frac{dv_o}{dt} = \frac{1}{C} [(1 - u(t)) \cdot i_L - i_R] \quad (7)$$

$$i_{in} = i_L \quad (8)$$

durum uzay denklemleri elde edilir. Genelleştirilmiş durum uzay ortalama modelindeki denklem takımında; güncel durum uzay değışkenleri, devre durum değışkenlerinin (v_o ve i_L) Fourier katsayılarıdır. Bu sistemin durum değışkenlerinin Fourier katsayılarına birinci harmonik yaklaşım uygulandığında;

$$i_L = \langle i_L \rangle_{-1} e^{-j\omega t} + \langle i_L \rangle_0 + \langle i_L \rangle_1 e^{j\omega t} \quad (9)$$

$$v_o = \langle v_o \rangle_{-1} e^{-j\omega t} + \langle v_o \rangle_0 + \langle v_o \rangle_1 e^{j\omega t} \quad (10)$$

denklemleri elde edilir. Burada ω devrenin temel frekansdır. $i_L(t)$ ve $v_o(t)$ değışkenlerini bulabilmek için;

$$\langle i_L \rangle_1 = x_1 + jx_2 \quad (11)$$

$$\langle i_L \rangle_0 = x_5 \quad (12)$$

$$\langle v_o \rangle_1 = x_3 + jx_4 \quad (13)$$

$$\langle v_o \rangle_0 = x_6 \quad (14)$$

$$\langle i_L \rangle_{-1} = \langle i_L \rangle_1^* \quad (15)$$

$$\langle v_o \rangle_{-1} = \langle v_o \rangle_1^* \quad (16)$$

altı adet gerçek durum değişkenleri ($x_1, x_2, x_3, x_4, x_5, x_6$) atanır. Burada (*) operatörü karmaşık bir sayının eşleniği anlamına gelmektedir. Atanan durum değişkenleri denklem (9) ve (10)'da yerlerine yazılırsa;

$$i_L(t) = x_5 + 2x_1 \cos \omega t - 2x_2 \sin \omega t \quad (17)$$

$$v_o(t) = x_6 + 2x_3 \cos \omega t - 2x_4 \sin \omega t \quad (18)$$

elde edilir. Anahtarlama fonksiyonu $u(t)$ 'nin Fourier katsayı (2) analizi yapıldığında;

$$\langle u(t) \rangle_0 = d \quad (19)$$

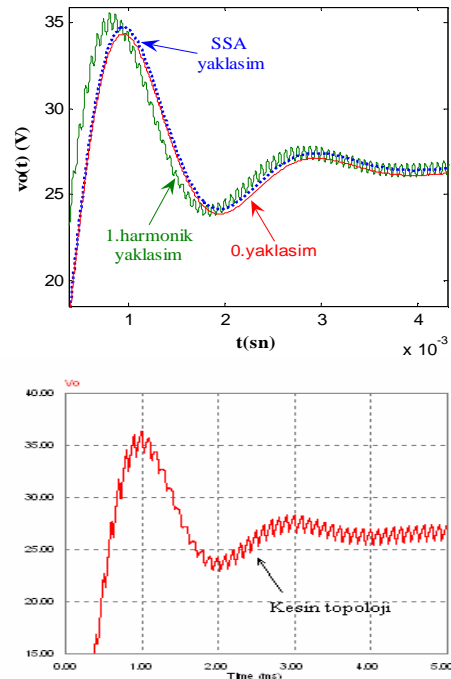
$$\langle u(t) \rangle_1 = \frac{\sin 2\pi d + j(\cos 2\pi d - 1)}{2\pi} \quad (20)$$

elde edilir. Daha sonra devrenin (6-8)'deki durum değişkenlerine; Fourier dönüşüm katsayıları durum değişkenlerinin, zamana karşı türevleri ve çarpımlarının dönüşümleri uygulanmıştır. Aynı zamanda anahtarlama fonksiyonu $u(t)$ 'nin Fourier katsayılarının yerlerine konulmasıyla yükseltilen DC/DC dönüştürücünün GSSA modeli çıkartılmıştır. Çıkartılan GSSA modelinde bilinmeyen değişkenleri bulmak için (21)'nolu matris kullanılmaktadır. Bu matris MATLAB gibi bir yazılım programı ile kolaylıkla çözülebilir.

Matrisin çözümünde elde edilen altı adet gerçek durum değişkenleri denklem (17) ve (18)'de yerlerine konularak devrenin akım-gerilim değerleri bulunur.

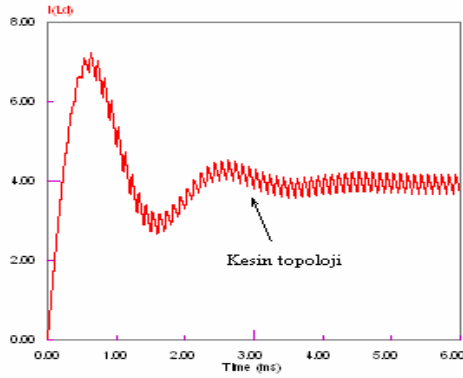
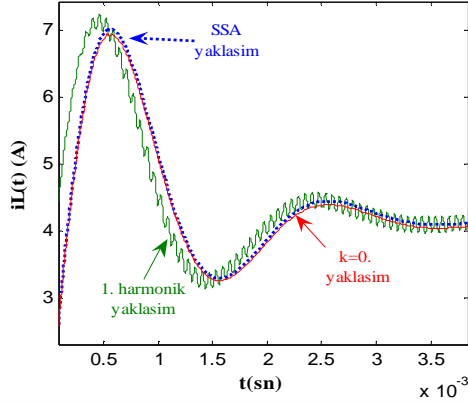
4. GELENEKSEL YÖNTEMLERLE GSSA'nın KARŞILAŞTIRILMASI

Yükseltilen DC/DC dönüştürücü için yapılan GSSA modelinin sonuçları, SSA modelden elde edilen benzetişim sonuçları ile karşılaştırılmıştır. Ayrıca GSSA yönteminin benzetişim sonuçlarının geçerliliğini göstermek amacıyla PSIM programında yapılan gerçek zaman benzetişim sonuçları analiz edilmiştir.

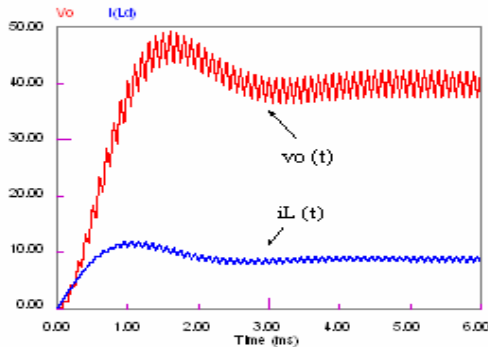
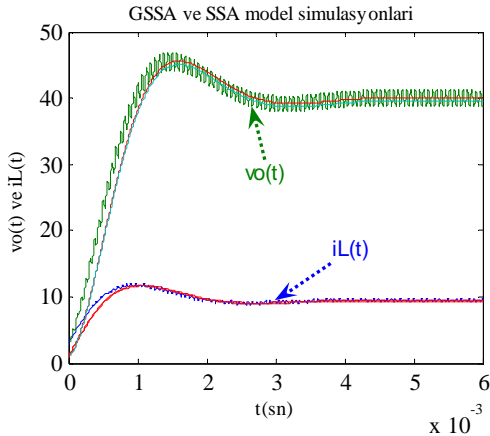


Şekil 4. $d=0.25$ için çıkış gerilim dalga şekilleri üst: SSA ve GSSA yaklaşım, alt: PSIM benzetişim sonuçları.

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \\ \dot{x}_3 \\ \dot{x}_4 \\ \dot{x}_5 \\ \dot{x}_6 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & \omega & -\frac{1-d}{L} & 0 & 0 & \frac{\sin 2\pi d}{2\pi L} \\ -\omega & 0 & 0 & -\frac{1-d}{L} & 0 & -\frac{\sin^2 \pi d}{\pi L} \\ \frac{1-d}{C} & 0 & -\frac{1}{RC} & \omega & -\frac{\sin 2\pi d}{2\pi C} & 0 \\ 0 & \frac{1-d}{C} & -\omega & -\frac{1}{RC} & \frac{\sin^2 \pi d}{\pi C} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{\sin 2\pi d}{\pi L} & -\frac{2 \cdot \sin^2 \pi d}{\pi L} & 0 & -\frac{1-d}{L} \\ -\frac{\sin 2\pi d}{\pi C} & \frac{2 \cdot \sin^2 \pi d}{\pi C} & 0 & 0 & \frac{1-d}{C} & -\frac{1}{RC} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \\ x_4 \\ x_5 \\ x_6 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ \frac{V_{in}}{L} \end{bmatrix} \quad (21)$$



Şekil 5. $d=0.25$ için yük akım dalga şekilleri üst: SSA ve GSSA yaklaşım, alt: PSIM benzetişim sonuçları.



Şekil 6. $d=5$ için yük akım-gerilim dalga şekilleri üst: SSA ve GSSA yaklaşım, alt: PSIM benzetişim sonuçları.

Yükseltilen dönüştürücünün farklı görev devri ($d=0.25$ ve 0.5) değerlerinde PSIM ve GSSA metoduyla elde edilen benzetişim sonuçları Şekil (4), (5) ve (6)'da sırasıyla gösterilmiştir. DC/DC dönüştürücüleri matematiksel olarak modellemede kullanılan durum uzay ortalama (SSA) modelinin yetersiz kaldığı şekillerden anlaşılmalıdır. Fakat GSSA modelin PSIM modeline ne kadar benzer olduğu görülmektedir. Ayrıca $k=0$. harmonik yaklaşım modelinin SSA modeliyle aynı sonuçları verdiği gözükmektedir.

5. SONUÇLAR

Bu çalışmada, PSIM programı ile yapılan gerçek zaman benzetişimi, durum uzay ortalama (SSA) ve genelleştirilmiş durum uzay ortalama (GSSA) yöntemleriyle yapılan yükseltilen DC/DC dönüştürücü benzetişim sonuçları karşılaştırılmıştır. Karşılaştırmalar sonucunda, GSSA yönteminin temel DC/DC dönüştürücülerde mükemmel sonuç verdiği gözlemlenmiştir. Bu yöntemde, k 'nın ne kadar çok terimini hesaba katarsak kesin topoloji (gerçek-zaman) sonuçlarına daha yaklaşılabileceği anlaşılmaktadır.

KAYNAKLAR

- [1] Ünlü N., Karahan Ş., Tür O., Uçarol H., Özsu E., Yazar A., Akgün F., Tırıs M., "Elektrikli Araçlar, ". TÜBİTAK-Marmara Araştırma Merkezi Enerji Sistemleri ve Çevre Araştırma Enstitüsü, Gebze-Kocaeli, Eylül 2003.
- [2] Mahdavi J., Emadi A., Bellar M. D., Ehsani M., "Analysis of Power Electronic Converters Using the Generalized State Space Averaging Approach," in Proc. IEEE Trans. On Circuits and Systems I: Fundamental Theory and Applications, Vol. 44, No. 8, Aug. 1997, pp. 767-770.
- [3] Sanders S. R., Noworolski J. M., Liu X. Z., Verghese G. C., "Generalized Averaging Method for Power Conversion Circuits," in Proc. IEEE Trans. On Power Electronics, Vol. 6, No. 2, April 1991, pp.251-259.
- [4] Emadi A., "Modelling and Analysis of Multi-Converter DC Power Electronic Systems Using the Generalized State Space Averaging Method," in Proc. IEEE Trans. On Industrial Electronics, Vol.51, No. 3, June 2004, pp. 661-668.
- [5] Krein P. T., Bentsman J., Bass R. M., Lesieutre B., "On the Use of Averaging for the Analysis of Power Electronic Systems," in Proc. IEEE Trans. On Power Electronics, Vol. 5, No. 2, 1990, pp. 182-190.
- [6] Altınay M., Amaç E.A., Karakaş E., "İdeal Bir DC/DC Buck Dönüştürücünün Genelleştirilmiş Durum Uzay Ortalama Metodu İle Modellenmesi.", I.Enerji Verimliliği ve Kalitesi Sempozyumu, Kocaeli, Mayıs 2005.