



Robust sliding mode control strategy for virtual synchronous machine-based grid-forming inverters compliant with GC0137 standard

Mohammed Zaki^{1, 2*}, Haluk Gözde³, M. Cengiz Taplamacıoğlu⁴

¹Department of Electrical Engineering, Faculty of Engineering, 36001, University of Kirkuk, Kirkuk, Iraq

²Department of Electrical and Electronics Engineering, Graduate School of Natural and Applied Sciences, Gazi University, Ankara, Türkiye

³Turkish Aerospace Industries, 06980, Ankara, Türkiye

⁴Department of Electrical and Electronics Engineering, Faculty of Engineering, Gazi University, 06570, Ankara, Türkiye

Highlights:

- A GC0137-compliant SMC for GFMI is proposed
- Improved dynamic performance compared to PI control
- Robust response under frequency and RoCoF disturbances

Keywords:

- GFM-IBR
- Frequency control
- RoCoF
- SMC
- Grid codes

Article Info:

Research Article

Received: 02.09.2025

Accepted: 08.02.2026

DOI:

10.17341/gazimmfd.1776667

Correspondence:

Author: Mohammed Zaki
e-mail: m.zaki@uokirkuk.edu.iq
phone: +90 544 389 8581

Graphical/Tabular Abstract

This study aims to design a robust control strategy for grid-forming inverters (GFMI) that complies with the GC0137 grid code standard. A sliding mode control (SMC) technique is proposed to enhance the dynamic response and robustness of the GFMI to various frequency disturbances. The configuration of the test system used to evaluate the proposed control strategy is presented in Figure A. The system consists of a DC power source, a grid-forming inverter (GFMI), a former, and a transmission line connected to the main grid. The GFMI is controlled using a VSM-based outer loop and a sliding mode control (SMC)-based inner current loop. The point of common coupling (PCC) and the load are also included to analyse the system response under GC0137-compliant frequency-disturbance scenarios.

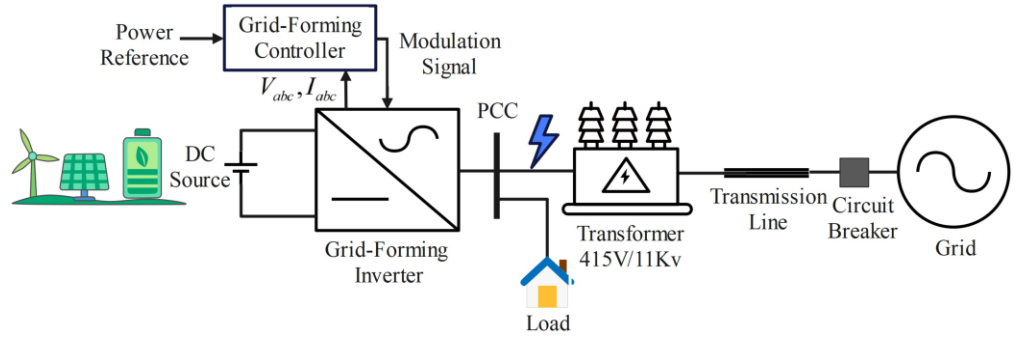


Figure A. Single-line diagram of the test system

Purpose: This study aims to develop a robust current control strategy for three-phase GFMI using an SMC method compliant with the GC0137 grid code standard. The study presents a quantitative comparison between SMC and conventional PI control under frequency disturbance scenarios, including Rate of Change of Frequency (RoCoF) events and frequency ramp tests.

Theory and Methods: The proposed system employs a VSM-based outer active power control loop and a droop-based reactive power control loop, which are cascaded with a PI-based voltage control loop and a nonlinear SMC-based inner current control loop. The Lyapunov stability theory was used to prove the stability of the designed SMC controller. Simulations are carried out in MATLAB/Simulink Simscape™ Electrical, considering parameters such as the short-circuit ratio (SCR) and the reactance-to-resistance ratio (X/R) to accurately reflect realistic grid dynamics.

Results: The SMC-controlled GFMI exhibits superior transient and steady-state performance compared to the conventional PI controller. Quantitative analysis further reveals that, compared to traditional PI control, the proposed SMC reduces reaction time by approximately 13% (0.136 s → 0.118 s) and rise time by 18% (0.17 s → 0.14 s), while slightly lowering the maximum overshoot (21.2% → 20.3%) and improving the damping ratio (0.443 → 0.453). The proposed control shown enhanced robustness against RoCoF events and frequency ramps test scenarios (low, extreme frequency, and full frequency range deviations), confirming SMC's superior tracking and disturbance rejection under GC0137 grid code criteria.

Conclusion: The proposed SMC control strategy enables high dynamic resilience and grid-code compliant active power support, especially under high-stress conditions. Its robust dynamic tracking, strong disturbance rejection, and wide-frequency ride-through (WFRT) capability position it as a viable and reliable solution for future low-inertia power systems with high penetration of inverter-based resources.



Sanal senkron makine tabanlı şebeke oluşturan invertör için GC0137 standardına uyumlu gürbüz kayan kipli kontrol stratejisi

Mohammed Zaki^{1, 2*}, Haluk Gözde³, M. Cengiz Taplamacıoğlu⁴

¹Kerkük Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Elektrik Mühendisliği Bölümü, 36001, Kerkük, Irak

²Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümü, 06570, Ankara, Türkiye

³Türk Havacılık ve Uzay Sanayii, 06980, Ankara, Türkiye

⁴Gazi Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümü, 06570, Ankara, Türkiye

Ö N E Ç İ K A N L A R

- GFMI için GC0137 ile uyumlu SMC önerilmiştir
- PI kontrolüne kıyasla dinamik performans iyileştirilmiştir
- Frekans ve RoCoF bozucuları altında gürbüz tepki sağlanmıştır

Makale Bilgileri

Araştırma Makalesi

Geliş: 02.09.2025

Kabul: 08.02.2026

DOI:

10.17341/gazimmd.1776667

Anahtar Kelimeler:

GFMI-IBR,

Frekans kontrolü,

RoCoF,

SMC,

şebeke kodları

ÖZ

Net sıfır enerji sistemlerine geçiş, elektrik şebekesinde köklü bir dönüşüme yol açmıştır. Geleneksel büyük ölçekli senkron jeneratörlerin yerini invertör tabanlı kaynaklar (Inverter-Based Resources - IBR) alırken, IBR ağırlıklı şebekeye geçiş, sistemin çalışma dinamiklerini önemli ölçüde değiştirmiştir. Ayrıca güneş, rüzgâr gibi yenilenebilir enerji kaynaklarındaki (Renewable Energy Resources – RES) belirsizlikler, frekans ve gerilim dalgalanmalarına neden olarak sistem kararlılığını olumsuz etkilemektedir. Bu nedenle gelişmiş kontrol teknolojilerine sahip şebeke oluşturan invertörler (Grid-Forming Inverter - GFMI), senkronizasyon ve bağımsız bir gerilim kaynağı oluşturma yetenekleri sayesinde giderek daha fazla önem kazanmaktadır. GFMI-IBR'lerin modern güç sistemlerine güvenli entegrasyonu için şebeke kodlarına uyum kritik öneme sahiptir. Bu bağlamda GC0137, Büyük Britanya'da şebeke oluşturan invertör yetkinliğine ilişkin asgari teknik özellikleri tanımlayan bir şebeke kodu değişikliğidir. Bu çalışmada GFMI için GC0137 uyumlu kayan kipli kontrol (Sliding Mode Control - SMC) stratejisi önerilmiştir. MATLAB/Simulink Simscape™ Electrical ortamında gerçekleştirilen analizler, SMC'nin aşırı frekans değişimleri ve frekans değişim hızına (Rate of Change of Frequency – RoCoF) karşı daha dayanıklı olduğunu göstermiştir. PI kontrol ile karşılaştırıldığında, SMC'nin tepki ve yükselme sürelerini iyileştirdiği, aşımı sınırladığı ve sönümleme oranını artırdığı belirlenmiştir. Elde edilen sonuçlar, önerilen yöntemin hem geçici hem de kararlı durumda üstün performans sunduğunu ve GC0137 gereksinimlerini başarıyla karşıladığını göstermektedir.

Robust sliding mode control strategy for virtual synchronous machine-based grid-forming inverters compliant with GC0137 standard

H I G H L I G H T S

- A GC0137-compliant SMC for GFMI is proposed
- Improved dynamic performance compared to PI control
- Robust response under frequency and RoCoF disturbances

Article Info

Research Article

Received: 02.09.2025

Accepted: 08.02.2026

DOI:

10.17341/gazimmd.1776667

Keywords:

GFMI-IBR,

Frequency control,

RoCoF,

SMC,

Grid codes

ABSTRACT

The transition to net-zero energy systems has led to a fundamental transformation in the electrical grid. As conventional large-scale synchronous generators are replaced by inverter-based resources (IBRs), the shift toward an IBR-dominated grid has significantly altered system dynamics. In addition, uncertainties associated with renewable energy resources (RES), such as solar and wind, thereby causing frequency and voltage fluctuations and adversely affecting system stability. Therefore, grid-forming inverters (GMIs) equipped with advanced control technologies are gaining increasing importance due to their capabilities for synchronization and operate as independent voltage sources. Compliance with grid codes is critical for the secure integration of GFM-IBRs into modern power systems. In this context, GC0137 is a grid code amendment that defines the minimum technical requirements for grid-forming inverter capability in Great Britain. In this study, a sliding mode control (SMC) strategy compliant with GC0137 is proposed for GFMI. Analyses conducted in MATLAB/Simulink Simscape™ Electrical demonstrate that SMC provides enhanced robustness against severe frequency deviations and high rates of change of frequency (RoCoF). Compared to PI control, SMC improves response and rise times, limits overshoot, and increases the damping ratio. The results confirm superior performance under both transient and steady-state conditions while satisfying GC0137 requirements.

1. Giriş (Introduction)

Modern güç sistemleri, senkron makine tabanlı güç ağlarından güç elektroniği ve dönüştürücü tabanlı güç ağlarına geçiş sürecindedir. IBR'lerin artması ve senkron makinelerin sayısının kademeli olarak azalmasıyla birlikte, çağdaş güç sistemleri düşük atalet ve sınırlı kısa devre akım kapasitesi gibi zorluklarla karşı karşıya kalmaktadır. Sonuç olarak, aktif dağıtım şebekesinin ortak bağlantı noktasında (Point of Common Coupling - PCC) gerilim ve frekans dalgalanmalarının artmasına neden olmaktadır. Günümüzde, mevcut IBR'lerin çoğu, faz kilitlemeli döngü (Phase-Locked Loop - PLL) gibi şebeke senkronizasyon yöntemlerini kullanarak şebeke izleme veya takip etme (Grid-Following - GFL) modunda çalışmaktadır [1]. GFL modunda çalışan invertörler dönme ataletinin azalmasına ve olumsuz kontrol etkileşimlerine neden olabilir. Bu yaklaşım, GFL invertörlerin şebeke gerilimini takip etmelerine ve gerektiğinde akım enjekte etmelerine neden olarak, invertöre özgü bir akım kaynağı davranışı oluşturur. Dolayısıyla, bu özellik GFL invertörlerini sabit frekansta gerilim kaynağı olarak işlev gören senkron jeneratörlerden ayırır. GFL invertörlerinin büyük ölçüde PLL'ye bağımlılığı, özellikle gelecekteki güç şebekelerinde öngörülen zayıf şebeke koşullarında, kararsızlığa yol açabilecek frekans salınımları gibi performans sorunlarına neden olabilir. Sonuç olarak, IBR egemen olduğu bir güç sisteminde yeni ve gelişmiş invertör kontrollerine ihtiyaç duyulmaktadır [2].

Elektrik şebekelerini desteklemek amacıyla geliştirilen GFMI teknolojisi, bağımsız gerilim kaynakları ile şebekeyi desteklediği için GFL invertörlerin bağımlı akım kaynakları gibi davranmalarının aksine, daha etkin bir çözüm olarak görülmektedir [3, 4]. GFMI'ler, gerilim ve frekans regülasyonuna aktif olarak katkıda bulunarak ve IBR kaynaklarının düzensiz etkilerini azaltarak genel sistem esnekliğini artırmaktadır [1]. Doğası gereği döner enerji kaynağı olmayan GFMI sistemleri, kontrol yapıları aracılığıyla geleneksel döner makinelerin davranışlarını taklit etmektedir. Bu kapsamda, sarkma kontrolü, Sanal Senkron Makine (Virtual Synchronous Machine - VSM) stratejileri ve Sanal Osilatör Kontrolü (Virtual Oscillator Control - VOC) literatürde yaygın şekilde incelenen başlıca GFM kontrol algoritmaları olarak karşımıza çıkmaktadır [5]. VSM tabanlı kontrol stratejileri, azalan sistem ataleti ve yetersiz sönümlemenin yol açtığı kararlılık sorunlarını hafifletmek amacıyla uygulanmaktadır [6]. VSM'ler, sanal atalet ve sönümleme sentezleyerek IBR'lerin sistem işletimi ve kararlılığına önemli ölçüde katkıda bulunmalarına etkin bir şekilde imkân tanımaktadır [7-9]. Bu sanal nicelikleri emüle etmek için çok sayıda topoloji geliştirilmiş olup, tümü ortak bir teorik temele dayanmakla birlikte uygulama hassasiyeti açısından farklılık göstermektedir [10-12]. GFM teknolojisi, batarya enerji depolama sistemlerinde (Battery Energy Storage Systems - BESS) özellikle çekici bir nitelik taşımakta ve günümüzde ticari olarak temin edilebilir durumda bulunmaktadır [13]. GFM kontrol stratejilerine ilişkin literatürdeki çalışmalar, daha çok sanal endüktans ve kapasitans kullanan gelişmiş bir sanal senkron jeneratör (Virtual Synchronous Generator - VSG) güç ayırma kontrol yaklaşımını vurgulamaktadır. Bu yöntem, VSG kontrolünde kararlı durum hatalarını ve dinamik salınımları en aza indirmeyi amaçlamaktadır. Ayrıca, dönüştürücünün güç düzenleme kapasitesini, aktif destek işlevselliğini ve reaktif güç dalgalanmalarını bastırma yetenekleri iyileştirmektedir [14].

Zhao vd., 2022 yılında [15], otonom bağlama yeteneklerine sahip, güç senkronizasyon kontrol bölümünü geliştiren ve bozucu etkilere karşı dayanım performansını güçlendirmek için aktif sönümleme kontrol stratejisi içeren sağlam bir GFM kontrol stratejisi önermiştir. Bu yaklaşım, hem güçlü hem de zayıf güç şebekesi senaryolarında üstün dinamik ve kararlı durum tepkileri sergilemektedir. Önemli

bozulmalar sırasında ortaya çıkan şebekeye bağlı invertörlerde geçici kararsızlık sorunlarını gidermek amacıyla Busada vd., 2023 yılında [16], akım tipi senkron invertörler üzerine inşa edilen GFMI'ler için arızaya dayanıklı bir kontrol stratejisi önermiştir. Asimetrik arıza durumlarında invertörün akım dengesini sağlamak amacıyla, geleneksel güç enjeksiyon kontrol stratejisini revize ederek akım enjeksiyon kontrolünü benimsemişlerdir; böylece hem şebekeye bağlı hem de adalanmış modlarda invertör işlemlerinin kararlılığına katkı sağlamışlardır. Park vd., 2023 yılında [17], %100 yenilenebilir enerjiye dayalı güç sistemleri için dağıtık üretim birimlerine yönelik yenilikçi bir GFM kontrol stratejisi sunmuşlardır. Bu strateji kapsamında, doğru akım (DC) gerilim koordinasyonu sağlanarak zorlu çevresel koşullar altında dönüştürücünün güvenilir çalışması sağlanmıştır. Rayane vd., [18], çalışmalarında, yenilenebilir enerji kaynaklarının artan entegrasyonu ile ortaya çıkan zorluklara çözüm geliştirmek amacıyla GFM kontrolünü araştırmıştır. Bu bağlamda, GFM sistemlerinin düzenlenmesine yönelik olarak integral kayan kipli kontrol (Integral Sliding Mode Control - ISMC) kullanan kademeli bir kontrol yaklaşımı önermiştir. Önerilen yöntem, değişen yük koşulları altında izleme performansını artırdığını ve çıkış gerilimi toplam harmonik bozulma (Total Harmonic Distortion - THD)'yi en aza indirdiğini göstermiştir. Bu yaklaşım, düşük THD, hızlı dinamik izleme yetenekleri ve yük dalgalanmaları karşısında sağlamlık ile karakterize edilen üstün performans sergilemiştir. Bir diğer çalışmada, Hu vd., 2024 yılında [19] frekans ve gerilim için hızlı aktif destek sağlamak amacıyla GFM enerji depolama dönüştürücüleri için bir SMC stratejisi önermiştir. Yazarlar, VSG kontrolünü tek kademeli nötr nokta kenetlemeli (neutral point clamped - NPC) dönüştürücüye uygulamış ve akım iç döngüsüne SMC dahil ederek aktif güç destek performansını analiz etmişlerdir. Otonom mikroşebekelerin dinamik davranışlarını iyileştirmek amacıyla, 2020 yılında Yazdani vd., [20] çalışmalarında, döngü içinde donanım eş simülasyonu (Hardware-in-the-Loop - HIL) yöntemiyle üç fazlı GFMI'ler için SMC kontrol önermiştir. Analizlerde, zayıf şebeke koşullarında meydana gelen gerilim düşüşleri ve sistem parametrelerindeki değişimlere bağlı doğrusal olmayan etkiler etkin biçimde ele alınmıştır. Li vd., [21] 2023 yılında, geleneksel PI kontrolünün sınırlamalarını aşmak amacıyla, GFMI'ler için adaptif kayan kipli kontrol (Adaptive Sliding Mode Control - ASMC) tabanlı kademeli bir kontrol stratejisi önerilmiştir. Hem iç akım döngüsüne hem de dış gerilim döngüsüne uygulanan ASMC yöntemi ile düşük çıkış gerilimi, THD, hızlı dinamik izleme kapasitesi üzerinde analizler yapmışlardır.

Literatürde GFM invertörler için çeşitli SMC yöntemleri önerilmiş olsa da, bu çalışmalar genellikle genel güç kalitesine odaklanmaktadır. Bu çalışmada ise Ref. [19]'da önerilen SMC mimarisi temel alınmış, ancak bu yapı özgün bir şekilde Birleşik Krallık şebeke kodu GC0137'nin zorlu frekans ve RoCoF testlerine uyarlanmıştır. Böylece önerilen gürbüz SMC stratejisi; karmaşık integral ve adaptif algoritmalarının getirdiği karmaşık hesaplama yüküne ihtiyaç duymaksızın, doğrudan GC0137 standardının sınır değerlerini karşılayacak şekilde uygulanmıştır. Ayrıca, teorik karmaşıklık yerine endüstriyel standartlara tam uyum ve pratik uygulanabilirlik hedeflenmiştir. Literatürdeki çalışmalar incelendiğinde, yapılan analizlerde kısa devre oranı (short-circuit ratio - SCR) ve reaktans-direnç oranı (reactance-to-resistance ratio - X/R) gibi temel parametreler modele dâhil edilmemiştir. Bu parametreler, şebeke empedansının ve dinamiklerinin doğru biçimde modellenbilmesi ve özellikle güçlü veya zayıf şebeke olup olmadığını değerlendirmede kullanılan iki önemli parametre olduğundan, mevcut çalışmada dâhil edilmiştir. Oshnoei vd., 2023 yılında [22], şebekeye bağlı modda bir GFMI'nin gerilim kontrolü için SMC tabanlı sonlu kontrol kümesi model öngörücü kontrol (finite control set model predictive control - FCS-MPC) önermiştir. SMC, FCS-MPC'deki ağırlık faktörlerinin adaptif ve optimal olarak

belirlenmesi için kullanılmıştır. Önerilen strateji, invertör kontrol sisteminin belirsizlikler ve dış bozulmalar altındaki tepkisine bağımlılığı azaltarak SMC'nin gerçek zamanlı yürütülmesinin avantajlı olduğunu göstermiştir. Literatürde incelenen çalışmalara bakıldığında, frekans ve gerilim için hızlı aktif destek sağlamak ve kararlılık performansını optimize etmek amacıyla GFM kontrol stratejilerinin geliştirilmesi, günümüz güç sistemleri için acil ve kritik bir araştırma alanı hâline gelmiştir.

Bunlara ilave olarak IBR-dominant güç sistemlerinde GFMI'ler, söz konusu entegrasyon sürecinde potansiyel çözümlerden biri olarak değerlendirilmektedir. Bu kapsamda, ilgili teknolojinin sorunsuz ve güvenilir entegrasyonu için katı şebeke kodlarına ve standartlara uyumun sağlanması kritik öneme sahiptir. Bu doğrultuda, dünya genelinde yalnızca sınırlı sayıda kuruluş GFM teknolojisine özel şebeke kodları geliştirme çalışmalarına başlamıştır; ancak bu çalışmaların hâlen sınırlı sayıda olduğu görülmektedir. Bunlar arasında, Büyük Britanya Ulusal Şebeke Elektrik Sistem İşletmecisi (National Grid Electricity System Operator - NGESO), Avustralya Enerji Piyasası İşletmecisi (Australian Energy Market Operator - AEMO) ve Avrupa Elektrik İletim Sistemi İşletmecileri Ağı (ENTSO-E) öne çıkan kuruluşlardır. ABD Enerji Bakanlığı tarafından desteklenen UNIFI projesi, bu alandaki ilk şartname sürümü olarak yayımlanmıştır. Kuzey Amerika Güvenilirlik Kurumu (North American Electric Reliability Corporation - NERC) ise GFM teknolojisinin kamu hizmeti kuruluşları veya sistem işletmecileri tarafından nasıl test edilmesi gerektiğine ilişkin rehber niteliğinde bir doküman hazırlamıştır. Ülkemizde ise henüz bu tür bir referans çalışması bulunmamaktadır.

Söz konusu standartlar kapsamında iki parametre öne çıkmaktadır: (1) RoCoF, güç sistemindeki frekansın zamana göre türevi (df/dt) olup bir elektrik şebekesinin sağlamlığını ve dinamik davranışını tanımlayan kritik bir parametredir. GC0137 standardı ve Büyük Britanya şebeke kodu bağlamında aktif RoCoF tepki gücü, GFM santralinin ani sistem dinamiklerine karşı senkron makinelerin davranışını taklit ederek sağladığı net aktif güç çıkışını ifade etmektedir. Bu güç, GFM tarafından sağlanan aktif atalet gücü ile aktif frekans tepki gücünün toplamından oluşmaktadır. (2) Aktif sönümleme gücü ise GFM santralinin toplam sistemdeki aktif güç salınımlarını azaltmak amacıyla doğal olarak enjekte edilen veya emilen aktif güçtür. Bu tepki, şebekeye giriş noktası gerilimi ile GFMI'nin iç gerilim kaynağı arasındaki salınımlara karşı sistemin gösterdiği sönümlü davranışı yansıtmaktadır. GFM yeteneğini ve performansını belirleyen ve son yıllarda güncellenen teknik şebeke kodları açısından akademik araştırmalar yapmak, GFM IBR'lerinin daha geniş ölçekte konuşlandırılmasına yönelik önemli bir adımdır. Dinamik ve geçici durum simülasyonları, GFMI'lerin farklı işletme koşullarındaki performansını doğrularak kararlı ve güvenilir bir güç sisteminin sağlanmasını mümkün kılmak açısından büyük önem taşımaktadır.

Literatürdeki mevcut GFM kontrol çalışmalarına bakıldığında, GFM sistemlerinin aktif destek yeteneklerinin uluslararası şebeke kodlarının gereksinimleriyle uyumunu doğrudan ele alan kapsamlı bir çalışmaya rastlanmamaktadır. Özellikle büyük ölçekli enerji depolama sistemlerinin GFMI'ler aracılığıyla ana şebekelere entegrasyonu yönündeki küresel eğilim göz önünde bulundurulduğunda bu durum literatürde önemli bir boşluk olarak öne çıkmaktadır. GFM teknolojisinin giderek yaygınlaşmasıyla birlikte, hem sistem kararlılığını sağlayan hem de şebeke kodlarına tam uyum gösteren optimize edilmiş kontrol stratejileri giderek daha önemli hâle gelmektedir. MATLAB/Simulink Simscape™ Electrical ortamında gerçekleştirilen bu çalışma öncelikli olarak NGESO tarafından belirlenen, GFM kabiliyetine ilişkin minimum teknik gereksinimleri ve invertörün karşılaması gereken kapsamlı test koşullarını içeren GC0137 şebeke kodu standardına odaklanmaktadır [26-29]. Çalışma,

GC0137 kapsamında tanımlanan çeşitli frekans test senaryoları altında GFMI'lerin performansını değerlendirmektedir [26]. Söz konusu standart, GFMI'lerin dinamik koşullar altında kararlı işletimini sürdürebilmesine ve modern güç sistemlerine gürbüz ve güvenilir bir şekilde entegre olmasına olanak tanımaktadır [26].

Bu çalışmada, üç fazlı GFMI iç akım döngüsü için sağlam bir kontrol tasarlamak amacıyla, sanal senkron makine tabanlı bir kontrol mimarisi ve GC0137 standardına uyumlu doğrusal olmayan bir kayan kipli kontrol stratejisi önerilmektedir. Önerilen stratejinin dinamik tepkisini, dayanıklılığını ve yakınsama süresini doğrulamak amacıyla GC0137 standardında belirtilen çeşitli GBGF-I senaryolarında simülasyon analizleri gerçekleştirilmiştir. PI denetleyici ile SMC performansının GC0137 spesifikasyonları ve şebeke kodu gereksinimleriyle uyumunu ortaya koyan testler ve analizler gerçekleştirilmiştir. Çalışmanın bilimsel katkıları şu şekilde özetlenebilir:

- Aşırı sistem frekansları ve RoCoF koşullarında GFMI'nin aktif güç destekleme etkisi test edilmiş ve sunulmuştur.
- Önerilen yöntemin etkinliği, GC0137 standartına göre tam modellenmiş bir sistem üzerinde doğrulanmıştır.
- GC0137 şebeke kodu uyarınca farklı frekans aralıklarında test senaryoları gerçekleştirilmiştir.
- Ayrıca şebekenin empedansını ve dinamiklerini doğru şekilde modellemek amacıyla SCR ve X/R oranları gibi temel Parametreler hesaplanmıştır.

2. Teorik Yöntem (Theoretical Method)

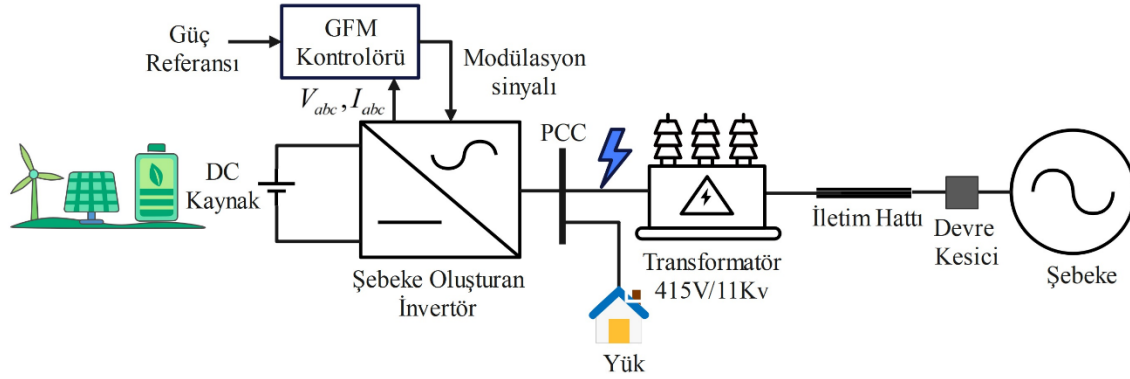
Önerilen yöntem, GFM-IBR'lerin bir empedans arkasında gerilim kaynağı gibi davranmasını, daha açık bir ifadeyle geleneksel senkron makinelerin dinamik davranışlarını taklit etmesini mümkün kılan bir kontrol yaklaşımıdır. Bu çalışmanın devamında sistem bileşenlerinin matematiksel modelleri sunulmuş ve VSM tabanlı kontrol yapısının her bir işlevsel bloğunun nasıl gerçekleştirildiği ayrıntılı biçimde açıklanmıştır.

2.1. Sistem Modellemesi (System Modeling)

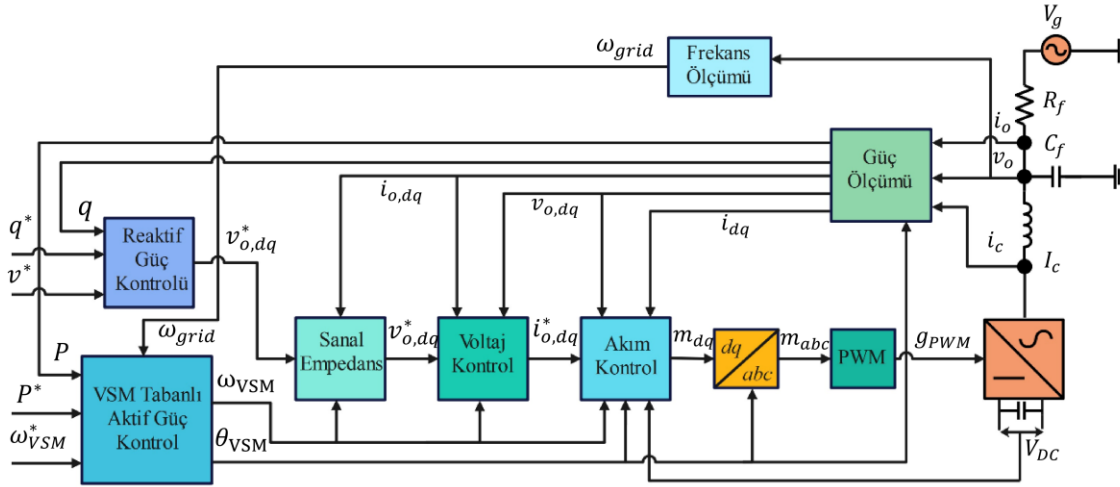
Şekil 1'de, 500 kVA, 415 V, 50 Hz nominal değerlere sahip üç fazlı bir invertörün, 415 V/11 kV yükseltici bir dağıtım transformatorü aracılığıyla orta gerilim şebekesine bağlı bir GFMI test sistemi gösterilmektedir. Ayrıca yerel bir yük doğrudan alçak gerilim seviyesindeki GFMI çıkışına bağlanmıştır. Bu yapı, GFM performansını doğrudan etkileyen SCR ve X/R oranları gibi temel parametreleri kapsamaktadır. SCR oranı, bağlantı noktasındaki şebekenin kısa devre gücünün GFM'nin anma gücüne oranı olarak tanımlanmakta olup Eş. 1'de verilmektedir. X/R oranı ise GFM ile şebeke arasındaki toplam empedansın reaktans bileşeninin direnç bileşenine oranıdır. Tasarım kriterlerine bağlı olarak SCR değeri genellikle 1 ile 4 arasında, X/R oranı ise 1 ile 10 arasında seçilmektedir. Bu çalışma kapsamında şebeke için SCR değeri 2,5 ve X/R oranı 4 olarak belirlenmiştir.

$$SCR = \frac{SCVA_g}{VA_{rated}} = \frac{1}{|Z_{pu}|} \quad (1)$$

Burada $SCVA_g$, bağlantı noktasındaki arıza durumunda şebeke tarafından sağlanan kısa devre gücünü; VA_{rated} , GFM'nin anma gücünü; Z_{pu} , ise birim değer (per unit - pu) cinsinden toplam empedansı temsil etmektedir. Bu toplam empedans, transformator, iletim hattı ve şebeke kaynak empedanslarının bileşkesidir. GFM kontrolcüsü, birim değer cinsinden aktif ve reaktif güç referanslarını, ölçülen çıkış gerilimi ve akım bilgilerini ile dönüştürücü modülasyon sinyalinin işleyerek GFM sisteminin kontrolünü sağlamaktadır. Simülasyon çalışmaları, MATLAB/Simulink R2023b sürümü ve



Şekil 1. Şebekeye bağlı GFMI'nın test sistemi (Grid-tied GFMI test system)



Şekil 2. GFM kontrol genel yapısı (GFM control general structure)

Simscape™ Electrical (Specialized Power Systems) kütüphanesi kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Çalışmada odaklanılan GC0137 şebeke kodu uyumluluk testleri, sistem seviyesinde uzun süreli dinamik analizler gerektirmektedir. Bu nedenle GFMI güç dönüştürücü katı, GC0137 standardında belirtilen zorlu frekans ve RoCoF değişim senaryolarını uygulayabilmek amacıyla kontrol edilebilir ve zamanla değişen parametreleri simüle edebilen üç fazlı Ortalama Değerli Gerilim Kaynaklı Dönüştürücü (Three-Phase Average-Value Voltage Source Converter) bloğu kullanılarak modellenmiştir. Bu modelleme yaklaşımı, yarı iletkenlerin yüksek frekanslı anahtarlama olaylarını ihmal etmekte; ancak bir anahtarlama periyodu boyunca enerji korunumunu esas alarak kontrol sisteminden gelen referans modülasyon gerilimlerini AC terminal gerilimlerine dönüştürmektedir. İletim hattı empedansını ve hat kayıplarını temsil etmek için üç fazlı RLC blok modelleri (Three-Phase RLC Block Models), yerel yükler için dinamik yıldız bağlı değişken yük blokları (Wye-Connected Variable Load), yükseltici transformator için ise üç fazlı iki sargılı transformator (Three-Phase Two-Winding Transformer) sisteme entegre edilmiştir. Bara, GFMI çıkışını 415 V/11 kV yükseltici transformator olarak modellenen dağıtım transformatorüne bağlamaktadır. Bu yapı, orta gerilim şebekesiyle entegrasyonu mümkün kılmaktadır. Kontrol sistemi ise GFM kontrol mimarisi ayrı ayrı modellenerek ilerleyen bölümlerde ayrıntılı biçimde sunulmuştur.

2.2. GFM Kontrol Tasarımı (GFM Control Design)

GFMI'nin aktif güç destek tepkisinin elde edilmesine yönelik dönüştürücü kontrol süreci şu şekilde gerçekleştirilmektedir [6, 29]:

Elektriksel değişkenler ölçüm modülü üzerinden toplanmakta; her bir değişkenin d/q eksen bileşenlerini elde etmek için Park dönüşümü ve genlik ölçümü kullanılmaktadır. Ardından aktif ve reaktif güç sinyalleri, güç hesaplama modülü üzerinden hesaplanmakta ve bu sinyaller, referans gerilim genliğini ve fazını gecikmesiz biçimde üreten VSM kontrol modülüne iletilmektedir. Sanal atalet özelliğine sahip VSM tabanlı aktif güç kontrolü (Active Power Control - APC), dönüştürücü sistemin iç kontrol döngülerine frekans ve faz açısı referanslarını (ω_{VSM} ve θ_{VSM}) sağlamaktadır. Buna karşılık reaktif güç kontrolörü (Reactive Power Controller - RPC), gerilim genliği referansını $v_{o,dq}^*$ üretmektedir. Böylece VSM'nin atalet emülasyonu ve aktif güç kontrolü, gerilim ve akım kontrolörlerini yönlendiren dış döngüler olarak işlev görmektedir [30]. Son aşamada ise iç kontrol döngüleri üzerinden gerilim ve akım sinyalleri işlenerek modülasyon dalga sinyalleri üretilmektedir. Şekil 2'de GFM kontrolcüsünün genel yapısı gösterilmektedir. Elektriksel sistemin modellenmesi, analizi ve kontrolü senkron referans çerçeveleri (Synchronous Reference Frames - SRF) üzerinde gerçekleştirilmektedir. Sabit referans çerçevesinden SRF'lere dönüşüm, genlik korunumlu Park dönüşümüne (Park transformation) dayanmaktadır. Bu nedenle anma koşullarında akım ve gerilim vektörlerinin büyüklüğü 1,0 birim olarak alınmaktadır [31]. Park dönüşümü, abc referans çerçevesindeki üç fazlı bir sistemin zaman alanı bileşenlerini döner referans çerçevesine (rotating reference frame) dönüştürerek doğrudan (d eksen), karesel (q eksen) ve sıfır bileşenlerine ayırmaktadır. Bu çalışmada dönüştürücünün anahtarlamaya etkileri ihmal edilerek, modellenmesi için ideal bir ortalama model yaklaşımı benimsenmiştir. Aynı zamanda DC tarafına özgü uygulama sınırlamaları göz ardı edilmekte olup, enerji kaynağı veya depolama birimi gibi bileşenlerin

modellenmesi ve kontrolü çalışmanın kapsamı dışında bırakılmıştır [31]. Gerilim ve akım kontrol döngüleri genellikle dq senkron döner referans çerçevesinde uygulanmakta ve sinüzoidal büyüklüklerin düzenli şekilde denetlenmesini kolaylaştırmaktadır. Akım iç döngü, invertör çıkış akımını doğrudan denetlemekte ve hızlı dinamik tepki elde edilmesini sağlamaktadır.

2.2.1. VSM Tabanlı Aktif Güç Kontrolü (VSM-Based Active Power Controller)

Literatürde GFM için çeşitli dönüştürücü denetleyici uygulamaları önerilmiştir. Bu uygulamaların büyük bölümü, senkron makinelerin davranışlarını farklı ayrıntı düzeylerinde taklit etmeye dayanmaktadır [6, 7, 30–32]. Bu yaklaşımların ortak noktası ise bir makinenin rotor dinamiklerini taklit etmeyi amaçlayan sanal salınım denklemi (swing equation) ile tanımlanmaktadır. VSM kontrol yöntemi, geleneksel senkron makinelerin atalet ve sönümleme karakteristiklerini taklit ederek sistem kararlılığına katkı sağlamaktadır. Bu çalışmada kontrolcü tarafından hesaplanan sönümleme gücü, sabit bir referans yerine gerçek zamanlı ölçülen şebeke frekansına dayalı olarak elde edilmektedir. Bu yaklaşım, şebeke frekansında meydana gelen bozulmalar sırasında daha etkin bir sönümleme sağlayarak genel sistem performansını artırmaktadır [6, 31].

Bu çalışmada incelenen VSM kontrol yapısıyla geleneksel dönüştürücü kontrol sistemleri arasındaki temel fark, döner ataletin emülasyonu ve bu sanal ataletin güç dengesi temelli senkronizasyon mekanizmalarıyla bütünleşmesidir. GFM-VSM tabanlı kontrol yapısı, geleneksel senkron makinenin atalet ve sönümleme özelliklerini modelleyen klasik salınım denklemi esas alınarak geliştirilmiştir [33]. VSM salınım denkleminin uygulanmasını gösteren blok diyagramı, Şekil 3'ün sağ tarafında sunulmuştur. Burada VSM sönümleme gücü p_d , senkron makinedeki sönümleme etkisini temsil etmekte olup sönümleme sabiti k_d ile VSM hızı ile gerçek şebeke frekansı arasındaki fark üzerinden tanımlanmaktadır [6, 34]. Bu durumda salınım denklemi hıza göre doğrusallaştırılmakta; güç dengesi ise Şekil 3'te gösterildiği üzere sanal ataleti temsil eden ivmelenmeyi belirlemektedir [34].

VSM konfigürasyonu çerçevesinde, Şekil 3'ün sol kısmında gösterildiği üzere güç kontrolünde harici bir kararlı durum frekans sarkması da yer almaktadır. Bu sarkma, frekans referansı ω_{VSM} ile VSM'nin gerçek hızı arasındaki fark üzerinden tanımlanan sarkma sabiti k_ω ile karakterize edilmektedir. Harici frekans referansı ise şebeke açılmal frekansı olarak alınmakta; buna göre sanal mekanik giriş gücü, aktif güç referans ayar noktası ile frekans eğimi etkisinin toplamı şeklinde tanımlanmaktadır. Burada ω_{VSM}^* harici frekans referansını, ω_{grid} ise şebeke açılmal frekansını belirtmektedir. Bu şekilde P^{r*} sanal mekanik giriş gücü, aktif güç referans ayar noktası P^* ve frekans eğimi etkisinin toplamı olarak tanımlanmaktadır. Sistem ayrıca p ile verilen ve VSM'den şebekeye akan ölçülen elektriksel gücü içermekte olup, T_a sanal atalet sabiti (geleneksel senkron makinedeki $2H$ 'ye karşılık gelen) olarak tanımlanmaktadır. Güç dengesinin integrali, sanal ataletin birim başına mekanik hızı olan ω_{VSM} 'yi vermekte; buna karşılık gelen faz açısı θ_{VSM} ise hızın integrali olarak hesaplanmaktadır. Dolayısıyla VSM ataletinin dinamik davranışı Eş. 2'de ifade edilmektedir [31, 34].

$$\frac{d\omega_{VSM}}{dt} = \frac{P^*}{T_a} - \frac{P}{T_a} - \frac{K_d(\omega_{VSM} - \omega_{grid})}{T_a} + \frac{K_\omega(\omega_{VSM}^* - \omega_{VSM})}{T_a} \quad (2)$$

Bu denklemde hız sapması $\delta\omega_{VSM}$ ve Eş. 3'te karşılık gelen faz açısı farkı $\delta\theta_{VSM}$, sistemin senkron referans çerçevesinde modellenmesine olanak sağlamak üzere tanıtılmıştır. Kararlı durumda VSM hızı her zaman şebeke frekansı ω_{grid} 'e eşit hâle geleceğinden frekans sapması $\delta\omega_{VSM}$, şebekeye bağlı işletimin kararlı koşulları altında daima sıfıra

yönelecektir. Dolayısıyla kararlı durumda $\delta\theta_{VSM}$, şebeke gerilimi ile VSM'nin SRF yönelimi arasında sabit bir faz açısını temsil etmektedir [6]. VSM'yi bir SRF'de modellemek için şebekeye bağlı modda VSM'nin faz açısı, kararlı durum koşulları altında sabit kalmalı ve VSM dâhilî geriliminin sanal konumu ile şebeke gerilim vektörünün konumu arasındaki faz kaymasına karşılık gelmelidir. Bunu gerçekleştirmek için yalnızca VSM hızının gerçek şebeke frekansından sapması modellenmelidir. Bu nedenle hız sapmasını temsil eden ω_{VSM} ve buna karşılık gelen faz açısı farkını temsil eden θ_{VSM} olmak üzere yeni bir değişken seti tanıtılmıştır. Dolayısıyla VSM ataletinin güç dengesi Eş. 2'de ifade edilirken VSM faz kayması Eş. 3 ile tanımlanmaktadır [34].

$$\frac{d\theta_{VSM}}{dt} = \delta\omega_{VSM} \cdot \omega_b \quad (3)$$

Kararlı durumda VSM hızı, şebeke frekansı ω_{grid} 'e eşit olacağından frekans sapması ω_{VSM} , şebekeye bağlı kararlı işletim koşulları altında sıfıra yönelecektir. Şekil 2'nin blok diyagramında gösterilen VSM'nin gerçek birim başına hızı, Eş. 2'den elde edilen hız sapması ω_{VSM} ve Eş. 4 ile verilen şebeke frekansı ω_{grid} cinsinden ifade edilmektedir. Buna karşılık gelen VSM faz açısı θ_{VSM} ise Eş. 5 ile tanımlanmaktadır. Faz açısı θ_{VSM} , Şekil 2'de belirtildiği gibi VSM ataleti tarafından tanımlanan döner referans çerçevesi ile üç fazlı sinyaller arasındaki dönüşümde kullanılan ve 0 ile 2π arasında değişen bir testere dişi sinyale karşılık gelmektedir [34].

$$\omega_{VSM} = \delta\omega_{VSM} + \omega_{grid} \quad (4)$$

$$\frac{d\theta_{VSM}}{dt} = \omega_{VSM} \cdot \omega_b \quad (5)$$

2.2.2. Düşüm Tabanlı Reaktif Güç Kontrolü (Droop-Based Reactive Power Controller)

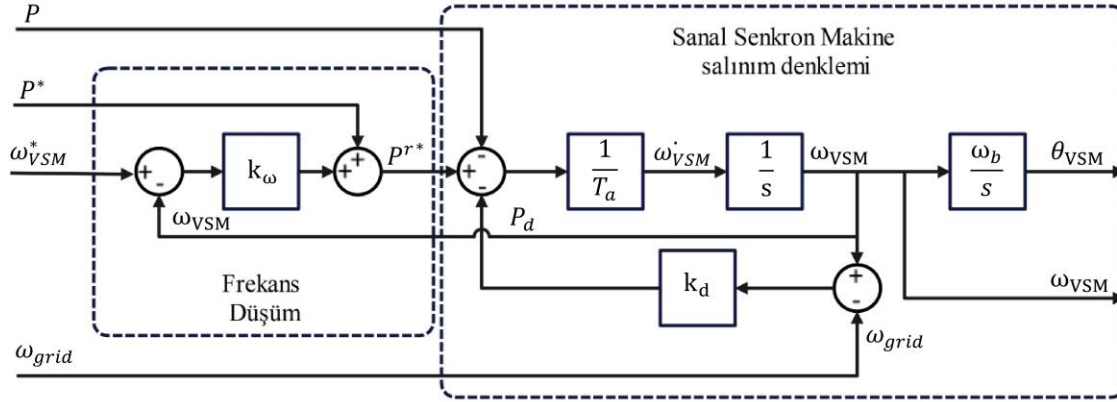
Düşüm tabanlı reaktif güç kontrolcüsünde, iç döngü gerilim ve akım kontrolü için kullanılan gerilim genliği referansı $\hat{v}^{r*}$, Eş. 6 ile hesaplanmaktadır. Burada $\hat{v}^*$ harici gerilim genliği referansını, q^* ise reaktif güç referansını ifade etmektedir [6]. Kazanç k_q , reaktif güç referansı ile filtrelenmiş reaktif güç ölçümü q_m arasındaki fark üzerinde etkili olan reaktif güç eğim kazancını temsil etmektedir. Bu durumda uygulanan birinci dereceden alçak geçiren filtrenin dinamiği, kesim frekansı ω_f olmak üzere, Eş. 7 ile tanımlanmaktadır. Sonuçta elde edilen kontrol yapısının blok diyagramı Şekil 4'te gösterilmektedir [6].

$$\hat{v}^{r*} = \hat{v}^* + k_q(q^* - q_m) \quad (6)$$

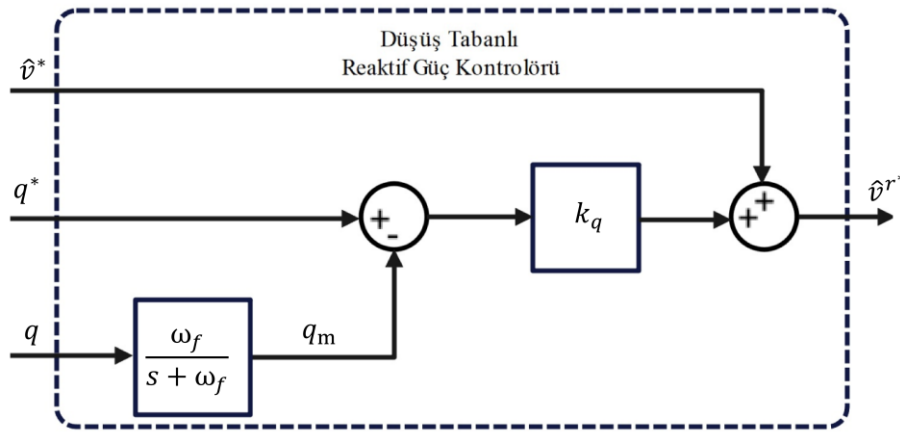
$$\frac{dq_m}{dt} = -\omega_f \cdot q_m + \omega_f \cdot q \quad (7)$$

2.2.3. Sanal Empedans ve Gerilim Kontrolörleri (Virtual Impedance and Voltage Controllers)

Şebeke oluşturan kontrolörler, senkron makinelerdeki sönümleme sargısının işlevini taklit eden ve sistemin dinamik kararlılığını artıran sanal empedans yapılarıyla birlikte uygulanabilmektedir [35]. Sanal empedans, kısa devre durumlarında doğal bir akım sınırlama mekanizması sunmakta ve ölçülen akımlara dayalı olarak invertörün çıkış gerilim referansını değiştirerek fiziksel empedans davranışını emüle etmektedir. Şekil 2'de belirtildiği üzere, Şekil 4'teki reaktif güç düşüm kontrolünden elde edilen gerilim genliği referansı $\hat{v}^{r*}$, filtre kapasitörlerindeki gerilim v_o 'yu denetlemek için doğrudan kullanılmadan önce sanal empedans bloğundan geçirilmektedir. Bu yapı, geleneksel senkron makinelerdeki senkron empedansın yarı durağan (quasi-stationary) karakteristiklerini taklit edecek şekilde tasarlanmıştır [6]. Sanal empedans, VSM'nin hem kararlı durum hem



Şekil 3. VSM-tabanlı aktif güç kontrol stratejisi (VSM-based active power control strategy)



Şekil 4. Reaktif güç düşüş kontrolcüsü (Reactive power droop controller)

de geçici durum performansını etkileyerek sistemin genel dinamik tepkisini şekillendirmektedir. Sanal empedans çıkışından elde edilen d ve q eksenlerindeki gerilim bileşenleri $v_{o,dq}^*$, Şekil 5'te gösterildiği üzere ayrıştırılmış SRF PI gerilim denetleyicileri için doğrudan referans olarak kullanılmaktadır. Bu yaklaşım, normal koşullarda kararlı işletimi sürdürürken geçici ve arıza koşullarında doğal akım sınırlama işlevi göyerek sistemin güvenliğini artırmaktadır.

GFM sisteminin geleneksel kontrol stratejisi, Şekil 5'te gösterildiği gibi daha hızlı tepki veren iç akım döngüsü ile daha yavaş tepki veren dış gerilim döngüsünden oluşan iç içe geçmiş bir PI denetleyici yapısı üzerinden gerçekleştirilmektedir. Bu yapı içerisinde iç akım kontrol döngüsünün bant genişliğinin, dış gerilim kontrol döngüsüne kıyasla belirgin ölçüde yüksek olması beklenmektedir. Ancak bu kontrolcü ayarlama yaklaşımı, temel olarak yüksek anahtarlama frekansına sahip invertörler için elverişlidir.

Düşük anahtarlama frekanslarında ise sistemin kararlı çalışma aralığı önemli ölçüde daralmakta; bu durum sistem performansını ve kararlılığını olumsuz yönde etkileyebilmektedir [36]. Gerilim kontrolörünün ayrıntılı yapısı Şekil 5'in sol kısmında sunulmakta olup dönüştürücü akımları için referans değerlerini i_{dq}^* 'yi üretmektedir [37]. Akım referansları Eş. 8 ile ifade edilmekte olup buradaki PI kontrolcü kazançları k_{pv} ve k_{iv} ile tanımlanmaktadır. Ayrıca gerilim kontrolörünün ayrıştırma terimlerinin, Eş. 4'te tanımlandığı üzere VSM ataletinin birim başına hızına dayandığına da dikkat edilmelidir [34]. Gerilim kontrolörlerinden elde edilen akım referansları, sistemde gerilim sarkmaları, arıza koşulları veya diğer şiddetli geçici

durumlarda aşırı akımları önlemek amacıyla sınırlandırılmalıdır. Bu sınırlandırma aynı zamanda akım referanslarının doygunluk seviyesine ulaştığı durumlarda gerilim denetleyicisinin aşırı birikiminden kaynaklanabilecek kararsızlık riskine karşı koruma sağlamaktadır.

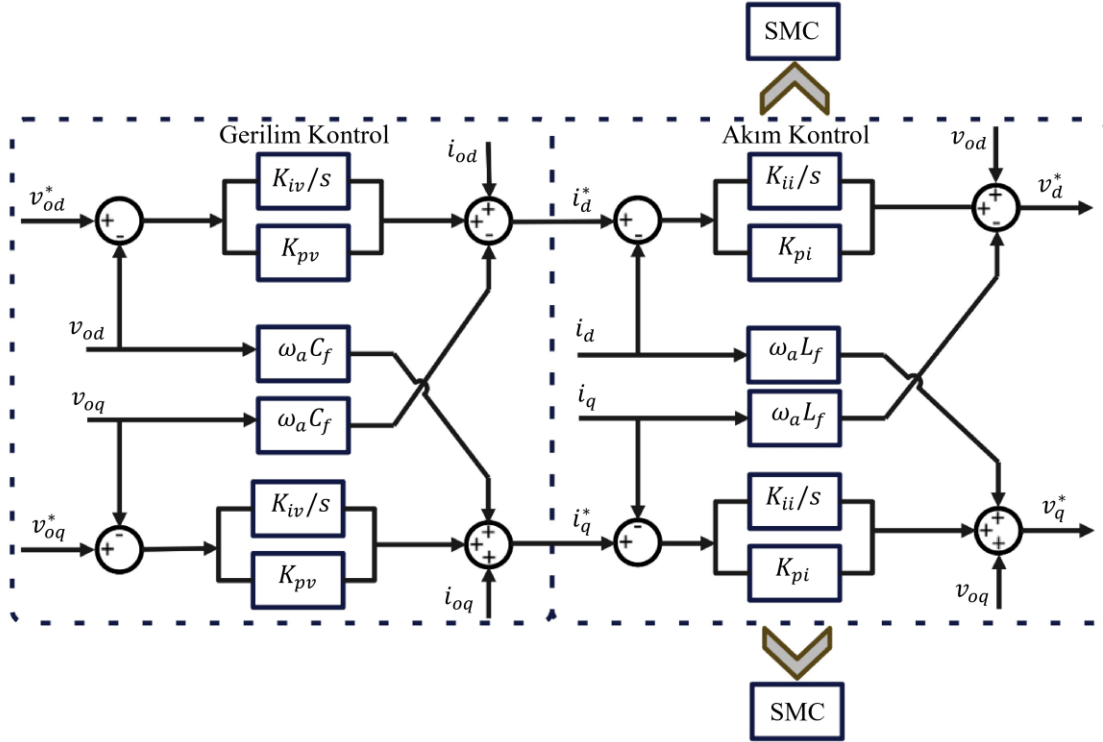
$$\begin{aligned} i_d^* &= \left(K_{pv} + \frac{K_{iv}}{s}\right) \cdot (v_{od}^* - v_{od}) - v_{oq} \cdot \omega_a \cdot C_f + i_{od} \\ i_q^* &= \left(K_{pv} + \frac{K_{iv}}{s}\right) \cdot (v_{oq}^* - v_{oq}) + v_{od} \cdot \omega_a \cdot C_f + i_{oq} \end{aligned} \quad (8)$$

Burada k_{pv} ve k_{iv} , gerilim dış döngü kontrolörünün PI kazançlarını temsil etmektedir. v_{od}^* ve v_{oq}^* dönüştürücünün çıkış gerilimi olarak adlandırılan kapasitör geriliminin sırasıyla d eksen ve q eksen referans değerlerini ifade etmektedir. Benzer şekilde i_{od} ve i_{oq} , yük akımının d eksen ve q eksen bileşenlerini temsil etmektedir [19].

2.2.4. Akım Kontrolü (Current Controller)

Akım kontrolörünün ayrıntılı yapısı Şekil 5'in sağ kısmında sunulmakta olup, kontrolörden elde edilen gerilim referansı Eş. 9 ile tanımlanmaktadır. Burada invertör için elde edilen gerilim referansı v_{dq}^* ile gösterilmekte olup PI kontrolörünün kazançları K_{pi} ve K_{ii} ile ifade edilmektedir.

$$\begin{aligned} v_d^* &= \left(K_{pi} + \frac{K_{ii}}{s}\right) \cdot (i_d^* - i_d) - i_q \cdot \omega_a \cdot L_f + v_{od} \\ v_q^* &= \left(K_{pi} + \frac{K_{ii}}{s}\right) \cdot (i_q^* - i_q) + i_d \cdot \omega_a \cdot L_f + v_{oq} \end{aligned} \quad (9)$$



Şekil 5. Gerilim ve akım kontrolü (Voltage and current control)

İnvertörün teorik modellenmesini kolaylaştırmak amacıyla şebeke tarafının güç kaynağı kısmı ihmal edilerek invertörün üç fazlı sabit koordinat sistemindeki matematiksel modeli Kirchhoff gerilim ve akım yasaları aracılığıyla elde edilmektedir. İki fazlı senkron döner koordinat sisteminde invertörün basitleştirilmiş matematiksel modeli Eş. 10 ve Eş. 11’de verilmektedir [19].

$$L_f \cdot \frac{di_d}{dt} = v_d^* - v_{od} + \omega L_f i_q \quad (10)$$

$$L_f \cdot \frac{di_q}{dt} = v_q^* - v_{oq} - \omega L_f i_d$$

$$C_f \cdot \frac{dv_{od}}{dt} = i_d - i_{Ld} + \omega C_f v_{oq} \quad (11)$$

$$C_f \cdot \frac{dv_{oq}}{dt} = i_q - i_{Lq} - \omega C_f v_{od}$$

Burada v_d^* ve v_q^* , invertörün basitleştirilmiş matematiksel modelinde gerilim döngüsünün giriş sinyallerini temsil etmektedir. i_d ve i_q , gerilim döngüsünün çıkış sinyallerini, diğer bir ifadeyle akım döngüsünün giriş sinyallerini ifade etmektedir. v_{od} ve v_{oq} ise akım döngüsünün çıkış sinyallerini temsil etmektedir. Laplace dönüşümü sonucunda elde edilen ifadeler Eş. 12 ve Eş. 13’te verilmiştir.

$$i_d = (v_d^* - v_{od} + \omega L_f i_q) / sL_f \quad (12)$$

$$i_q = (v_q^* - v_{oq} - \omega L_f i_d) / sL_f$$

$$v_{od} = (i_d - i_{Ld} + \omega C_f v_{oq}) / sC_f \quad (13)$$

$$v_{oq} = (i_q - i_{Lq} - \omega C_f v_{od}) / sC_f$$

2.3. Akım Kontrolü için SMC Tasarımı (SMC Design for Current Control)

Geleneksel PI kontrol stratejisi, basit yapısı ve kolay uygulanabilirliği nedeniyle yaygın olarak kullanılmakta ve sınırlı bir çalışma aralığında kararlılığı sağlayabilmektedir. Ancak GFM sistemlerinin kontrolünde

sabit kazanç yapısı ve sistem bozucularına duyarlılık gibi çeşitli zorluklar ortaya çıkmaktadır. GFM’nin geleneksel iç akım döngüsü kontrolü, sıfır statik hata izleme avantajı sunan ancak sınırlı bant genişliği nedeniyle dinamik tepkisi zayıf olan PI kontrolcülere dayanmaktadır. Bu nedenle geleneksel PI kontrol stratejisi, sistem bozucuları altında tüm çalışma aralığında yeterli dinamik performans sağlayamamaktadır [21, 38]. SMC ise hem büyük hem de küçük genlikli bozucu sinyaller ile kontrol parametrelerindeki belirsizlikler karşısında kontrol hedefini yüksek doğrulukla izleyebilmekte; bu sayede sistemin dinamik tepkisini ve bozucu etkilere karşı dayanıklılığını belirgin şekilde artırmaktadır [39]. Bu çalışmada SMC tabanlı bir iç döngü akım denetimi ve PI tabanlı bir dış döngü gerilim denetimi önerilmektedir.

SMC, sistem durum yörüngesini önceden tanımlanmış bir kayan yüzeye ulaştırarak ve bu yüzey üzerinde tutan gürbüz bir kontrol yöntemidir. Bu yaklaşım, özellikle bozucu etkiler ve belirsizliklerin varlığında yüksek doğruluk ve dayanıklılık gerektiren sistemler için önemli avantajlar sunmaktadır [40]. Sistem kayan yüzeye ulaştığında, SMC, sistem dinamiklerindeki içsel veya dışsal değişimlere rağmen sistemin bu yörüngede kalmasını sağlamaktadır. Akım kontrolünde SMC kullanımı, yanıt bant genişliği sınırlı olan ve bozucu sinyaller ile parametre belirsizlikleri altında performansı zayıflayan geleneksel PI denetiminin sınırlamalarını aşmayı ve GFM’nin aktif güç destek kabiliyetini artırmayı amaçlamaktadır. SMC tasarımı için dikkate alınması gereken çeşitli faktörler bulunmaktadır:

- İlk olarak, sistem için istenilen indirgenmiş mertebe dinamiklerini temsil eden kayan yüzeyin tasarlanması gerekmektedir.
- İkinci olarak, başlangıç koşullarından bağımsız olarak sistemin her zaman kayan yüzeye doğru yönlendirilmesini sağlayan bir kontrol yasasının oluşturulması gereklidir.
- Son olarak, kullanılan donanım ve sistem gereksinimleri çerçevesinde kabul edilebilir çatırdama (chattering) düzeyinin azaltılmasına yönelik bir yöntem geliştirilmelidir.

SMC yönteminin temel teorisi, kayma kipi yüzeylerinin tanımlanmasına dayanmaktadır. Bu yüzeyler, sistemin istenilen duruma yönlendirilmesini sağlayan denetim yasalarının temelini oluşturmaktadır. Kayma yüzeyleri s_1 ve s_2 , sırasıyla d eksen ve q eksen akım bileşenlerinin izleme hatalarına bağlı olarak Eş. 14 ile tanımlanmaktadır.

$$\begin{aligned} s_1 &= i_d^* - i_d \\ s_2 &= i_q^* - i_q \end{aligned} \quad (14)$$

Burada i_d ve i_q dönüştürücünün d eksen ve q eksen gerçek çıkış akımlarını; i_d^* ve i_q^* ise dış gerilim kontrol döngüsü tarafından sağlanan ilgili referans değerlerini temsil etmektedir. Yöntemde karşılaşılan temel sorunlardan biri olan çatırdama etkisini azaltmak amacıyla klasik kayan kipli denetim yaklaşım yasası genellikle sembolik signum fonksiyonu $\text{sgn}(s)$ kullanılarak tanımlanmaktadır. Yaklaşım yasası, sistem durumunun kayan yüzeye yönelmesini ve bu yüzeyde kalmasını sağlamak üzere tasarlanmıştır. Ancak $\text{sgn}(s)$ fonksiyonu, ani anahtarlama davranışı nedeniyle yüksek frekanslı salınımlara neden olabilmektedir. SMC kontrolünde çatırdamanın önemli ölçüde azaltılmasını sağlamak ve yaklaşım yasasını iyileştirmek amacıyla doyum fonksiyonu $\text{sat}(s)$ kullanılmaktadır. Bu kapsamda kayan yüzeyin birinci türevi alınarak elde edilen iyileştirilmiş yaklaşım yasası Eş. 15 ile ifade edilmektedir.

$$\begin{aligned} \dot{s}_1 &= -\varepsilon_1 s_1 - \gamma_1 \text{sat}(s_1) \\ \dot{s}_2 &= -\varepsilon_2 s_2 - \gamma_2 \text{sat}(s_2) \end{aligned} \quad (15)$$

Burada $\varepsilon_1, \gamma_1, \varepsilon_2, \gamma_2$, sistem durumunun kayma yüzeyine yaklaşma hızını belirleyen sıfırdan büyük pozitif sabitlerdir. Bu katsayılar, yaklaşım yasasının parametrelerini oluşturmaktadır. ε ve γ değerlerinin uygun şekilde seçilmesi, sistemdeki parametre belirsizliklerini ve bozucu etkileri etkin bir şekilde bastırmaktadır. ε ve γ değerlerinin artırılması, parametre değişikliklerine karşı sistemin gürbüzlüğü artırılmaktadır. Ancak bu katsayıların büyük seçilmesi akım dalgalanmalarını artırabileceğinden sistemin dinamik performansı ile akım kararlılığı arasında uygun bir denge kurulmalıdır. Makaledeki kontrol giriş ifadelerinin elde edilmesi için öncelikle dönüştürücünün d ve q eksenlerindeki matematiksel modeli yeniden düzenlenerek çıkış modülasyon gerilimleri açık biçimde yazılmalıdır. İnvörtör sistem modelinin bu yeniden düzenlenmiş hâli Eş. 16 ile verilmektedir.

$$\begin{aligned} v_d^* &= v_{od} - \omega L_f i_q + L_f \frac{di_d}{dt} \\ v_q^* &= v_{oq} + \omega L_f i_d + L_f \frac{di_q}{dt} \end{aligned} \quad (16)$$

Daha sonra, kayan yüzey tanımları kullanılarak akım türevleri ile kayan yüzey dinamiği arasındaki ilişki kurulmaktadır. Bu ilişki Eş. 17 ile ifade edilmektedir.

$$\begin{aligned} \dot{s}_1 &= \frac{di_d^*}{dt} - \frac{di_d}{dt} \\ \dot{s}_2 &= \frac{di_q^*}{dt} - \frac{di_q}{dt} \end{aligned} \quad (17)$$

İnvörtör için kayan kipli kontrol tasarımında i_d^*, i_q^* referans akımlarının anahtarlama frekansına kıyasla çok daha yavaş değiştiği ve dolayısıyla türevlerinin yaklaşık sıfır olduğu varsayılmaktadır ($\frac{di_d^*}{dt}, \frac{di_q^*}{dt} \approx 0$). Bu sadeleştirme altında elde edilen ifade Eş. 18 ile verilmektedir.

$$\begin{aligned} \frac{di_d}{dt} &= -\dot{s}_1 \\ \frac{di_q}{dt} &= -\dot{s}_2 \end{aligned} \quad (18)$$

Eş. 15'te verilen üstel erişim yasası, Eş. 18'de yerine yazıldığında akım türevi ile kayan yüzey dinamiği arasındaki denetim bağıntısı elde edilmektedir. Bu ara ifade Eş. 19 ile sunulmaktadır.

$$\begin{aligned} \frac{di_d}{dt} &= -(\varepsilon_1 s_1 + \gamma_1 \text{sat}(s_1)) \\ \frac{di_q}{dt} &= -(\varepsilon_2 s_2 + \gamma_2 \text{sat}(s_2)) \end{aligned} \quad (19)$$

Eş. 19 uygun biçimde yeniden düzenlendiğinde modülasyon gerilim bileşenlerinin elde edilmesinde kullanılan ara denetim ifadesi Eş. 20 ile elde edilmektedir

$$\begin{aligned} \frac{di_d}{dt} &= \varepsilon_1 s_1 + \gamma_1 \text{sat}(s_1) \\ \frac{di_q}{dt} &= \varepsilon_2 s_2 + \gamma_2 \text{sat}(s_2) \end{aligned} \quad (20)$$

Son olarak Eş. 20'de elde edilen ara ifade, Eş. 16'da verilen yeniden düzenlenmiş dönüştürücü modeline geri yerleştirildiğinde SMC tabanlı akım iç döngüsü için denetim girişleri Eş. 21'de verilmektedir.

$$\begin{aligned} v_{d,smc}^* &= v_{od} - \omega_a L_f i_q - L_f [\varepsilon_1 s_1 + \gamma_1 \text{sat}(s_1)] \\ v_{q,smc}^* &= v_{oq} + \omega_a L_f i_d - L_f [\varepsilon_2 s_2 + \gamma_2 \text{sat}(s_2)] \end{aligned} \quad (21)$$

Burada v_{od} ve v_{oq} filtre kapasitör geriliminin d ve q eksenlerindeki bileşenlerini; ω_a açılma frekansı; L_f ise filtre endüktansını temsil etmektedir. Kayma yüzeyi tanımları Eş. 14'ten alınarak Eş. 21'de yerine yazıldığında SMC tabanlı akım iç döngüsü kontrolörü için nihai matematiksel model Eş. 22 ile elde edilmektedir. Böylece dönüştürücünün çıkış modülasyon geriliminin d ve q eksen bileşenleri olan ($v_{d,smc}^*, v_{q,smc}^*$) gerekli denetim girişlerini sistem durumları ve kayma yüzeyleri cinsinden ifade etmektedir.

$$\begin{aligned} v_{d,smc}^* &= v_{od} - \omega_a L_f i_q - L_f \varepsilon_1 (i_d^* - i_d) - L_f \gamma_1 \text{sat}(i_d^* - i_d) \\ v_{q,smc}^* &= v_{oq} + \omega_a L_f i_d - L_f \varepsilon_2 (i_q^* - i_q) - L_f \gamma_2 \text{sat}(i_q^* - i_q) \end{aligned} \quad (22)$$

Bu denklem, SMC kontrolörünün gerçek akımları (i_d, i_q) referans değerleri (i_d^*, i_q^*)'ye yönlendirmek amacıyla ürettiği modülasyon gerilimi bileşenleri Şekil 2'deki (v_{md}, v_{mq})'yu tanımlamaktadır. Burada v_{md} ve v_{mq} modülasyon geriliminin sırasıyla d eksen ve q eksen bileşenleridir. Böylece kontrol yasası, eşdeğer kontrol ve anahtarlama (gürbüzlük) bileşenlerinden oluşan bütünsel bir yapı halinde elde edilmektedir. Eşdeğer kontrol, sistemi kayan yüzey üzerinde tutmak amacıyla genellikle bilinen sistem dinamiklerinin ileri besleme yoluyla iptal edilmesini ve referans türevlerinin izlenmesini içermektedir. Anahtarlama (gürbüzlük) bileşeni ise bozucu etkilere rağmen sistemi kayan yüzeye yönlendiren ve bu yüzey üzerinde kalmasını sağlayan kısımıdır.

2.4. Lyapunov Kararlılık Analizi (Lyapunov Stability Analysis)

Tasarlanan SMC kontrolörünün kararlılığını ispatlamak amacıyla Lyapunov kararlılık teorisi kullanılmıştır. Burada $i = 1, 2$ olmak üzere tasarım parametreleri $\varepsilon_1, \varepsilon_2 > 0, \gamma_1, \gamma_2 > 0$ koşullarını sağlamaktadır. Ayrıca $\text{sat}(s_i)$, bir doyum sınır katmanı (boundary layer) fonksiyonu olup tüm ($s_i \cdot \text{sat}(s_i) \geq 0$) değerleri için kendi argümanı ile aynı işarete sahiptir. Lyapunov kararlılık analizinde temel koşul, aday fonksiyon V 'nin pozitif tanımlı ($V > 0$), zaman türevi $\dot{V}$ 'nin ise negatif tanımlı ($\dot{V} < 0$) olmasıdır. Bu kapsamda d ve q eksen akım hatalarına (e_d, e_q) karşılık gelen kayan yüzeyleri temel alan pozitif tanımlı (positive-definite) ($V > 0$) bir Lyapunov aday (V) fonksiyonu Eş. 23 ile seçilmektedir.

$$V(s_1, s_2) = \frac{1}{2} (s_1^2 + s_2^2) \quad (23)$$

Burada s_1 , ve s_2 , Eş. 14'te tanımlanan kayan yüzeylerdir. Sistemin kararlı olabilmesi ve durum yörüngelerinin sonlu sürede kayan yüzeye ulaşabilmesi için Lyapunov fonksiyonunun zaman türevinin $\dot{V}$ 'nin negatif tanımlı olması gerekmektedir. Lyapunov aday fonksiyonunun türevi Eş. 24 ile elde edilmektedir.

$$\dot{V} = s_1\dot{s}_2 + s_1\dot{s}_2 \quad (24)$$

Eş. 15'te verilen erişim yasası Eş. 24'te yerine yazıldığında, Lyapunov türevinin tüm pozitif tasarım parametreleri için negatif yarı tanımlı olduğu görülmektedir. Ayrıca doyum fonksiyonunun sınır katmanı özelliği dikkate alındığında, kayan yüzeye yönelik yakınsamanın üstel bir karakterde olduğu görülmektedir. Sistemin üstel yakınsama özelliği ve asimptotik kararlılığı Eş. 25 ile gösterilmektedir.

$$\dot{V} = s_1[-\varepsilon_1 s_1 - \gamma_1 \text{sat}(s_1)] + s_2[-\varepsilon_2 s_2 - \gamma_2 \text{sat}(s_2)] \quad (25)$$

Yaklaşım yasası $\dot{V}$ denkleminde yerine konulduğunda elde edilen ifade Eş. 26 ile gösterilmektedir.

$$\dot{V} = -\varepsilon_1 s_1^2 - \gamma_1 s_1 \text{sat}(s_1) - \varepsilon_2 s_2^2 - \gamma_2 s_2 \text{sat}(s_2) \quad (26)$$

$\because \text{sat}(s_i)$ bir sınır fonksiyonu olup tüm s değerleri için $s_i \cdot \text{sat}(s_i) \geq 0$ koşulunu sağlamaktadır. Dolayısıyla $-\gamma_i s_i \text{sat}(s_i)$ terimi pozitif değildir, yani $-\gamma_i s_i \text{sat}(s_i) \leq 0$ olmaktadır. Bu terimler ihmal edilerek konservatif bir üst sınır elde edilmekte ve böylece Lyapunov türevi Eş. 27 ile ifade edilmektedir.

$$\dot{V} \leq -\varepsilon_1 s_1^2 - \varepsilon_2 s_2^2 \quad (27)$$

$\varepsilon_{\min} = \min\{\varepsilon_1, \varepsilon_2\} > 0$ olsun. Bu durumda $\dot{V} \leq -\varepsilon_{\min}(s_1^2 + s_2^2)$ eşitsizliği elde edilmektedir. Lyapunov fonksiyonunun türevinin

negatif yarı tanımlı olması $\dot{V} \leq -2\varepsilon_{\min} V$, ve erişim yasasının yapısı dikkate alındığında, sistemin kayan yüzeye üstel olarak yakınsadığı Eş. 28 ile ifade edilmektedir.

$$V(t) \leq V(0)e^{-2\varepsilon_{\min} t} \quad (28)$$

Böylece, $V(t) \rightarrow 0$ üstel olarak (eksponansiyel) azalmaktadır ve $t \rightarrow \infty$ üstel olarak $s_1(t) \rightarrow 0$ & $s_2(t) \rightarrow 0$ 'a yakınsar olmaktadır. Dolayısıyla, belirtilen varsayım altında $s_1 = s_2 = 0$ kayan manifoldu küresel üstel kararlıdır. Tüm katsayılar pozitif olduğu ve $s \cdot \text{sat}(s) \geq 0$ koşulunun sağlandığı dikkate alındığında, ($V > 0$) ve ($\dot{V} < 0$) şartları sağlanmaktadır. Bu durum, sistemin Lyapunov kriterine göre asimptotik olarak kararlı olduğunu göstermektedir. Ayrıca kayan

yüzeyin küresel üstel kararlılığı sağlandığından önerilen SMC tabanlı akım denetleyicisinin hem dinamik tepki hem de bozululara karşı dayanıklılık açısından etkin bir kontrol yapısı sunduğu doğrulanmaktadır.

3. Sonuçlar ve Tartışmalar (Results and Discussions)

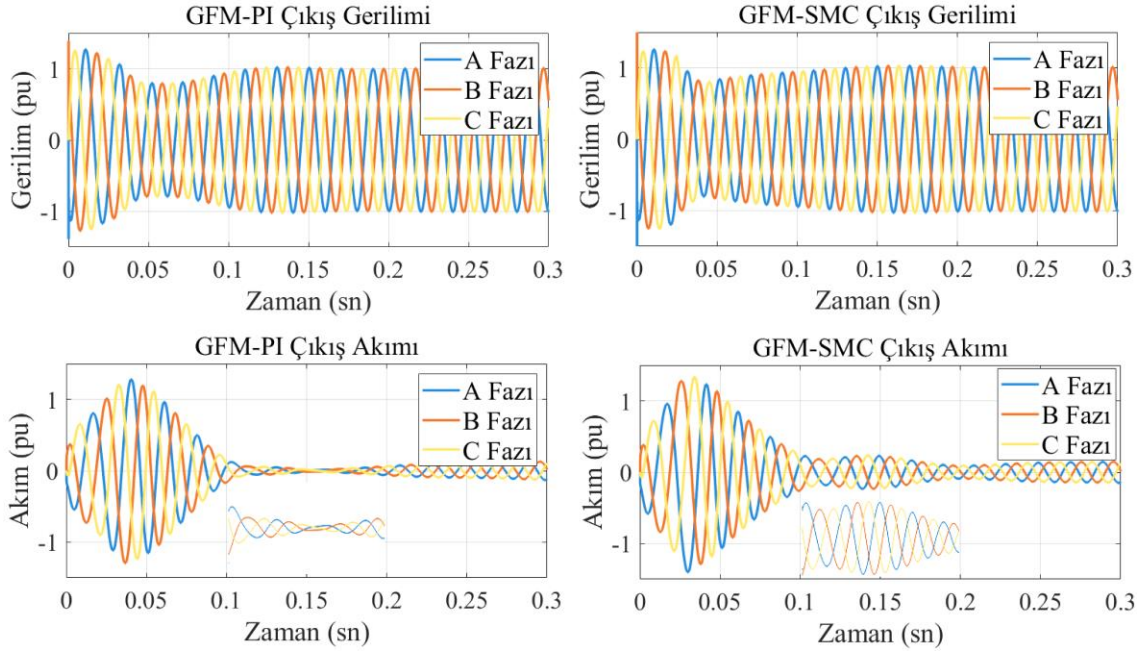
GFM'nin çalışma performansını değerlendirmek amacıyla GC0137 standardında belirtilen bir dizi işletme testine dayalı olarak farklı frekans değerleri için simülasyonlar gerçekleştirilmiştir. Bu testler, bir GFM modelinin performansını Büyük Britanya Şebeke Oluşturan Uygulama Kılavuzu (GC0137-2023 standardı) 5.2. bölümünde tanımlanan tepki gereksinimleriyle karşılaştırmak üzere tasarlanmıştır. MATLAB/Simulink Simscape™ Electrical ortamında oluşturulan test sisteminin tek hat şeması Şekil 1'de gösterilmektedir. Sisteme frekans rampa testi uygulanarak SMC ve PI kontrolü, GFMI'nin frekans değişimlerine karşı iç akım kontrolü performansları bakımından karşılaştırılmıştır. Önerilen yöntemin IEEE Std 2800-2022 standardında belirtilen dinamik tepki hızı, yükselme zamanı, maksimum aşım ve sönümleme oranı gibi performans kriterlerini doğrulamak amacıyla çeşitli GBGF-I işletim senaryoları simüle edilmiştir [41]. Sistemin dinamik performansını doğrudan etkileyen kontrolcü parametrelerinin belirlenmesinde, kontrol yapısının gereksinimlerine uygun farklı yöntemler izlenmiştir. PI kontrolcü parametrelerinin belirlenmesinde bant genişliği yöntemi kullanılmıştır. Kaskat kontrol yapısının kararlı çalışabilmesi için iç akım kontrol döngüsünün bant genişliğinin dış gerilim kontrol döngüsüne kıyasla belirgin ölçüde yüksek olması (akım döngüsünün daha hızlı olması) esas alınmıştır. Bu sayede iki döngü arasındaki dinamik etkileşim (coupling) en aza indirilmiş ve düşük aşım ile hızlı yerleşme süresi elde edilmiştir. SMC kontrolcüsünün tasarım parametreleri ise sistemin kayan yüzeye ulaşma hızını artıracak ve türetilen Lyapunov kararlılık kriterlerini sağlayacak şekilde deneme-yanılma yöntemi ile belirlenmiştir. Çalışmada incelenen sistemin model parametreleri ile GFMI parametreleri Tablo 1'de sunulmuştur. Elde edilen sonuçlar, aşağıdaki alt başlıklarda ayrıntılı olarak sunulmakta ve tartışılmaktadır.

3.1. Durum 1 Analizleri (Case 1 Analyses)

Dış bozucu etken bulunmadığı durumda GFM için önerilen her iki denetim stratejisi, aynı kararlı durumda aktif çıkış gücünün yaklaşık 0,75 p.u. düzeyinde kararlı hâle gelmesini sağlamaktadır. Ayrıca üç fazlı çıkış gerilimi dalga formları beklenen sinüzoidal karakteristikleri sergilemektedir. PI kontrol durumunda ise GFM çıkış akımı dalga formları, Şekil 6'da gösterildiği üzere bozulmaya maruz kalmaktadır. Buna karşılık SMC kontrolcüsünün daha üstün performans sergilediği gözlemlenmektedir. Bu durum, PI kontrolünün sınırlı bant genişliği ve bozucu etkiler karşısındaki duyarlılığı ile ilişkilendirilebilir.

Tablo 1. İncelenen GFM-VSM konfigürasyonunun parametreleri (Parameters of the examined GFM-VSM configuration)

Parametre	Değer	Parametre	Değer
Nominal gerilim $V_{L-L,RMS}$ @ PCC	415 V	Şebeke direnci	3 Ohm
Nominal güç ve frekans	500 KVA, 50 Hz	Şebeke gerilimi $V_{L,RMS}$	11000 V
DC bara gerilimi	1100 V	Sanal empedans katsayısı (pu.Ohm/pu.A)	0.1875
VSM Atalet sabiti (pu)	1 s	Sanal X/R oranı	13.2
VSM Sönümleme sabiti (pu/Hz)	1.056	Transformatör nominal güç	500 KVA
Aktif güç referansı	0.75 pu	Transformatör verimliliği	95
Frekans eğim kazancı	10 (pu, W/Hz)	Yüzde gerilim regülasyonu	6
Reaktif güç referansı	0.3 pu	Transformatör sarım oranı	415/11,000 = 0.0377
Reaktif güç eğim kazancı (pu, V/VAr)	0.3 pu	İletim hattı uzunluğu	2 km
Gerilim referansı (pu)	1 pu	İletim hattı direnci	4.0468 ohm
Şebeke endüktansı	0.05 H	İletim hattı endüktansı	5e-3 H
Gerilim Oransal Kazanç k_{pv}	0.3	Akım Oransal Kazanç k_{pi}	1.5
Gerilim İntegral Kazanç k_{iv}	180	Akım İntegral Kazanç k_{ii}	10
Yaklaşım Hızı Katsayısı $\varepsilon_{1,2}$	400	Anahtarlama Kazancı $\gamma_{1,2}$	1000



Şekil 6. Normal çalışma koşulları altında akım ve gerilim (Current and voltage under normal operating conditions)

Tablo 2. GC0137 ve ECC Kapsamında Kritik Frekans ve Dayanım Sınır Değerleri
(Critical Frequency and Withstand Limits under GC0137 and ECC)

Parametre (Parameter)	Aralık/Değer (Range/Value)	Gereklilik/Süre (Requirement/Duration)
Frekans Çalışma Aralığı	51.5 Hz – 52.0 Hz	En az 15 dakika çalışma
	51.0 Hz – 51.5 Hz	En az 90 dakika çalışma
	49.0 Hz – 51.0 Hz	Sürekli Çalışma (Continuous)
	47.5 Hz – 49.0 Hz	En az 90 dakika çalışma
	47.0 Hz – 47.5 Hz	En az 20 saniye çalışma
RoCoF Dayanımı	± 1.0 Hz/s	Lineer aktif güç tepkisi (Linear Response)
	± 2.0 Hz/s	Sistemden kopmadan dayanım (Withstand)

3.2. Durum 2 Analizleri (Case 2 Analyses)

Değişken şebeke frekansı altında GFMI'nin frekans tepki karakteristiklerinin incelenmesi, GC0137'de vurgulanan kritik bir husustur. Bu çalışmada frekans bozucu etkisi, frekans rampa testleri ile uygulanmıştır. Farklı frekans rampaları altında PI ve SMC kontrol stratejileri için GFMI'nin aktif çıkışı ve sönümlleme gücü ayrıntılı olarak incelenmiştir.

Önerilen kontrol stratejisinin performansını ve şebeke kodu uyumluluğunu doğrulamak amacıyla gerçekleştirilen simülasyonlarda GC0137 standardı ve Büyük Britanya Şebeke Kodu (Grid Code), Sayı 6, Revizyon 16'da tanımlanan kritik operasyonel sınırlar ve test koşulları referans alınmıştır. GC0137'de belirtilen (ECP A.9.1.9.3), (ECP A.9.1.9.4) ve (ECP A.9.1.9.8) maddelerine dayalı olarak aşağıdaki senaryolar incelenmiştir [26, 27]. Bu senaryolar, GFMI'nin frekans değişimlerine karşı aktif güç destek kabiliyetini ve dinamik tepki performansını değerlendirmek amacıyla seçilmiştir.

Tablo 2'de verilen kritik sınır değerleri, Büyük Britanya şebekesinin bağlı olduğu ve ilgili standardın atıfta bulunduğu Avrupa Bağlantı Koşulları (European Connection Conditions – ECC) dokümanından alınmıştır. Bu kapsamda, ECC.6.1.2 (frekans değişimleri), ECC.6.3.13 (RoCoF değişimleri) ve Ek E3 (Minimum Frekans Yanıt Kabiliyeti Gereksinimleri) bölümleri referans alınmıştır. ECC dokümanının ECC.6.1.2.1.1 maddesi gereğince Avrupa elektrik iletim sistemi frekansı nominal olarak 50 Hz olup olağanüstü durumlar

dışında 49,5–50,5 Hz aralığında kontrol edilmektedir. Ancak ECC.6.1.2.1.2 maddesi kapsamında olağanüstü durumlarda sistem frekansı 52 Hz seviyesine kadar yükselebilmekte veya 47 Hz değerine kadar düşebilmektedir. Kullanıcıya ait santral ve donanım tasarımının, Şebeke Yönetmeliği CC.6.1/ECC.6.1'de tanımlanan sistem gerilimi ve frekans çalışma aralıklarını, ayrıca bağlantı noktasındaki SCR ile X/R oranlarının içermesi gerekmektedir. Tablo 2'de verilen kritik sınır değerleri, DC bağlantılı bir Güç Parkı Modülünün (Power Park Module) sistemden ayrılmaksızın, nominal değerden sapma gösteren farklı frekanslar altında çalışmasını sürdürülebilmesi için gerekli minimum süreleri ifade etmektedir. Bu sınırlar, GFMI tabanlı sistemlerin frekans sapmaları altında sistemden ayrılmadan çalışabilme kabiliyetinin değerlendirilmesi açısından kritik öneme sahiptir.

3.2.1. Senaryo 1: Düşük Şebeke Frekans Değişimi (Scenario 1: Low Grid Frequency Deviation)

Şebeke frekansına 0,5 Hz büyüklüğünde küçük bir değişim uygulanarak GFM'nin frekans rampasını izleme ve sönümlleme gücü davranışı değerlendirilmiştir. Şebekenin başlangıç frekansı 50 Hz olarak belirlenmiş, ardından +0,5Hz ve -0,5Hz değerlerinde 1 Hz/s RoCoF değerine sahip frekans rampası uygulanmıştır. Bu teste ait sonuçlar Şekil 7'de gösterilmektedir. Olayın yaklaşık 3 sn'de başlatıldığı ve frekansın yaklaşık 3,5 sn'de 50,5 Hz değerine ulaştığı görülmektedir. GFM birimi, emüle edilmiş atalet desteği sağlamak amacıyla pozitif RoCoF durumunda aktif güç çıkışını azaltarak hızlı

ve etkin bir frekans desteği sağlamaktadır. Şebekedeki frekans değişiminin tam davranışını göstermek amacıyla olayın yaklaşık 5,5 sn'de ters yönde başlatıldığı ve frekansın yaklaşık 6 sn'de tekrar 50 Hz değerine ulaştığı görülmektedir. Bu aşamada GFM birimi, negatif RoCoF durumuna yanıt olarak aktif güç çıkışını artırmakta ve benzer şekilde etkin bir rol oynayarak hızlı frekans desteği sağlamaktadır.

Elde edilen sonuçlar, SMC stratejisinin daha hızlı tepki verdiğini ve daha düşük sapma ile kararlı durumdaki aktif güç seviyesine ulaştığını göstermektedir. Buna karşılık PI kontrol stratejisi daha yavaş bir tepki sergilemekte ve belirgin bir aşım oluşturmaktadır. Bu sonuç, SMC kontrolcüsünün yüksek bant genişliği ve bozucu etkilere karşı gürbüz yapısı sayesinde frekans değişimlerine daha hızlı ve kararlı bir şekilde yanıt verdiğini göstermektedir.

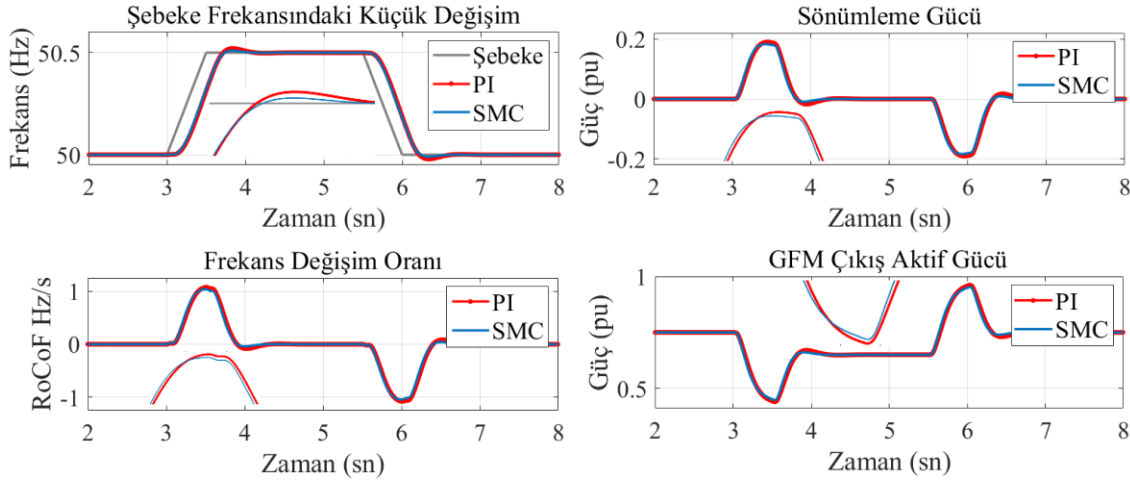
3.2.2. Senaryo 2: Aşırı Şebeke Frekans Değişimi (Scenario 2: Excessive Grid Frequency Deviation)

Bu test, GC0137 standardı kapsamında zorunlu tutulan aşırı şebeke frekans değişimleri karşısında GBGF-I tepkisinin değerlendirilmesi amacıyla gerçekleştirilmiştir. Bu kapsamda şebeke frekansı 50 Hz'den 52 Hz'e 2 Hz/s hızında artırılmış ve bu değerinde sabit tutulmuştur. Olayın yaklaşık 3 sn'de 2 Hz/s büyüklüğünde bir RoCoF ile

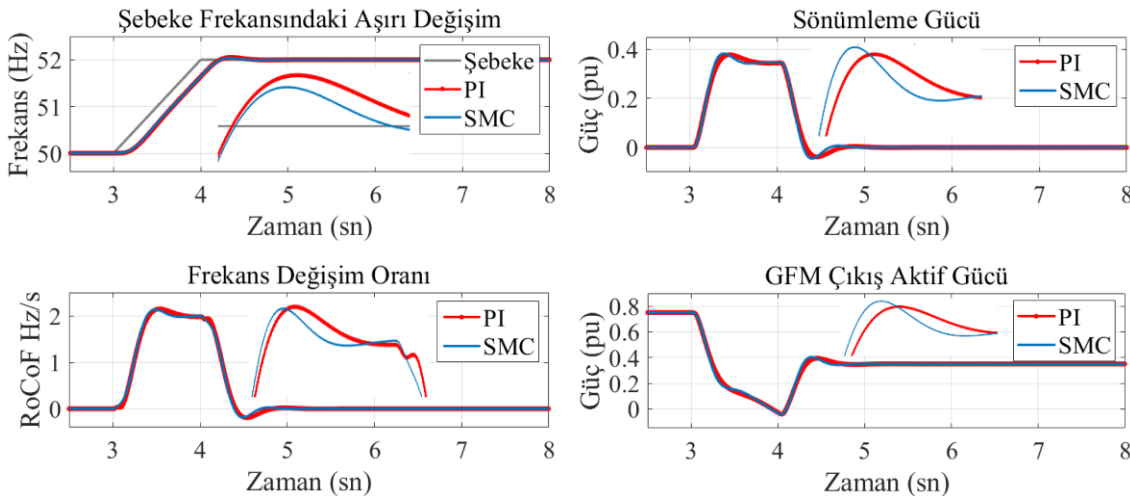
başlatıldığı ve frekansın yaklaşık 4 sn'de 52 Hz değerine ulaştığı Şekil 8'de görülmektedir. GFM birimi, atalet emülasyonu sağlamak amacıyla pozitif RoCoF durumunda aktif güç çıkışını azaltarak hızlı ve etkin bir frekans desteği sunmaktadır. Şekil 8'de gösterildiği üzere, şebeke oluşturan santralin etkin RoCoF tepki çıkış gücü, aktif sönümleme ve sistem frekans tepkileri her iki kontrolcü için GC0137'de tanımlanan (ECP A.9.1.9.4) ve (ECP A.9.1.9.8) maddeleri ile uyumlu olarak gerçekleşmiştir. SMC tabanlı GFM yapısının daha yumuşak bir geçiş profili ve daha hızlı kararlı duruma ulaşma performansı sergilediği görülmektedir. Ayrıca önerilen stratejinin, frekans bozucu etkiler altında aktif güç çıkışını hızlı ve kararlı bir şekilde ayarlayabildiği tespit edilmiştir. Bu sonuç, SMC kontrolcüsünün yüksek frekanslı bozucu etkiler altında dahi kararlılığı koruyarak daha düşük aşım ve daha hızlı yerleşme süresi sağladığını göstermektedir.

3.2.3. Senaryo 3: Tam Frekans Aralığı (Scenario 3: Full Frequency Range)

GC0137 standardı kapsamındaki bu test, (ECP A.9.1.9.3) ve (ECP A.9.1.9.8) maddelerinde belirtilen geniş şebeke frekansı değişimleri karşısında GBGF-I tepkisini değerlendirmek amacıyla gerçekleştirilmiştir. Atalet sabiti (H) ve diğer sistem parametreleri,



Şekil 7. 1 Hz/s RoCoF ile uygulanabilir frekanstaki değişim için GFMİ'nin aktif ve sönümleme güç tepkisi
(Response of GFM model for change in applicable frequency with ROCOF of 1 Hz/s)



Şekil 8. 2 Hz/s RoCoF ile uygulanabilir frekanstaki değişim için GFMİ'ye ait aktif ve sönümleme güç tepkisi
(Response of GFM model for change in applicable frequency with RoCoF of 2 Hz/s)

önceki test senaryolarında olduğu gibi sabit tutulmuştur. Bu test senaryosu, hem yüksek RoCoF hem de düşük frekans sürüş (Low-Frequency Ride-Through – LFRT) koşullarını içeren, tam aralık frekans bozulması altında gerçekleştirilen en zorlu çalışma durumunu temsil etmektedir. Bu kapsamda şebeke frekansı yaklaşık 3 sn civarında 2 Hz/s hızında uygulanan pozitif bir frekans rampası ile 2 Hz artırılarak 52 Hz seviyesine ulaşmakta ve bu değerinde kararlı hâle gelmektedir. Sistem koşulların yaklaşık 5 saniye boyunca dengelenmesine izin verilmekte ve ardından ($t = 9\text{--}14\text{ sn}$) aralığında 1 Hz/s hızında negatif bir frekans rampası uygulanarak sistem frekansı yaklaşık 5 Hz azaltılmaktadır. Şekil 9'da gösterildiği üzere, şebeke oluşturan güç santralini tüm frekans aralığı boyunca etkin RoCoF tepki gücü sağlayabildiği görülmektedir. İlk frekans artışı sırasında ($t = 3\text{--}4\text{ sn}$), her iki kontrolcüyü de yaklaşık 0,35 pu seviyesinde tepe yapan bir sönümleme gücü enjekte etmektedir. Rampayı takiben, her iki sistem de $t = 10\text{ sn}$ 'ye kadar kararlı bir şekilde çalışmaktadır.

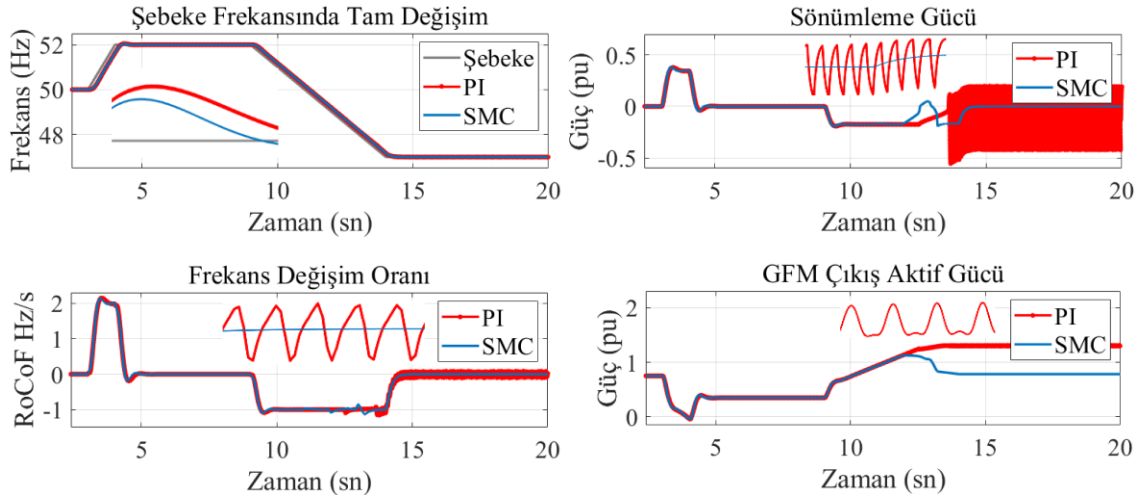
Negatif frekans rampası sırasında ($t = 10\text{--}14\text{ sn}$), SMC kontrolörü kararlı ve pürüzsüz kalarak sönümleme gücünü kademeli olarak ayarlamaktadır. Buna karşılık PI kontrolörü yaklaşık 14 sn'den itibaren genliği ve frekansı artan salınımlar göstermektedir. PI kontrolünde gözlenen bu kararsız davranış, düşük frekans ve yüksek stres koşullarında sınırlı gürbüzlğe işaret etmektedir. SMC kontrolünün kararlılığı ve sönümleme gücü kontrolünü korurken, PI kontrolü salınımlı ve kararsız bir çalışma rejimine girmektedir. Bu durum, önerilen SMC yaklaşımının GC0137 standardında tanımlanan en zorlu frekans koşulları altında daha yüksek gürbüzlük ve şebeke oluşturma kabiliyeti sunduğunu açıkça göstermektedir. Bu sonuç, SMC kontrolünün yüksek derecede doğrusal olmayan ve bozucu etkilerin baskın olduğu koşullarda dahi kararlılığı koruyarak sistem performansını önemli ölçüde iyileştirdiğini göstermektedir.

Klasik kayan kipli yaklaşım yasaası genellikle sembolik signum fonksiyonu $\text{sgn}(s)$ kullanılarak tanımlanmakta olup bu durum, ani anahtarlama davranışı nedeniyle yüksek frekanslı salınımlara yol

çatabilmektedir. Ancak bu çalışmada, sistem durumunun kayan yüzeye yönelmesini ve bu yüzeyde kararlı kalmasını sağlamak amacıyla Eş. 15'te belirtildiği üzere sınır katmanı (boundary layer) oluşturan doyum (saturation) fonksiyonu kullanılmıştır. Önerilen tasarımda çatırdama etkisini azaltmak amacıyla literatürde yaygın olarak kullanılan bu yaklaşım tercih edilmiş ve klasik signum fonksiyonu daha az çatırdama etkisi göstermektedir [19]. Elde edilen simülasyon sonuçları (özellikle Şekil 9), önerilen kontrol stratejisinin kararlılık performansını açıkça ortaya koymaktadır. Grafikler incelendiğinde, geleneksel PI kontrolcünün (kırmızı eğri) özellikle sönümleme gücü ve aktif güç çıkışında yüksek genlikli salınımlar sergilediği, buna karşılık SMC kontrolcünün (mavi eğri) bu salınımları önemli ölçüde azalttığı görülmektedir. Bu durum, SMC kontrolünün sınır katmanı yaklaşımı sayesinde yüksek frekanslı anahtarlama etkilerini bastırarak daha kararlı ve pürüzsüz bir dinamik tepki sağladığını göstermektedir.

Tablo 3'te sunulan sonuçlar, SMC'nin PI kontrolöre kıyasla daha hızlı tepki ve yükselme süreleri, daha düşük aşım ve daha yüksek sönümleme sağladığını göstermektedir. Bu durum, SMC tabanlı iç akım kontrolü yalnızca geçici hâl performansını iyileştirmekle kalmayıp aynı zamanda GC0137 standardında belirtilen dinamik uyum gerekliliklerini PI kontrolöre kıyasla daha yüksek düzeyde karşıladığını ortaya koymaktadır. Elde edilen sonuçlar, kayan kipli kontrolün üstün sönümleme dinamikleri sağlayarak frekans geçişleri sırasında daha yumuşak güç değişimlerine olanak tanıdığını göstermektedir. Çalışma ayrıca, SMC'nin dış bozucu etkilere karşı daha etkin olduğu, şebeke oluşturan bir yapıda güç koordinasyonunu daha başarılı bir şekilde gerçekleştirdiği ve daha yüksek geçici dayanıklılık sergilediği belirlenmiştir. Buna karşılık klasik PI kontrolcü, belirgin aşım değerleri nedeniyle zorlanmaktadır.

Aşırı frekans bozulması ve geniş frekans aralığı testlerinde SMC tabanlı kontrolcü, olay boyunca yüksek uyarlanabilirlik, hassas frekans takibi ve kararlı güç modülasyonu sergilemiştir. Bu durum,



Şekil 9. Farklı RoCoF ile uygulanabilir frekandaki değişimler için GFM'nin aktif ve sönümleme güç tepkisi (Response of GFM model for change in applicable frequency with different RoCoF)

Tablo 3. Kontrolcülerin aktif çıkış dalga tepkileri (Aktif output wave responses of controllers)

Özellik	Kontrolcü Türleri	
	PI	SMC
Tepki Zamanı (Reaction time)	0,136 s	0,118 s
Yükselme Zamanı (Rise Time)	0,17 s	0,14 s
Maksimum Aşma (Maximum overshoot) (%)	21,2	20,3
Sönümleme oranı (damping ratio)	0,443 s	0,453 s

GFM'nin Geniş Frekans Geçiş (Wide-Frequency Ride-Through – WFRT) kabiliyetini doğrulamaktadır. Bu çalışmada GC0137 test senaryolarının gerektirdiği uzun simülasyon süreleri nedeniyle Ortalama Değerli Konvertör Modeli kullanılmıştır. Bu model, yüksek frekanslı anahtarlar harmoniklerini filtrelemektedir. Ayrıca GC0137 standardı kapsamında gerçekleştirilen frekans testlerinde toplam harmonik bozulma (THD) analizleri yer almadığından, bu çalışma kapsamında değerlendirilmemiştir. Bu bulgular, SMC denetleyicisinin yüksek doğrusal olmayan ve bozucu etkilerin baskın olduğu güç sistemi koşullarında üstün performans sunduğunu açıkça ortaya koymaktadır.

4. Sonuçlar (Conclusions)

Yenilenebilir enerji kaynaklarının şebeke yapısını değiştirdiği günümüzde, GFM-IBR gibi gelişmekte olan teknolojilerin sorunsuz ve güvenilir entegrasyonu için katı şebeke kodlarına uyum sağlanması kritik öneme sahiptir. GC0137 standardı, şebeke oluşturan teknolojilere yönelik teknik ve işletme kriterlerinin tanımlanmasında önemli bir ilerlemeyi temsil etmektedir. GC0137 standardında belirtilen frekans testlerine uyumlu olarak gerçekleştirilen bu çalışmada, GFM yapısında kararlı bir kontrol sağlamak amacıyla oransal-integral ve kayan kipli kontrol yöntemleri kaskat bir kontrol yapısı önerilmiştir. MATLAB/Simulink Simscape™ Electrical ortamında gerçekleştirilen simülasyon çalışmaları kapsamında aktif çıkış gücü ve enjekte edilen sönümleme gücü tepkileri analiz edilerek en uygun kontrol yaklaşımı belirlenmiştir. Elde edilen sonuçlar incelendiğinde, GC0137 ve IEEE Std 2800-2022 standardında tanımlanan performans kriterleri açısından SMC yönteminin üstünlüğünü ortaya koymaktadır. Buna göre, dinamik tepki hızında yaklaşık %13 (0.136 sn $\rightarrow$ 0.118 sn), yükselme zamanında ise %18'lik (0.17 s $\rightarrow$ 0.14 s) iyileşme sağlanmıştır. Ayrıca maksimum aşımı sınırlı ölçüde azaltarak (%21.2'den %20.3'e) sistemin daha güvenli çalışmasına katkıda bulunmuş ve sönümleme oranını artırarak (0.443'ten 0.453'e) salınımların daha hızlı bastırılmasını mümkün kılmıştır. Böylece maksimum aşım ve sönümleme oranı bakımından da SMC stratejisinin daha başarılı olduğu belirlenmiştir. 1–2 Hz/s RoCoF ve tam aralık frekans rampası gibi bozucu etkiler altında SMC kontrolörünün sistem kararlılığını koruduğu, hassas frekans ve aktif güç takibi sağladığı ve salınımları etkin biçimde bastırdığı gözlemlenmiştir. Düşük, aşırı ve tam frekans aralığı senaryolarında elde edilen sonuçlar, SMC yaklaşımının GC0137 şebeke kodu ölçütleri altında üstün izleme performansı ve bozucu etkiyi bastırma kabiliyeti bulunduğunu doğrulamaktadır. Bu bulgular doğrultusunda, tek bir kontrolcü yerine gerilim döngüsü için PI, akım döngüsü için ise SMC'nin kullanıldığı hibrit bir kontrol yapısı önerilmiştir. Önerilen yapı, literatürdeki daha karmaşık yöntemlere (ISMC, ASMC vb.) kıyasla daha sade olmasına rağmen, SCR ve X/R parametrelerinin dikkate alınması ve GC0137 uyumluluğu açısından belirgin bir üstünlük sağlamaktadır. Sunulan tasarım, şebeke kodunun tanımladığı 2 Hz/s gibi ekstrem RoCoF olayları ve geniş frekans aralıklarında dahi kararlılığını koruyarak standartlara uyumlu bir çözüm sunmaktadır. Bu yönüyle çalışma, literatürdeki doğrulama (validasyon) eksikliğine katkı sağlamaktadır. Elde edilen sonuçlar, önerilen yöntemin etkinliğini açıkça ortaya koymaktadır. Gelecek çalışmalar kapsamında özellikle zayıf veya düşük ataletli şebekelerde sistem dayanıklılığını artırmak amacıyla SMC tabanlı denetleyici parametrelerinin meta-sezgisel optimizasyon algoritmaları ile belirlenmesi hedeflenmektedir. Bu yaklaşımın, GFM-IBR sistemlerinin performansını artırarak yenilenebilir enerji kaynaklarının daha yüksek oranlarda entegrasyonunu mümkün kılması ve daha kararlı, güvenilir elektrik şebekelerinin geliştirilmesine katkı sağlanması beklenmektedir.

Kaynaklar (References)

1. Rathnayake D. B. *et al.*, Grid forming inverter modeling, control, and applications, IEEE Access, 9 (114781-114807), 2021.

2. Mohammed N., Udawatte H., Zhou W., Hill D. J., and Bahrani B., Grid-forming inverters: A comparative study of different control strategies in frequency and time domains, IEEE Open Journal of the Industrial Electronics Society, 5 (185-214), 2024.
3. Shafiee Q., Naderi M., and Bevrani H., Microgrids: Dynamic Modeling, Stability and Control. John Wiley & Sons, New Jersey, A.B.D. 2023.
4. Mohammed N., Alhelou H. H., and Bahrani B., Grid-forming power inverters: control and applications. CRC press. 2023.
5. Yashen L. *et al.*, Research roadmap on grid-forming inverters, National Renewable Energy Laboratory. NREL, 1 (1-60), 2020.
6. D'Arco S., Suul J. A., and Fosfo O. B., A Virtual Synchronous Machine implementation for distributed control of power converters in SmartGrids, Electric Power Systems Research, 122 (180-197), 2015.
7. Beck H.-P. and Hesse R., Virtual synchronous machine, in 2007 9th international conference on electrical power quality and utilisation: IEEE, 1-6, 2007
8. Driesen J. and Visscher K., Virtual synchronous generators, in 2008 IEEE power and energy society general meeting-conversion and delivery of electrical energy in the 21st century: IEEE, 1-3, 2008
9. Zhong Q.-C. and Weiss G., Synchronverters: Inverters that mimic synchronous generators, IEEE transactions on industrial electronics, 58 (4), 1259-1267, 2010.
10. Prabhakar K., Jain S. K., and Padhy P. K., Virtual inertia control of isolated microgrids using GWO-optimized modified IMC controller, Transactions of the Institute of Measurement and Control, 01423312241263134, 2024.
11. Hasen S. A., SÖNMEZ Ş., and Ayasun S., Enhancement of stability delay margins by virtual inertia control for microgrids with time delay, Turkish Journal of Electrical Engineering and Computer Sciences, 30 (6), 2221-2236, 2022.
12. Bevrani H., Ise T., and Miura Y., Virtual synchronous generators: A survey and new perspectives, International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 54 (244-254), 2014.
13. Matevosyan J. *et al.*, Grid-forming technology in energy systems integration, ESIG High Share of Inverter-Based Generation Task Force: Report. Available online: <https://www.esig.energy/wp-content/uploads/2022/03/ESIG-GFM-report-2022.pdf>, 2022.
14. Long B., Zhu S., Rodriguez J., Guerrero J. M., and Chong K. T., Enhancement of power decoupling for virtual synchronous generator: A virtual inductor and virtual capacitor approach, IEEE Transactions on Industrial Electronics, 70 (7), 6830-6843, 2022.
15. Zhao F., Wang X., Zhou Z., Sun Y., Harnfors L., and Zhu T., Robust grid-forming control with active susceptance, IEEE Transactions on Power Electronics, 38 (3), 2872-2877, 2022.
16. Busada C., Jorge S. G., and Solsona J. A., Current-controlled synchronverter: a grid fault tolerant grid forming inverter, IEEE Transactions on Industrial Electronics, 71 (4), 3233-3241, 2023.
17. Park J.-Y. and Chang J.-W., Novel autonomous control of grid-forming DGs to realize 100% renewable energy grids, IEEE Transactions on Smart Grid, 15 (3), 2866-2880, 2023.
18. Rayane K., Rabhi A., Oubbati B. K., and Benzoubir M., Enhanced Grid-Forming Inverter Control Through Integral Sliding Mode Control in a Cascaded Framework, in 4th International Conference on Smart Grid and Renewable Energy, SGRE 2024 - Proceedings: Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc. 2024
19. Hu C., Chen H., and Tang A., Sliding mode control strategy of grid-forming energy storage converter with fast active support of frequency and voltage, Frontiers in Energy Research, Article 12 (2024), Art no. 1416591, doi: 10.3389/fenrg.2024.1416591.
20. Yazdani S., Ferdowsi M., Davari M., and Shamsi P., Robust Sliding Mode Control of A Three-Phase Grid-Forming Inverter in Non-Ideal Grid Conditions and Isolated Mode of Operation, in Conference Proceedings - IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition - APEC, vol. 2020-March: Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., 3087-3091, 2020
21. Li Z., Zhang J., and Cheng Z., Adaptive SMC based cascaded control of the grid-forming inverter, (in English), International Journal of Electronics, Article 110 (10), 1891-1910, 2023.
22. Oshnoei A. and Blaabjerg F., Sliding Mode-based Model Predictive Control of Grid-Forming Power Converters, in 2023 European Control Conference, ECC 2023: Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc. 2023
23. A. Huque and Ramasubramanian D. "Grid Forming Inverters, EPRI Tutorial." <https://www.epri.com/research/products/000000003002030937> (accessed Oct 25, 2024, Feb 15, 2025).

24. Deepak Ramasubramanian *et al.* "Tutorial on Grid Forming Inverter Technology." IEEE PES General Meeting, https://resourcecenter.ieee-pes.org/education/tutorials/pes_ed_tut_gm23_071623_tut09 (accessed 15 Mar. 2025, 11 Jul 2023).
25. (ESIG) T.E.S.I.G. "Grid-Forming Specifications and Interconnection Requirements." ESIG. <https://www.esig.energy/working-users-groups/reliability/grid-forming/gfm-landscape/specifications-and-requirements/> (accessed June 10 2025, Apr. 15 2025).
26. Great Britain Grid Forming Best Practice Guide, (NESO) N. E. S. O., London, UK, 2023. [Online]. Available: <https://www.neso.energy/document/278491/download>
27. The grid code issue 6 revision 31, (NESO) N. E. S. O., 2025. [Online]. Available: <https://dcm.nationalenergyso.com/>
28. GC0137: The Minimum Specification Required for Provision of GB grid-forming (GBGF) Capability (formerly Virtual Synchronous Machine/VSM Capability). (NESO) N. E. S. O., London, UK, 2021. [Online]. Available: <https://www.neso.energy/industry-information/codes/gc/modifications/gc0137-minimum-specification-required-provision-gb-grid-forming-gbvf-capability-formerly-virtual-synchronous-machinevsm-capability>
29. Team M. S. Power Converter Circuit and Control Design with Simscape [Online] Available: https://www.mathworks.com/matlabcentral/fileexchange/131783-power-converter-circuit-and-control-design-with-simscape?s_tid=srchtitle_site_search_6_grid-forming
30. D'Arco S. and Suul J. A., A synchronization controller for grid reconnection of islanded virtual synchronous machines, in 2015 IEEE 6th International Symposium on Power Electronics for Distributed Generation Systems (PEDG): IEEE, 1-8, 2015
31. Avdiaj E., D'Arco S., Piegari L., and Suul J. A., Frequency-adaptive energy control for grid-forming mmcs under unbalanced conditions, IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Industrial Electronics, 4 (4), 1124-1137, 2023.
32. Rathnayake D. B., Razzaghi R., and Bahrani B., Generalized virtual synchronous generator control design for renewable power systems, IEEE Transactions on Sustainable Energy, 13 (2), 1021-1036, 2022.
33. D'Arco S., Suul J. A., and Fosso O. B., Control system tuning and stability analysis of virtual synchronous machines, in 2013 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition: IEEE, 2664-2671, 2013
34. D'Arco S., Suul J. A., and Fosso O. B., Small-signal modelling and parametric sensitivity of a virtual synchronous machine, in 2014 Power Systems Computation Conference: IEEE, 1-9, 2014
35. Paquette A. D. and Divan D. M., Virtual impedance current limiting for inverters in microgrids with synchronous generators, IEEE Transactions on Industry Applications, 51 (2), 1630-1638, 2014.
36. Li Z., Zang C., Zeng P., Yu H., Li S., and Bian J., Control of a grid-forming inverter based on sliding-mode and mixed H2/H ∞ control, (in English), IEEE Transactions on Industrial Electronics, Article 64 (5), 3862-3872, 2017, Art no. 7776920, doi: 10.1109/TIE.2016.2636798.
37. Pogaku N., Prodanovic M., and Green T. C., Modeling, analysis and testing of autonomous operation of an inverter-based microgrid, IEEE Transactions on power electronics, 22 (2), 613-625, 2007.
38. Mohammed S. A. Q., Razaq M. S., Choi H. H., and Jung J.-W., A robust adaptive PI voltage controller to eliminate impact of disturbances and distorted model parameters for 3-phase CVCF inverters, IEEE Transactions on Industrial Informatics, 16 (4), 2168-2176, 2019.
39. Abukan Y., Almalı M.N., Control of 2-Dof TRMS MIMO system using FOPID & FOSTSMC method, Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University, 38 (1), 605-615, 2023.
40. Mandaci M, Yildiz Ş., S.K., Testing and comparison of different control methods on a gimbal system, Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University, 40 (1), 219-236, 2024.
41. Association I. S., IEEE standard for interconnection and interoperability of inverter-based resources (IBRs) interconnecting with associated transmission electric power systems, IEEE Std, 2800-2022, 2022.

