# Sanal Atalet ve Sönümleme Kontrolüyle Frekans Desteği Sağlayan BESS'nin Haberleşme Gecikmesi Altında Güç ve Enerji Boyutlandırılması

# *Power and Energy Sizing of a BESS with Virtual Inertia and Damping Control for Frequency Support under Communication Delay*

*Ahmet Hüsrev İPEKLİ[1], Hıdır DÜZKAYA[2]*

[1]Enerji Piyasası Düzenleme Kurumu, Ankara, Türkiye; Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Elektrik-Elektronik Mühendisliği Ana Bilim Dalı, Ankara, Türkiye
ahusrev.ipekli@gazi.edu.tr

[2]Gazi Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümü, Ankara, Türkiye
hduzkaya@gazi.edu.tr

***Özet***

*Rüzgâr ve güneş enerjisi gibi kesintili yenilenebilir enerji kaynaklarının elektrik güç sistemlerindeki payının artması, sistem ataletinin azalmasına ve frekans kararlılığının olumsuz etkilenmesine neden olmaktadır. Batarya enerji depolama sistemleri (Battery Energy Storage Systems, BESS), sanal atalet ve sönümleme (Virtual Inertia and Damping, VID) kontrol yöntemleri sayesinde geleneksel senkron jeneratörlerin atalet ve sönümleme özelliklerini taklit ederek frekans kararlılığına katkı sağlayabilmektedir. Bu çalışmada, bir bölgeli yük-frekans kontrol sistemine entegre edilen VID kontrollü BESS'in güç ve enerji boyutlandırması ele alınmıştır. MATLAB/Simulink ortamında oluşturulan modelde farklı yük değişimleri ve haberleşme gecikmeleri altında frekans cevabı, BESS tepe gücü, gerekli enerji salınımı ve enerji çevrimi incelenmiştir. Gecikme kararlılığı maksimum izin verilebilir gecikme sınırı (Maximum Allowable Delay Bound, MADB) üzerinden değerlendirilmiş; haberleşme gecikmesinin bu sınıra yaklaşmasının BESS güç ve enerji kullanımına etkisi araştırılmıştır. Elde edilen sonuçlar kullanılarak BESS'nin gerekli minimum gücünün ve enerji kapasitesinin belirlenmesine yönelik bir boyutlandırma yaklaşımı sunulmuş; frekans desteği performansı, gecikme kararlılığı ve BESS kapasite gereksinimleri ortak bir çerçevede değerlendirilmiştir.*

***Anahtar kelimeler:*** *BESS, BESS boyutlandırması, frekans kararlılığı, sanal atalet, sanal sönümleme, zaman gecikmesi.*

***Abstract***

*The increasing share of intermittent renewable energy sources, such as wind and solar, in electrical power systems reduces system inertia and adversely affects frequency stability. Battery energy storage systems (BESS) can contribute to frequency stability by emulating the inertia and damping characteristics of conventional synchronous generators through virtual inertia and damping (VID) control methods. This study addresses the power and energy sizing of a VID-controlled BESS integrated into a single-area load-frequency control system. In the model developed in the MATLAB/Simulink environment, the frequency response, BESS peak power, required energy swing, and energy throughput were investigated under different load changes and communication delays. Delay stability was evaluated using the maximum allowable delay bound (MADB), and the effect of communication delay approaching this limit on BESS power and energy utilization was investigated. Using the obtained results, a sizing approach was proposed to determine the minimum required power and energy capacity of the BESS; frequency-support performance, delay stability, and BESS capacity requirements were evaluated within a common framework.*

***Keywords:*** *BESS, BESS sizing, frequency stability, virtual inertia, virtual damping, communication delay.*

## 1. Giriş

Elektrik üretiminde kesintili yenilenebilir enerji kaynaklarının kullanılması çeşitli avantajlar sağlamakla birlikte şebeke kararlılığının korunmasına ilişkin birtakım zorlukları da beraberinde getirmektedir [1]. Bunlardan en önemlisi, bu santrallerin doğası gereği kesintili üretim yapmaları nedeniyle yük-frekans kontrolünü (Load-Frequency Control, LFC) zorlaştırmaları ve güç elektroniği tabanlı dönüştürücüler

aracılığıyla şebekeye bağlandıklarından dolayı şebekeye atalet desteği sağlayamamalarıdır [2]. Bununla birlikte, elektrik şebekesinde senkron jeneratörlerin yerini alması, sistemin toplam atalet ve sönümleme kabiliyetinin azalmasına da neden olmaktadır [3]. Bu durum şebekedeki frekans salınımlarının kontrolünü daha güç hâle getirmektedir. Bu nedenle, şebekeye ilave atalet desteği sağlayarak şebeke kararlılığını ve yenilenebilir enerji kaynaklarının penetrasyonunu artıracak yeni kontrol yöntemlerinin geliştirilmesi gerekmektedir [4]. Literatürde bu amaçla kullanılan yöntemlerden biri VID kontrolüdür. VID kontrolü altında BESS'ler senkron jeneratörlerin döner kütlelerinde depolanan kinetik enerjinin sağladığı atalet ve sönümleme etkisini taklit ederek elektrik şebekesine VID desteği sağlayabilmektedir [5].

Literatürde kullanılan VID emülasyon topolojileri üç ana kategoriye ayrılmaktadır [4]. i) Senkron jeneratör modeli tabanlı topoloji: Bu topolojide, sanal atalet tepkisi oluşturulurken senkron jeneratörlerin mekanik ve elektriksel özellikleri modellenerek senkron jeneratör davranışı sanal olarak elde edilmektedir [1]. ii) Salınım denklemi tabanlı topoloji: Bu topolojide tüm senkron jeneratör modeli değil, yalnızca salınım denklemi modellenmektedir. Bu yaklaşımda invertörün aktif çıkış gücü, şebeke frekansındaki değişimlere göre ayarlanmaktadır [6]. iii) Frekans-güç cevabı tabanlı topoloji: Bu topoloji, senkron jeneratörlerin aktif çıkış gücünün frekanstaki değişimlere verdiği tepkiye dayanmaktadır [7]. Her üç topoloji de düşük ataletli sistemlerde frekans kontrolünü destekleyerek şebekeye bağlanabilecek yenilenebilir enerji kapasitesini artırmaktadır [8].

LFC sistemlerinde iyileştirilmesi gereken bir diğer konu ise ortaya çıkan zaman gecikmeleridir [9]. Kontrol sistemlerinde zaman gecikmeleri; sistemdeki elektriksel büyüklüklerin ölçülmesi, ölçülen sinyallerin denetleyiciye iletilmesi ve oluşturulan kontrol sinyallerinin geri gönderilmesi aşamalarında meydana gelmektedir. Özellikle LFC sistemleri gibi kararlılığı zaman gecikmesine bağlı olan sistemlerde, zaman gecikmesinin sistemin MADB'sini aşması durumunda kontrol sistemi kararlılığını koruyamamaktadır [10]. Bu nedenle, LFC sistemlerinde yeni kontrol ve analiz tekniklerinin uygulanması gerekmektedir [11-12].

LFC sisteminin MADB'sinin hesaplanması amacıyla zaman ve frekans düzlemi yöntemleri kullanılmaktadır [13]. Zaman alanı yöntemleri genellikle Lyapunov–Krasovskii ve Lyapunov–Razumikhin teoremlerine dayanmakta; elde edilen kararlılık koşulları Riccati denklemleri veya doğrusal matris eşitsizlikleri aracılığıyla sayısal olarak çözülmektedir. Bu yöntemlerin temel avantajı, sabit ve zamanla değişen gecikmelere sahip sistemlere uygulanabilmeleridir [14]. Bununla birlikte, seçilen Lyapunov fonksiyonuna bağlı olarak gerçek maksimum gecikme değerinden daha düşük sonuçlar elde edilebilmektedir.

Frekans alanı yöntemlerinde, karakteristik köklerin sanal ekseni kestiği kritik frekanslar ve bunlara karşılık gelen gecikme değerleri belirlenmektedir. Sistemin kararlı olduğu doğrulandıktan sonra, köklerin sol yarı düzlemden sağ yarı düzleme geçmesine neden olan en küçük pozitif kritik gecikme değeri MADB olarak kabul edilmektedir. Frekans alanı yöntemleri, zaman alanı yöntemlerine göre genellikle gerçek kararlılık sınırına daha yakın sonuçlar vermektedir [15]. Üstel terimlerin ortadan kaldırılması ve Rekasius dönüşümü, zaman gecikmeli LFC sistemlerinde MADB'nin hesaplanmasında yaygın olarak kullanılan frekans alanı yöntemleridir.

Bu çalışmada, haberleşme gecikmesi içeren bir bölgeli LFC sistemine VID kontrollü BESS entegre edilerek sistemin frekans kararlılığı ile BESS'in VID kontrolü kapsamındaki güç ve enerji gereksinimleri birlikte incelenmiştir. Literatürde aynı sistem ve kontrol parametreleri için daha önce belirlenmiş olan MADB değeri esas alınmış ve bu sınır MATLAB/Simulink benzetimleriyle doğrulanmıştır. Ardından, farklı yük değişimleri ve haberleşme gecikmeleri altında sistemin frekans cevabı, gerekli minimum BESS gücü ve gerekli enerji miktarı değerlendirilmiştir. Elde edilen sonuçlardan hareketle, frekans desteği sağlayan BESS'nin güç ve enerji kapasitesinin belirlenmesine yönelik MADB tabanlı bir boyutlandırma yaklaşımı sunulmuştur.

Çalışmanın ikinci bölümünde, VID kontrollü BESS içeren bir bölgeli LFC sisteminin yapısı ve kontrol modeli açıklanmıştır. Üçüncü bölümde, haberleşme gecikmesinin MADB'ye göre normalize edilmesi ve bu değer ile BESS güç ve enerji gereksinimlerini ilişkilendiren boyutlandırma yöntemi sunulmuştur. Dördüncü bölümde, MATLAB/Simulink benzetimlerinden elde edilen frekans cevabı, gecikme kararlılığı, BESS güç ve enerji gereksinimi ile ilgili sonuçlar değerlendirilmiştir. Son bölümde ise çalışmanın temel bulguları ve uygulamaya yönelik çıkarımlar sunulmuştur.

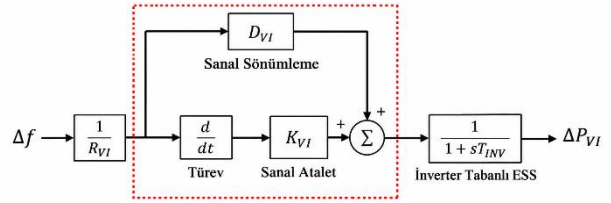
## 2. Bir Bölgeli LFC Sisteminin Sanal Atalet ve Sönümleme Kontrol Çevrimi ile Modellenmesi

Bu çalışmada kullanılan VID kontrol yapısı, frekans değişim hızına (RoCoF) bağlı VI ve frekans sapmasına bağlı VD bileşenlerinden oluşmaktadır. RoCoF tabanlı VI yaklaşımı Rakhshani ve Rodriguez tarafından güç sistemlerine uygulanmış [16], VI ve VD işlevlerinin birlikte uygulanmasına dayanan kontrol yapısı ise Kerdphol vd. tarafından geliştirilmiştir [17]. Bu çalışma kapsamında oluşturulan VID kontrollü BESS'in sisteme entegrasyonunu gösteren blok diyagramı Şekil 1'de verilmiştir. VID kontrol sistemi; BESS, invertör ve VID kontrol ünitesinden oluşmaktadır. Eklenen kontrol çevrimi ile invertör tabanlı BESS'in VID desteği sağlaması ve böylece sistemin frekans kararlılığının iyileştirilmesi amaçlanmıştır.

VID çevriminin davranışına ilişkin denklem Eşitlik 1'de verilmiştir. Eşitlikte yer alan $\Delta P_{VI}$ frekans değişimine karşılık ESS'nin aktif çıkış gücü değişimini, $K_{VI}$, $D_{VI}$, $R_{VI}$

ve $T_{INV}$ ise sırasıyla VI sabiti, VD sabiti, VI drop sabiti ve enerji depolama tesisinin zaman sabitidir.

$$\Delta P_{VI}(s) = \frac{sK_{VI}+D_{VI}}{1+T_{INV}}\left(\frac{\Delta f(s)}{R_{VI}}\right) \quad (1)$$




**Şekil 1**. Sanal atalet ve sönümle kontrolü blok diyagramı

Haberleşme gecikmesi ve VID kontrolü içeren bir bölgeli LFC sistemi Şekil 2'de gösterilmektedir. Modelde frekansın düzenlenmesi amacıyla primer frekans kontrolü, sekonder frekans kontrolü ve VID kontrolü birlikte kullanılmaktadır. Primer frekans kontrolü, hız regülatörünün droop karakteristiği aracılığıyla üretim–tüketim dengesizliğine hızlı tepki vererek frekans sapmasını sınırlandırmaktadır. Sekonder frekans kontrolü ise kalıcı frekans hatasını gidererek sistem frekansını nominal değerine döndürmektedir. BESS üzerinden gerçekleştirilen VID kontrolü, VI bileşeniyle frekans değişim hızına, VD bileşeniyle ise frekans sapmasına bağlı olarak aktif güç desteği sağlayarak sistemin dinamik frekans cevabını iyileştirmektedir.

Şebekedeki yük değişimi ile üretilen mekanik güç arasındaki ilişki, Eşitlik 2'deki senkron jeneratörlerin salınım denklemleriyle ifade edilmektedir [10].

$$\Delta P_M(s) - \Delta P_L(s) = (2Ms + D)\Delta f(s) \quad (2)$$

Eşitlik 2'de yer alan; $\Delta P_M$, $\Delta P_L$ and $\Delta f$ mekanik güç, yük ve frekanstaki değişikliklerdir. $M$ atalet katsayısı, $D$ ise sistemin sönümleme katsayısıdır.

Şekil 2'de gösterilen PI kontrolörü ile VID kontrollü LFC sisteminin karakteristik denklemi Eşitlik 3'te verilmiştir.

$$\Delta(s^{\lambda},\tau) = P(s,\lambda) + Q(s,\lambda)e^{-s\tau} = (p_7 s^7 + p_6 s^6 + p_5 s^5 + p_4 s^4 + p_3 s^3 + p_2 s^2 + p_1 s^1) + (q_4 s^4 + q_3 s^3 + q_2 s^2 + q_1 s^1 + q_0)e^{-s\tau} \quad (3)$$

## 3. MADB Değerinin Belirlenmesi ve BESS Boyutlandırma Yöntemi

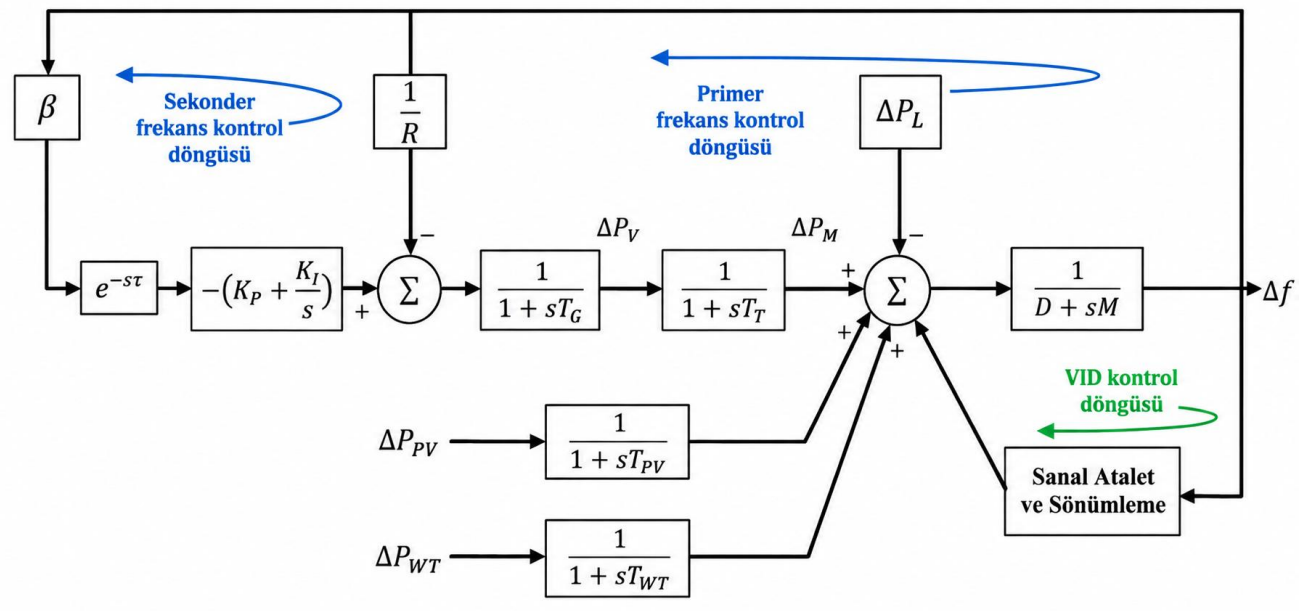
### 3.1. MADB Değerinin Belirlenmesi

Bir sistemin belirli bir zaman gecikmesi altında kararlı olabilmesi için karakteristik denkleminin tüm köklerinin söz konusu gecikme değerinde karmaşık düzlemin sol yarısında yer alması gerekmektedir. MADB, zaman gecikmesi arttıkça karakteristik kök çiftinin sanal ekseni geçerek sağ yarı düzleme yöneldiği en küçük pozitif kritik gecikme değeri olarak tanımlanmaktadır. Şekil 2'de verilen sistemin karakteristik denkleminde üstel gecikme terimi bulunduğundan köklerin doğrudan hesaplanması güçtür. Bu nedenle MADB, karakteristik kök çiftinin sanal ekseni kestiği kritik frekans belirlenerek hesaplanabilmektedir. Kullanılan yöntem, zaman gecikmeli LFC sistemlerinde uygulanan üstel terimlerin ortadan kaldırılmasına dayalı bir frekans alanı yaklaşımıdır [10].

Şekil 2'de verilen VID kontrollü sistemin karakteristik denklemi üzerinden yapılan ve $K_P$=0,2, $K_I$=0,2, $K_{VI}$=1,6 ve $D_{VI}$=1,2 değerleri esas alınarak yapılan hesaplamalar neticesinde MADB değeri 8,7691 olarak hesaplanmıştır [10].

### 3.2. Normalize Gecikme Oranının Belirlenmesi ve Benzetim Senaryoları

Haberleşme gecikmesinin sistemin gecikme dayanımına göre ifade edilebilmesi amacıyla boyutsuz normalize gecikme oranı Eşitlik 4'deki gibi tanımlanmıştır:




**Şekil 2**. Sanal atalet ve sönümleme kontrol döngüsü eklenmiş bir bölgeli LFC sistemi

$$\rho d = \frac{T_d}{MADB} \quad (4)$$

Burada $T_d$, sisteme uygulanan haberleşme gecikmesini ifade etmekte olup, $\rho_d$<1 kararlı çalışma bölgesini, $\rho_d$=1 MADB sınırını ve $\rho_d$>1 ise kararlılık sınırının aşıldığı bölgeyi göstermektedir. Normalize gecikme oranı yeni bir kararlılık ölçütü olmayıp, farklı gecikme değerlerinin hesaplanan MADB'ye göre karşılaştırılmasını sağlayan boyutsuz bir gösterimdir. Bu çalışma kapsamında yapılan simülasyonlar, $T_d$ değerinin sırasıyla MADB'nin 0, 0,5, 0,7, 0,8, 0,9, 1,0 ve 1,05 katı olarak belirlenmesiyle gerçekleştirilmiştir. Böylece haberleşme gecikmesinin kararlılık sınırına yaklaşmasının ve bu sınırı aşmasının BESS'in minimum güç gereksinimi, gerekli enerji rezervi ve enerji çevrimi üzerindeki etkileri incelenmiştir.

### 3.3. VID Kontrolü İçin BESS Güç ve Enerji Boyutlandırması

VID kontrolü için BESS'nin sahip olması gereken minimum güç değeri, inverter üzerinden sağlanması veya soğurulması gereken en yüksek aktif güç değeri olarak; minimum enerji değeri ise VID kontrolünün gerçekleştirilmesi için gerekli enerji miktarı olarak tanımlanmıştır. Çalışma kapsamında her bir senaryo için BESS'nin tepe güç değeri belirlenmiş, kararlı senaryolar arasındaki en yüksek tepe güç değeri minimum gerekli BESS gücü olarak kabul edilmiş ve bu değere 0,2 oranında tasarım marjı uygulanarak nominal BESS gücü hesaplanmıştır. BESS'nin enerji gereksinimi ise sağlanan güç desteğinin büyüklüğü ve süresi birlikte dikkate alınarak belirlenmiş; her senaryo için güç-zaman eğrisinin integraliyle enerji yörüngesi elde edilmiş ve bu yörüngenin maksimum ve minimum değerleri arasındaki fark gerekli enerji miktarı olarak tanımlanmıştır. Kararlı senaryolar içerisindeki en yüksek enerji gereksinimi, BESS'nin minimum kullanılabilir enerji gereksinimi olarak Eşitlik 5'te verildiği şekilde belirlenmiştir.

$$E_{BESS,min} = max\left[\max_t\left(\frac{1}{3600}\int_0^t P_{BESS}(\tau)\,d\tau\right) - \min_t\left(\frac{1}{3600}\int_0^t P_{BESS}(\tau)\,d\tau\right)\right] \quad (5)$$

## 4. Analizler

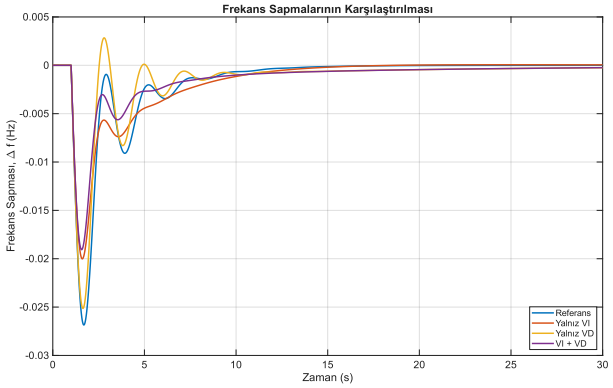
### 4.1. VID'nın Sistemin Frekans Kararlılığına Etkisi

VID kontrolü içermeyen referans LFC sistemi ile yalnızca VI, yalnızca VD ve VID kontrolü içeren sistemlerin ani yük artışı karşısındaki frekans tepkileri Şekil 3'te verilmiştir.

Referans durumda ani yük artışının ardından frekans nadirin mutlak büyüklüğü 0,030061 Hz olarak gerçekleşmiştir. Referans duruma göre yalnızca VI kontrolünün uygulanmasıyla frekans nadirinin mutlak büyüklüğünde %27,33, yalnızca VD kontrolünün uygulanmasıyla %7,38 ve VID kontrolünün uygulanmasıyla %31,29 iyileşme sağlanmıştır.

Ani yük artışının ardından maksimum mutlak RoCoF referans durumda 0,060946 Hz/s olarak gerçekleşmiştir. Yalnızca VI kontrolünün uygulanmasıyla bu değerde %0,30 oranında iyileşme sağlanırken, yalnızca VD kontrolü uygulandığında RoCoF değeri referans durumla hemen hemen aynı kalmıştır.

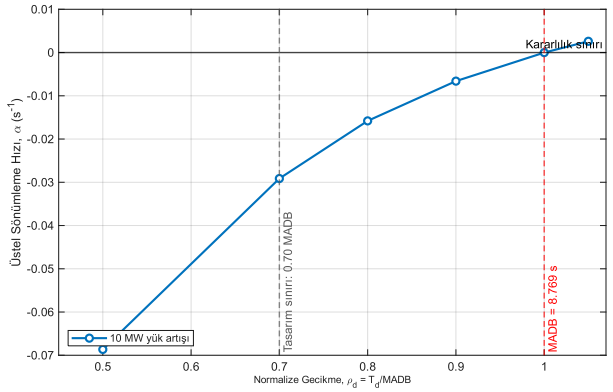
Elde edilen sonuçlar incelendiğinde, VI bileşeninin ilk frekans düşüşünün sınırlandırılmasına katkı sağladığı, VD bileşeninin ise frekans salınımlarının bastırılması ve sistem cevabının daha hızlı sönümlenmesi üzerinde etkili olduğu görülmektedir. VI ve VD bileşenlerinin birlikte uygulanması, ilk frekans düşüşü ile salınımların sönümlenmesi arasında daha dengeli bir geçici rejim cevabı sağlamıştır. Mevcut sistem ve kontrol parametreleri altında VID kontrolünün belirgin kazanımının frekans nadir ve salınım davranışı üzerinde ortaya çıktığı görülmüştür.




**Şekil 3**. VI, VD ve VID kontrolü altında sistem frekans cevapları

### 4.2. MADB Tabanlı Gecikme Kararlılığının Doğrulanması

Normalize edilmiş gecikmeye bağlı üstel sönümleme hızı Şekil 4'te gösterilmiştir.



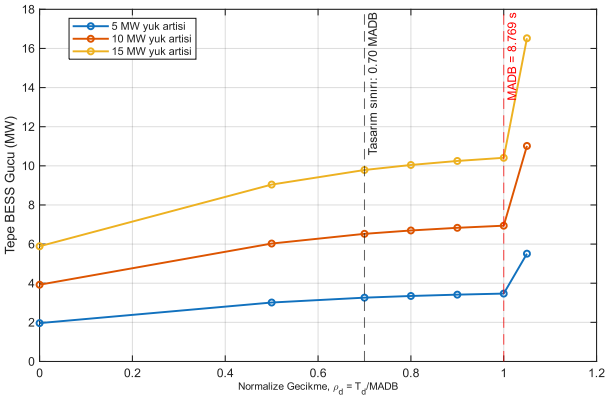

**Şekil 4**. Normalize edilmiş gecikmeye bağlı üstel sönümleme hızı

Şekil 4'te, $\rho_d$<1 bölgesinde üstel sönümleme hızının negatif olması salınımların üstel olarak sönümlendiğini, $\rho_d$=1 noktasında sıfıra yaklaşması sistemin marjinal kararlılık sınırına ulaştığını, $\rho_d$=1,05'te pozitif olması ise salınımların büyüdüğünü göstermektedir. Elde edilen bu sonuçlarla referans çalışmadan alınan 8,769 s MADB değeri zaman bölgesi benzetimleriyle doğrulanmıştır. Gecikme değeri MADB'ye yaklaştıkça salınımların sönümlenmesi yavaşlamış; üstel sönümleme hızı mutlak

değeri $\rho_d$=0,50, 0,70 ve 0,90 için sırasıyla yaklaşık 0,0687, 0,0291 ve 0,00661 $s^{-1}$ olarak elde edilmiştir. Bu sonuç, sistem MADB'nin altında kararlı olsa dahi sınıra yaklaşıldıkça sönümleme performansının zayıfladığını göstermektedir. Yük değişiminin büyüklüğü, incelenen lineer modelde MADB değerini değiştirmezken, BESS'nin güç ve enerji gereksinimlerini artırmıştır. Kararlılık sınırının altındaki davranışı temsil etmek amacıyla $\rho_d$=0,70 ara inceleme noktası olarak kullanılmıştır; bu değer bir kararlılık veya tasarım sınırı olarak değerlendirilmemiştir.

### 4.3. BESS Güç ve Enerji Gereksinimleri

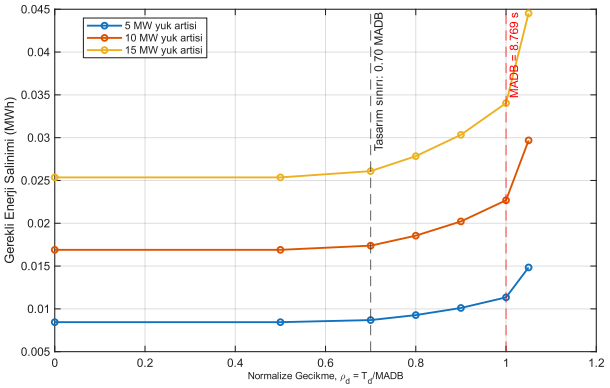
Farklı yük artışları için BESS tepe güç gereksiniminin normalize edilmiş gecikmeye bağlı değişimi Şekil 5'te gösterilmiştir. Gecikmesiz durumda 5, 10 ve 15 MW yük artışları için tepe güç gereksinimleri sırasıyla 1,961, 3,923 ve 5,888 MW olarak gerçekleşmiştir. Kararlı bölgedeki davranışı karşılaştırmak amacıyla ele alınan $\rho_d$ =0,70 seviyesinde bu değerler 3,262, 6,524 ve 9,787 MW'a yükselmiş ve gecikmesiz duruma göre %66,33 artmıştır. BESS tepe güç gereksiniminin yük artışıyla yaklaşık doğrusal olarak arttığı görülmüştür. MADB sınırının aşıldığı $\rho_d$=1,05 durumunda ise sistem kararsız olduğundan elde edilen değerler BESS boyutlandırmasında dikkate alınmamıştır.



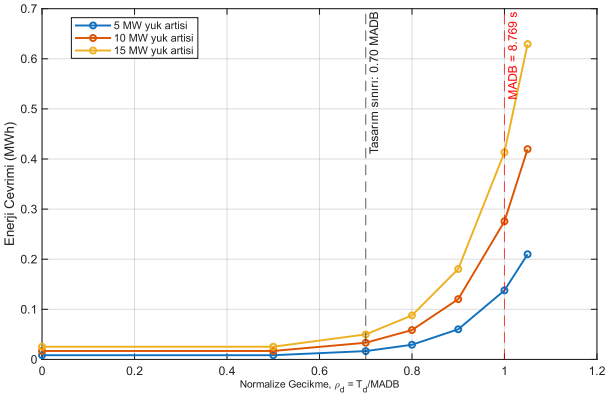

**Şekil 5.** Normalize gecikmeye bağlı BESS tepe güç gereksinimi.

BESS'nin gerekli kullanılabilir enerji miktarı, güç-zaman eğrisinin integralinden elde edilen enerji salınımı üzerinden değerlendirilmiştir. Şekil 6'da görüldüğü üzere $\rho_d$=0,70 seviyesinde 5, 10 ve 15 MW yük artışları için gerekli enerji sırasıyla 0,00869, 0,01738 ve 0,02609 MWh olarak hesaplanmıştır. 5 MW'lık yük artışı için gerekli enerji, gecikmesiz duruma göre $\rho_d$=0,70'te yalnızca %2,90 artarken MADB sınırında %34,29 artmıştır. Dolayısıyla gecikmenin tepe güç gereksinimi üzerindeki etkisinin, gerekli enerji miktarı üzerindeki etkisinden daha belirgin olduğu görülmüştür.

Enerji çevrimi ise BESS'nin benzetim süresince gerçekleştirdiği toplam şarj ve deşarj faaliyetini göstermek amacıyla değerlendirilmiştir. Şekil 7 incelendiğinde, 5 MW yük artışı için enerji çevrimi gecikmesiz duruma kıyasla $\rho_d$=0,70'te %97,24, MADB sınırında ise yaklaşık %1532 artmıştır. Bu artış, MADB'ye yaklaşıldıkça azalan sönümleme nedeniyle BESS'nin tekrarlanan güç alışverişinin önemli ölçüde arttığını göstermektedir. Dolayısıyla sistem kararlı bölgede bulunsa dahi MADB'ye yakın çalışma BESS'nin çevrim yükünü önemli ölçüde artırabilmektedir.




**Şekil 6.** Normalize gecikmeye bağlı gerekli BESS enerji salınımı.




**Şekil 7.** Normalize edilmiş gecikmeye bağlı BESS enerji çevrimi

### 4.4. BESS Boyutlandırma Sonuçları ve Şebeke Kararlılığı Açısından Değerlendirme

BESS boyutlandırmasında güç, kullanılabilir enerji ve haberleşme gecikmesi farklı tasarım büyüklükleri olarak ele alınmıştır. BESS güç gereksinimi, kararlı çalışma bölgesinde ortaya çıkan tepe güç talebine; kullanılabilir enerji gereksinimi ise güç-zaman eğrisinden elde edilen enerji salınımına göre belirlenmiştir. Haberleşme gecikmesinin teorik üst sınırı referans çalışmadan alınan ve zaman bölgesi benzetimleriyle doğrulanan MADB değeriyle sınırlandırılmıştır. Kararlı bölgedeki boyutlandırmayı örneklemek amacıyla $\rho_d$=0,70 zaman gecikmesi seviyesi için elde edilen sonuçlar Tablo 1'de verilmiştir.

**Tablo 1.** ρd=0,70 için BESS boyutlandırma sonuçları

| Yük artışı (MW) | Tepe güç (MW) | Önerilen güç (MW) | Enerji salınımı (MWh) | En küçük nominal enerji (MWh) |
|---|---|---|---|---|
| 5 | 3.262 | 3.915 | 0.00869 | 0.01829 |
| 10 | 6.524 | 7.829 | 0.01738 | 0.03660 |
| 15 | 9.787 | 11.745 | 0.02609 | 0.05493 |

İncelenen en büyük bozucu olan 15 MW yük artışı için ρ

$_d$=0,70 seviyesinde 9,787 MW tepe güç ve 0,02609 MWh kullanılabilir enerji gereksinimi elde edilmiştir. Tepe güç değerine %20 tasarım payı uygulanarak 11,745 MW önerilen BESS gücü belirlenmiştir. Kullanılabilir SOC aralığı ve enerji tasarruf payı dikkate alındığında, en küçük nominal enerji kapasitesi 0,05493 MWh olarak hesaplanmıştır. Kararsız bölgede elde edilen güç ve enerji değerleri, büyüyen salınımların sonucu olduğundan boyutlandırmada dikkate alınmamıştır.

## 5. Sonuçlar

Bu çalışmada, haberleşme gecikmesi içeren bir bölgeli LFC sistemine entegre edilen VID kontrollü BESS'nin frekans kararlılığı ile güç ve enerji gereksinimleri birlikte incelenmiştir. Referans çalışmadan alınan 8,769 s MADB değeri zaman bölgesi benzetimleriyle doğrulanmış ve farklı gecikme seviyeleri MADB'ye göre normalize edilerek değerlendirilmiştir. Sonuçlar, gecikme değerinin MADB'ye yaklaştıkça frekans salınımlarının sönümlenmesinin yavaşladığını ve BESS üzerindeki güç gereksinimi ile enerji çevriminin arttığını göstermiştir.

VID kontrolünün referans sisteme göre frekans nadiri iyileştirdiği, BESS tepe güç ve kullanılabilir enerji gereksiniminin ise yük değişiminin büyüklüğüyle doğrusal olarak arttığı belirlenmiştir. Ayrıca haberleşme gecikmesinin artması, BESS'nin tepe güç ve enerji gereksinimini artırırken, MADB'ye yaklaşıldıkça salınımların daha yavaş sönümlenmesine bağlı olarak enerji çevriminin belirgin biçimde arttığı görülmüştür.. Kararlı bölgedeki örnek boyutlandırmada, 15 MW yük artışı ve $\rho_d$=0,70 için 9,787 MW tepe güç ve 0,02609 MWh kullanılabilir enerji gereksinimi elde edilmiş; tasarım paylarının uygulanmasıyla 11,745 MW güç ve 0,05493 MWh nominal enerji kapasitesi belirlenmiştir.

Sonuç olarak, VID tabanlı frekans desteği sağlayan BESS'nin boyutlandırılmasında yalnızca güç ve enerji gereksinimlerinin değil, haberleşme gecikmesinin kararlılık sınırına göre konumunun ve MABD'ye yaklaştıkça artan enerji çevriminin de dikkate alınması gerektiği ortaya konulmuştur. Bu çerçevede MADB, zaman gecikmesinin kararlılık açısından değerlendirilmesinde; zaman bölgesi benzetimleri ise BESS'nin güç ve enerji gereksinimlerinin belirlenmesinde birlikte kullanılarak gecikme etkisini BESS boyutlandırmasına dâhil eden bütünleşik bir değerlendirme yaklaşımı sunmaktadır.

## 6. Kaynaklar


[1] R. Yan, T. K. Saha, N. Modi, N. Masood, and M. Mosadeghy, "The combined effects of high penetration of wind and PV on power system frequency response," *Applied Energy*, vol. 145, pp. 320–330, May 2015.

[2] B. Kroposki et al., "Achieving a 100% Renewable Grid: Operating Electric Power Systems with Extremely High Levels of Variable Renewable Energy," in IEEE Power and Energy Magazine, vol. 15, no. 2, pp. 61-73, March-April 2017,

[3] P. Marocco, R. Novo, A. Lanzini, G. Mattiazzo, and M. Santarelli, "Towards 100% renewable energy systems: The role of hydrogen and batteries," Journal of Energy Storage, vol. 57, *p.* 106306, Jan. 2023

[4] Frequency Stability Evaluation Criteria for the Synchronous Zone of Continental Europe: Requirements and Impacting Factors, European Network of Transmission System Operations for Electricity (ENTSO-E), Brussels, Belgium, 2016.

[5] T. Kerdphol, F. S. Rahman, M. Watanabe, and Y. Mitani, Virtual Inertia Synthesis and Control, 1st ed. Cham, Switzerland: Springer International Publishing, 2021.

[6] H.-P. Beck and R. Hesse, "Virtual synchronous machine," in *Proc. 9th Int. Conf. Electrical Power Quality and Utilisation (EPQU)*, Barcelona, Spain, 2007, pp. 1–6.

[7] K. Sakimoto, Y. Miura, and T. Ise, "Stabilization of a power system with a distributed generator by a virtual synchronous generator function," in *Proc. 8th Int. Conf. Power Electronics–ECCE Asia*, Jeju, South Korea, 2011, pp. 1498–15051.

[8] J. Driesen and K. Visscher, "Virtual synchronous generators," *2008 IEEE Power and Energy Society General Meeting - Conversion and Delivery of Electrical Energy in the 21st Century*, Pittsburgh, PA, USA, pp. 1-3 2008.

[9] U. Tamrakar, D. Shrestha, M. Maharjan, B. P. Bhattarai, T. M. Hansen, and R. Tonkoski, "Virtual Inertia: Current Trends and Future Directions," Applied Sciences, vol. 7, no. 7, p. 654, Jun. 2017, doi: 10.3390/app7070654.

[10] S. A. Hasen, Ş. Sönmez, and S. Ayasun, "Enhancement of stability delay margins by virtual inertia control for microgrids with time delay," Turkish Journal of Electrical Engineering and Computer Sciences, vol. 30, no. 6, pp. 2221–2236, Sep. 2022.

[11] C. Jin, K. Gu, S. Niculescu, and I. Boussaada, "Stability Analysis of Systems with Delay-Dependent Coefficients: An Overview," IEEE Access, vol. 6, pp. 27392–27407, Jan. 2018.

[12] C. Zhang, L. Jiang, Q. H. Wu, Y. He, and M. Wu, "Delay-Dependent robust load frequency control for time delay power systems," IEEE Transactions on Power Systems, vol. 28, no. 3, pp. 2192–2201, Aug. 2013.

[13] B. Naduvathuparambil, M. C. Valenti, and A. Feliachi, "Communication delays in wide area measurement systems," in *Proc. 34th Southeastern Symp. Syst. Theory*, Huntsville, AL, USA, 2002, pp. 118–122.

[14] S. Sönmez and S. Ayasun, "Gain and phase margin based stability analysis of time delayed single area load frequency control system with fractional order PI controller," *J. Fac. Eng. Archit. Gazi Univ.*, vol. 34, no. 2, pp. 945–959, 2019.

[15] J.-H. She, Y. He, and M. Wu, *Stability Analysis and Robust Control of Time-Delay Systems*. Springer, 2010.

[17] E. Rakhshani and P. Rodriguez, "Inertia emulation in AC/DC interconnected power systems using derivative technique considering frequency measurement effects," *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 32, no. 5, pp. 3338–3351, 2017.

[18] T. Kerdphol, F. S. Rahman, M. Watanabe, Y. Mitani, D. Turschner, and H.-P. Beck, "Enhanced virtual inertia control based on derivative technique to emulate simultaneous inertia and damping properties for microgrid frequency regulation," IEEE Access, vol. 7, pp. 14422–14433, 2019.