

ELEKTRİK ENERJİSİ SİSTEMLERİNDE KARARLILIK ANALİZİ



Proje Konusu:

154 kV çift devre iletim hattının generatör tarafındaki ilk 15 km'lik kısmında 3-faz kısa devre arızası oluşmaktadır. Oluşan bu arızanın, $t_c=0.12s$ (hızlı koruma temizlemesi) ve $t_c=0.21s$ (yedek koruma temizleme süresi) süreleri ile temizlenerek geçici hal kararlılığının incelenmesi.

Hazırlayan:

ALİ ÖZKAN

1. Giriş

Güç sistemi kararlılığı; IEEE/CIGRE (2004) tanımına göre: *“Belirli bir başlangıç işletme koşulunda, bir fiziksel bozucuya maruz kaldığında, sistem değişkenlerinin sınırlı kalarak yeni bir denge durumuna ulaşabilme yeteneğidir.”*

Modern teknolojiye rağmen büyük ölçekli elektrik enerjisini ekonomik bir şekilde depolamak hâlâ mümkün olmadığından elektrik güç sistemlerinde üretim ve tüketim arasında anlık olarak sağlanması gereken hassas bir denge bulunmaktadır; sistemde üretilen aktif güç miktarı, kayıplar dâhil olmak üzere tüketilen güç miktarına her an eşit olmak zorundadır. Güç sistemi kararlılığı, bu bağlamda, bir bozucu etkiden (arıza, yük değişimi vb.) sonra sistemin senkronizmasını ve normal çalışma koşullarını yeniden kazanabilme yeteneği olarak tanımlanır. Kararlılık problemleri, büyük kesintilere (blackout) yol açabilmesi ve sistemin sürekli maruz kaldığı bozulmalar karşısında bütünlüğünü koruması gerekliliği nedeniyle kritik bir öneme sahiptir. Bu gereklilik de güç sistemi kararlılığı kavramını ortaya çıkarmaktadır.

Klasik kararlılık sınıflandırması, güç sistemlerinin bozucu etkilere verdiği tepkiyi rotor açısı, frekans kararlılığı ve gerilim kararlılığı başlıkları altında toplar.

Bu kararlılık türleri arasında rotor açısı kararlılığı, senkron makinelerin davranışının merkezinde yer almaktadır. Bir generatörün şebekeyle uyumlu çalışabilmesi için rotorunun şebekenin elektriksel referansına göre uyumlu bir açı (δ) ile dönmesi gerekmektedir. Bir arıza veya ani yük değişimi durumunda, generatörün mekanik giriş gücü (P_m) ile elektriksel çıkış gücü (P_e) arasındaki denge bozulur. Bu dengesizliğin rotor üzerindeki fiziksel karşılığı ve zamanla değişimi, güç sistemi dinamiğinin temeli olan Salınım (Swing) Denklemi ile ifade edilir:

$$2 \frac{H}{\omega_s} \frac{d^2 \delta}{dt^2} = P_m - P_e$$

Bu denklemde H atalet sabitini, ω_s senkron açısal hızı temsil ederken; eşitlik, rotor açısının ivmelenmesinin net güç farkı ($P_a = P_m - P_e$) tarafından belirlendiğini gösterir. Eğer mekanik güç elektriksel güçten büyükse rotor hızlanır ve açı artar; tersi durumda rotor yavaşlar. Çok makineli sistemlerde de farklı atalet ve güç değerlerine sahip makineler ortak bir sistem tabanına dönüştürülerek eşdeğer bir makine gibi analiz edilebilir ve bu temel salınım davranışı üzerinden incelenir.

Sistemin geçici hal kararlılığını, diferansiyel denklemleri zaman domenini kullanılarak çözmeden değerlendirebilmek için Eşik Alan Kriteri (Equal Area Criterion) kullanılır. Salınım denkleminde türetilen bu kriter, sistemin bir arıza sırasında kazandığı kinetik enerjiyi (ivmelenme alanı, **A1**), arıza temizlendikten sonra geri verip veremeyeceğini (yavaşlama alanı, **A2**) karşılaştırmaya dayanır. Kriterin özü, kararlılığın korunabilmesi için ivmelendirici güç ile yavaşlatıcı güç farkının açığa göre integrallerinin eşit olması, yani kazanılan enerjinin tamamen sönmünebilmesi zorunluluğudur.

Eşik alan kriteri, özellikle koruma sistemlerinin ayarlanmasında hayati olan Kritik Temizleme Açısı (**δ_{cr}**) ve Kritik Temizleme Süresi (**t_{cr}**) parametrelerinin belirlenmesini sağlar. Arıza temizleme süresi ne kadar uzarsa, ivmelenme alanı (**A1**) o kadar büyür ve sistemin kullanabileceği yavaşlama alanı (**A2**) o kadar küçülür. Eğer mevcut yavaşlama alanı, kazanılan ivmelenme alanından küçük kalırsa (**$A2 < A1$**), rotor kritik açığı aşar ve sistem senkronizmadan çıkarak kararsız hale gelir. Dolayısıyla eşik alan yöntemi, güç sistemlerinin güvenli işletimi ve kararlılık sınırlarının analitik olarak tespit edilmesi için vazgeçilmez bir araçtır.

2. Teorik Temel

Güç sistemi kararlılık analizlerinin temelini, senkron makinelerin fiziksel davranışlarını modelleyen elektromekanik dinamik yasalar oluşturur. Bu bölümde sistemin kararlılık durumunu belirleyen temel hareket denklemleri, enerji dönüşüm prensipleri ve kararlılık sınırlarını belirleyen analitik kriterleri özetlenecektir.

2.1. Senkron Makine Dinamiği ve Hareket Yasası

Senkron makinelerin kararlılığı, rotorun mekanik giriş gücü (P_m) ile şebekeye aktarılan elektriksel çıkış gücü (P_e) arasındaki dengeye dayanır. Newton'un ikinci hareket yasası uyarınca, bir cismin dönüş hareketi uygulanan torkların dengesi ile belirlenir. Senkron makine için bu ilişki şu şekilde ifade edilir:

$$J \frac{d\omega_m}{dt} = T_m - T_e = T_a$$

Burada J rotorun atalet momentini, ω_m mekanik açısal hızı, T_m mekanik torku, T_e elektromanyetik torku ve T_a ise net ivmelenme torkunu temsil eder. Normal işletme koşullarında mekanik ve elektriksel torklar eşittir ($T_m = T_e$), bu da rotorun sabit senkron hızda dönmesini sağlar. Ancak bir arıza veya yük değişimi durumunda bu denge bozulur; mekanik torkun elektriksel torktan büyük olması durumunda rotor ivmelenir, tersi durumda ise yavaşlar.

2.2. Salınım (Swing) Denklemi

Güç sistemlerinde tork yerine güç, mekanik radyan yerine ise elektriksel açıların kullanılması analizleri kolaylaştırır. Sistemin dinamiğini elektriksel rotor açısı (δ) ve per-unit (pu) cinsinden güç değerleri ile ifade eden temel diferansiyel denklem Salınım (Swing) Denklemi olarak adlandırılır:

$$2 \frac{H}{\omega_s} \frac{d^2 \delta}{dt^2} = P_m - P_e$$

Bu denklemde:

- **H**: Atalet sabiti (Inertia Constant) olup, makinenin nominal gücüne oranla senkron hızda depoladığı kinetik enerjiyi (MJ/MVA) ifade eder.
- **ω_s** : Senkron açısal hızdır.
- **δ** : Rotorun manyetik alanı ile şebeke referansı arasındaki güç açısıdır.

Salınım denklemi, rotor açısının zamana göre ikinci türevinin (açısal ivmenin), net güç farkı ile orantılı olduğunu gösterir:

$$P_a = P_m - P_e$$

Bu denklem doğrusal değildir, çünkü elektriksel güç genellikle şeklinde sinüzoidal bir karakter sergiler:

$$P_e = P_{max} \sin \delta$$

Çok makineli sistemlerde de farklı atalet ve güç değerlerine sahip makineler ortak bir sistem tabanına (S_{sys}) indirgenerek, sistem eşdeğer tek bir makine gibi modellenebilir ve aynı denklem yapısıyla analiz edilir.

2.3. Enerji Dengesi ve Eşik Alan Kriteri

Sistemin geçici hal kararlılığını zaman domeni kullanılarak diferansiyel denklem çözümü yapmadan değerlendirebilmek için Eşik Alan Kriteri (Equal Area Criterion) kullanılır. Bu kriter, salınım denkleminde türetilen enerji korunumu ilkesine dayanır. Sistemin kararlı kalabilmesi için, bir bozucu etki (örneğin kısa devre) sırasında rotorun kazandığı kinetik enerjinin (İvmelenme Alanı, A_1), arıza temizlendikten sonra sistemin sağlayabileceği yavaşlatıcı enerji (Yavaşlama Alanı, A_2) tarafından sönmülenebilmesi gerekir.

Matematiksel olarak bu durum, güç farkının rotor açısına göre integralinin sıfır olması gerekliliği ile ifade edilir:

$$\int_{\delta_1}^{\delta_r} (P_m - P_e) d\delta = 0$$

Burada δ_1 başlangıç açısını, δ_r ise rotorun ulaştığı maksimum salınım açısını temsil eder. Kararlılık şartı, kullanılabilir yavaşlama alanının ivmelenme alanından büyük veya ona eşit olmasıdır ($A_2 \geq A_1$).

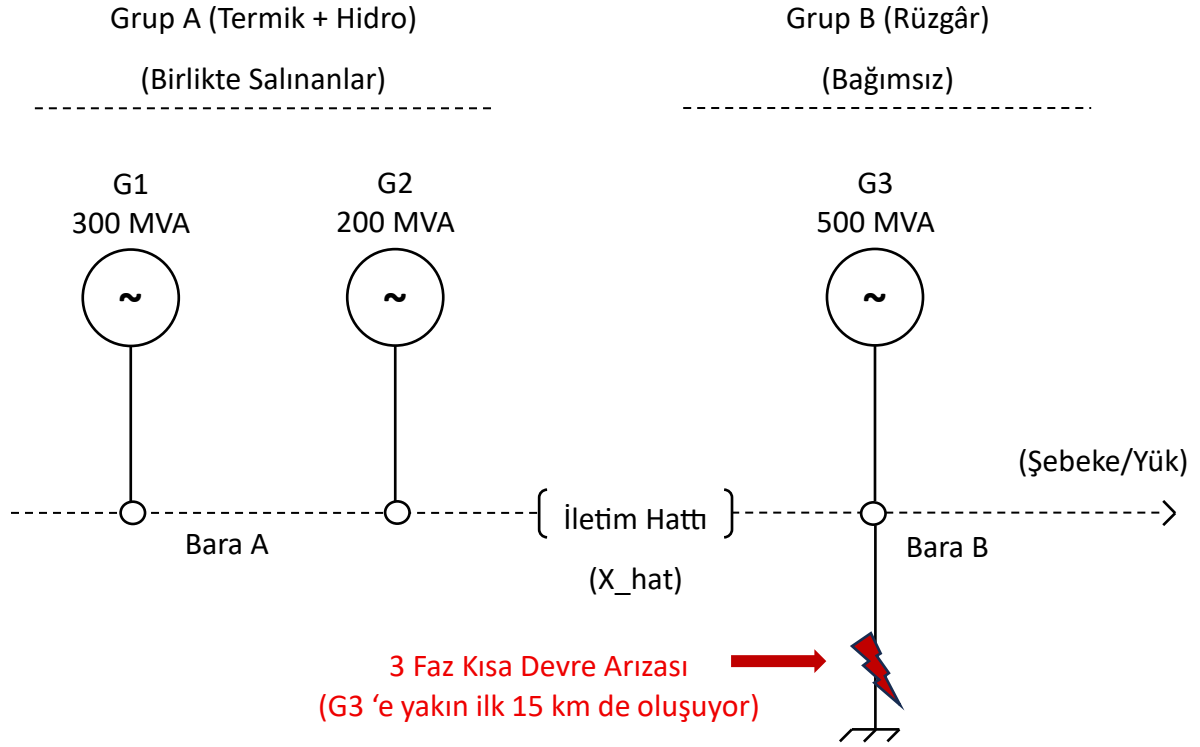
2.4. Kritik Temizleme Açısı ve Süresi

Sistemin kararlılığını koruyabileceği sınır durum, ivmelenme alanı ile mevcut maksimum yavaşlama alanının birbirine eşit olduğu andır ($A_2 = A_1$). Bu sınır durumu belirleyen açıya Kritik Temizleme Açısı (δ_{cr}), bu açıya ulaşılması için geçen süreye ise Kritik Temizleme Süresi (t_{cr}) denir.

Kritik temizleme açısı, sistemin mekanik gücü (P_m) ile arıza sırasındaki ve sonrasındaki güç eğrilerinin genliklerine (P_{max}) bağlı olarak analitik yöntemlerle hesaplanabilir. Eğer arıza, t_{cr} süresinden daha geç temizlenirse, rotor kritik açığı aşar, net enerji pozitif kalır ve sistem senkronizmadan çıkarak kararsız hale gelir.

3. Matematiksel Hesaplamalar

Arıza senaryosuna göre; 154 kV çift devre iletim hattının generatör tarafındaki ilk 15 km'lik kısmında **3-faz kısa devre** oluşmaktadır. Bu senaryo baz alınarak oluşturulan, sistemin görsel bir modeli aşağıdaki gibidir:



İletim bölgesindeki üç adet senkron generatöre ait parametreler de aşağıdaki gibidir:

Tablo 1: Senkron Generatörlere Ait Parametreler

Sistem Baz Gücü (S_{sys})	100 MVA		
Şebeke Frekansı (f)	50 Hz		
Parametre	Generatör-1 (G1)	Generatör-2 (G2)	Generatör-3 (G3)
Nominal Güç (S_N)	300 MVA	200 MVA	500 MVA
Reaktans (X'_d)	0.25 pu	0.32 pu	0.25 pu
Atalet Sabiti (H)	6.0 s	4.5 s	5.0 s
Mekanik Güç (P_m)	0.85 pu	0.65 pu	0.50 pu

3.1. Generatör Atalet Sabitlerinin 100 MVA Sistem Bazına Dönüştürülmesi

Makine bazındaki atalet sabitini (H_{makine}), sistem bazına (H_{sistem}) çevirmek için şu formülü kullanırız:

$$H_{sistem} = H_{makine} \times \frac{S_{makine}}{S_{sistem}}$$

Bu formül üzerinden iletim bölgesindeki üç adet Senkron Generatörün atalet sabitini sistem bazına dönüştürelim.

Generatör-1 (G1) için:

$$H_{1sys} = 6.0 \times \frac{300}{100} = \mathbf{18.0\ s}$$

Generatör-2 (G2) için:

$$H_{2sys} = 4.5 \times \frac{200}{100} = \mathbf{9.0\ s}$$

Generatör-3 (G3) için:

$$H_{3sys} = 5.0 \times \frac{500}{100} = \mathbf{25.0\ s}$$

Elde edilen bu değerler, salınım (swing) denklemlerinde kullanacağımız kütle ataletleridir.

3.2. Generatörlerin Arıza Öncesi Rotor Açılarının (δ_0) Hesaplanması

Bir Senkron Generatörün bara gerilimi (V) ve iç emk (E') değeri 1.0 pu olarak kabul edildiğinde, iletebileceği maksimum güç (P_{max}) reaktansına bağlıdır:

$$P_{max} = \frac{\bar{E} * V}{X'_d} \approx \frac{1}{X'_d}$$

Senkron makinenin kararlı durumdaki güç denklemi:

$$P_e = P_m \sin(\delta_0)$$

Arıza öncesi kararlı durumda mekanik güç elektriksel güce eşit olacaktır.

$$P_m = P_e$$

Bu bilgiler doğrultusunda; her bir makinenin arıza öncesi rotor açıları (δ_0) aşağıdaki formül üzerinden hesaplanır.

$$\delta_0 = \arcsin\left(\frac{P_m}{P_{max}}\right)$$

Generatör-1 (G1) için:

G1 Parametreleri	
P_{1m}	: 0.85 pu
X'_{1d}	: 0.25 pu

$$P_{1max} \approx \frac{1}{0.25} \approx 4.0 \text{ pu}$$

$$\delta_{0,1} \approx \arcsin\left(\frac{P_{1m}}{P_{1max}}\right) \approx \arcsin\left(\frac{0.85}{4.0}\right) \approx \arcsin(0.2125) \approx 12.27^\circ$$

Generatör-2 (G2) için:

G2 Parametreleri	
P _{2m}	: 0.65 pu
X' _{2d}	: 0.32 pu

$$P_{2max} \approx \frac{1}{0.32} \approx \mathbf{3.125\ pu}$$

$$\delta_{0,2} \approx \arcsin\left(\frac{P_{2m}}{P_{2max}}\right) \approx \arcsin\left(\frac{0.65}{3.125}\right) \approx \arcsin(0.208) \approx \mathbf{12.01^\circ}$$

Generatör-3 (G3) için:

G3 Parametreleri	
P _{3m}	: 0.50 pu
X' _{3d}	: 0.25 pu

$$P_{3max} \approx \frac{1}{0.25} \approx \mathbf{4.0\ pu}$$

$$\delta_{0,3} \approx \arcsin\left(\frac{P_{3m}}{P_{3max}}\right) \approx \arcsin\left(\frac{0.50}{4.0}\right) \approx \arcsin(0.125) \approx \mathbf{7.18^\circ}$$

3.3. G1 ve G2'nin Arıza Süresince Birlikte Salındığını Varsayarak Grup-A için: Eşdeğer Atalet Sabiti H_a ve Eşdeğer Mekanik Güç P_m Değerlerinin Hesaplanması

Sistem modelinde de belirtildiği üzere, G1 ve G2'nin birlikte salınmaktadır. Bu durumda iki makine, tek bir eşdeğer makine gibi davranacaktır. Bu adımda da bu eşdeğer model çıkarılacaktır.

Eşdeğer Atalet (H_a):

Bu adımda daha öncesinde sistem bazına dönüştürülen H değerleri kullanılacaktır.

G1 ve G2'nin Sistem Bazına Dönüştürülen Atalet Sabitleri	
H_{1sys}	: 18.0 s
H_{2sys}	: 9.0 s

Hesaplama için kullanılacak formül:

$$H_a = H_{1sys} + H_{2sys}$$

Hesaplanan eşdeğer atalet (H_a):

$$H_a = 18.0 + 9.0 = 27.0 \text{ s}$$

Eşdeğer Mekanik Güç (P_m):

Bu adımdan önce her bir makinenin; makine bazındaki mekanik güç değerlerini, sistem bazına çevirmemiz gerekmektedir.

Makine bazındaki mekanik güç değerini (P_{makine}), sistem bazına (P_{sistem}) çevirmek için şu formülü kullanırız:

$$P_{sistem} = P_{makine} \times \frac{S_{makine}}{S_{sistem}}$$

Bu formül üzerinden iletim bölgesindeki üç adet senkron Generatörün mekanik güç değerlerini sistem bazına dönüştürelim.

Generatör-1 (G1) için:

$$P_{1sys} = 0.85 \times \frac{300}{100} = \mathbf{2.55\ pu}$$

Generatör-2 (G2) için:

$$P_{2sys} = 0.65 \times \frac{200}{100} = \mathbf{1.30\ pu}$$

Generatör-3 (G3) için:

$$P_{3sys} = 0.50 \times \frac{500}{100} = \mathbf{2.50\ pu}$$

Elde edilen bu değerler, salınım (swing) denklemlerinde kullanacağımız mekanik güçlerdir.

Bu hesaplamalar sonrasında Genaratör-1 (G1) ve Genaratör-2 (G2) Genaratörlerinin eşdeğer mekanik gücü hesaplanabilir.

Hesaplama için kullanılacak formül:

$$P_{ma} = P_{1sys} + P_{2sys}$$

Hesaplanan eşdeğer mekanik güç (P_{ma}):

$$P_{ma} = 2.55 + 1.30 = \mathbf{3.85\ pu}$$

3.4. G3 için Bağımsız Salınım Denkleminin Hesaplanması

Generatör-3 (G3) bağımsız hareket etmektedir. Bu nedenle bu generatöre ait salınım denklemi genel formülü:

$$2 \frac{H}{w_s} \frac{d^2 \delta}{dt^2} = P_m - P_e$$

Bu denklemde senkron açısal hız (w_s), şebeke frekansının 50 Hz olması nedeniyle aşağıdaki gibi hesaplanır:

$$w_s = 2 \times p \times f = 100\pi \approx \mathbf{314.16 \text{ rad/s}}$$

G3 Parametreleri	
H_{3sys}	: 25 s
P_{3sys}	: 2.5 pu

Yukarıda hesaplanmış ve verilmiş olan bilgiler doğrultusunda G3 için hesaplanan bağımsız salınım denklemi aşağıdaki gibidir:

$$2 \frac{25}{314.16} \frac{d^2 \delta_{0,3}}{dt^2} = 2.5 - P_{3e}$$

$$\mathbf{0.1592} \frac{d^2 \delta_{0,3}}{dt^2} = \mathbf{2.5 - P_{3e}}$$

3.5. Arıza Süresince Grup-A ve G3 için İvmelenme Denklemlerinin ($\bar{\delta}$) Hesaplanması

Üç faz kısa devre arızası sırasında, generatör terminallerine yakın bir arıza olduğu için elektriksel güç çıkışının (P_e) sıfıra düştüğü ya da çok azaldığı kabul edilir. Bu nedenle arıza sırasında $P_e \approx 0$ olarak alınırsa, ivmelenme sadece mekanik güce bağlı olacaktır.

Rotorun açısal ivmesi, salınım denkleminin düzenlenmesiyle aşağıdaki gibi ifade edilir:

$$\frac{d^2\delta}{dt^2} = \frac{w_s}{2H} P_m$$
$$\bar{\delta} = \frac{d^2\delta}{dt^2}$$

Bu denklemi hem Grup-A hem de G3 için sırasıyla elde edelim.

Grup A (G1 ve G2) için:

Grup A, birlikte salınan G1 ve G2 Generatörlerinden oluştuğu için formüllerde hesaplanan eşdeğerleri kullanılacaktır.

Grup A Parametreleri	
H_a	: 27.0 s
P_{ma}	: 3.85 pu

$$\bar{\delta} \approx \frac{w_s}{2H_a} P_{ma} \approx \frac{314.16}{2 * 27} 3.85 \approx 22.3985 \approx \mathbf{22.40 \text{ rad/s}^2}$$

Bu sonuç; birlikte salınım yapan G1 ve G2 generatörlerinin, 3.85 pu güç farkı altında rotorun saniyede $\mathbf{22.40 \text{ rad/s}^2}$ ivme ile hızlandığını göstermektedir.

Generatör-3 (G3) için:

Generatör-3 (G3) için hesaplanmış olan değerler ise aşağıdaki tabloda verilmiştir.

G3 Parametreleri	
H_{3sys}	: 25 s
P_{3sys}	: 2.5 pu

$$\bar{\delta} \approx \frac{w_s}{2H_{3sys}} P_{3sys} \approx \frac{314.16}{2 * 25} 2.50 \approx 15.708 \approx \mathbf{15.71 \text{ rad/s}^2}$$

Bu sonuç; bağımsız olarak salınım yapan G3 generatörlerinin, 2.50 pu ivmelenme gücü altında rotorun saniyede **15.71 rad/s²** ivme ile hızlandığını göstermektedir.

3.6. Eşik Alan Kriterini Kullanarak Kritik Temizleme Açısının Hesaplanması

Bu bölümde, sistem G3 tarafında meydana gelen bir arıza için analiz edildiğinden; Eşik Alan Kriterinin çözümü için sistemin bağımsız salınan en kritik makinesi (G3) referans alınarak hesaplamalar yapılacaktır. Grup A (G1 ve G2) sisteme destek veren kararlı kısım (sonsuz bara gibi) kabul edilecektir. Bu bölümün başında verilen görsel model de buradaki yaklaşımı desteklemektedir.

Eşik Alan Kriterine göre, sistemin kararlı kalabilmesi için arıza sırasındaki Hızlandırıcı Alanın (A_1), arıza sonrası mevcut olan Yavaşlatıcı Alana (A_2) eşit veya ondan küçük olması gerekir. Sınır durumda $A_1 = A_2$ eşitliği bize kritik açığı verir.

Hesaplamalara başlamadan önce eksik parametreleri de hesaplayarak bir parametre tablosu oluşturulacaktır.

İlk olarak arıza öncesi rotor açısı değeri ile başlayalım. İkinci adımda teorik olarak $\delta_{0,3} \approx 7.18^\circ$ hesaplanmış olsa da proje parametrelerinde $\delta_{0,3} \approx 15^\circ$ olarak tanımlandığı için sonraki analizlerde ve simülasyonlarda bu değeri referans alınacaktır.

Arıza sırasında maksimum güç (P_{max2}), arızanın G3 çıkışına yakın bir noktada olduğu kabulü, tam kısa devre, nedeniyle $P_{max2} \approx 0$ olarak kabul edilecektir. Bu kabuller ile elde edilen değerlere göre parametre tablosu aşağıdaki gibidir:

G3 Parametreleri	
P_m	: 2.5 pu
$\delta_{0,3}$: 15°
P_{max2}	: 0 pu

Arıza sonrasında maksimum güç (P_{max3}), sistemin arıza öncesi durumundaki kararlı hal dengesinden hesaplanacaktır. Güç sistemlerinde kararlı halde; üretilen mekanik gücün, aktarılan elektriksel güce eşit olduğu daha öncesinde ifade edilmişti. Buradan hareketle dengeli durumdaki formül:

$$P_m = P_{max_pre} \sin(\delta_{0,3})$$

Tablodaki değerleri uygun yerlere koyarsak çözüm:

$$P_{\max_pre} = \frac{P_m}{\sin(\delta_{0,3})} = \frac{2.5}{\sin(15^\circ)} = \frac{2.5}{0.2588} \approx \mathbf{9.66\ pu}$$

Bu değer, mekanik güç 2.5 pu iken açının 15 derece olabilmesi için sistemin gerekli olan maksimum kapasitesini ifade etmektedir.

Son olarak arıza sonrasında hatlardan birinin devre dışı kalmasıyla kapasitenin, arıza öncesi kapasitenin %70'ine düştüğü varsayılmıştır:

$$P_{\max3} = P_{\max_pre} * 0.7 = 9.66 * 0.7 = \mathbf{6.76\ pu}$$

Bu hesaplama ile birlikte gerekli olan tüm güncel parametrelere ait tablo aşağıdaki gibidir:

G3 Parametreleri	
P_m	: 2.5 pu
$\delta_{0,3}$: 15°
$P_{\max2}$: 0 pu
$P_{\max3}$: 6.76 pu

şimdi ise sistemin maksimum salınım açısını bulmalıyız. Sistemin salınabileceği maksimum açı, mekanik gücün arıza sonrası elektriksel güç eğrisini kestiği (kararsız) noktadır:

$$P_m = P_{\max3} \sin(\delta_{\max})$$

$$\delta_{\max} = 180^\circ - \arcsin \frac{P_m}{P_{\max3}} = 180^\circ - \arcsin \frac{2.5}{6.76} = 180^\circ - 21.7^\circ = \mathbf{158.3^\circ}$$

$$\delta_{\max} = \mathbf{2.7629\ rad}$$

Bu adımda ise kritik temizleme açısı hesaplanacaktır. Arıza sırasında elektriksel güç akışının sıfır olduğu ($P_e \approx 0$) durum için Eşik Alan Kriteri formülü:

$$\cos \delta_{cr} = \frac{P_m}{P_{\max3}} (\delta_{\max} - \delta_{0,3}) + \cos \delta_{\max}$$

Formüldeki açı farkı radyan cinsinden yazılması gerektiği için $\delta_{0,3} = 15^\circ = \mathbf{0.2618\ rad}$ olarak radyan cinsinden yazılacaktır.

$$\delta_{max} - \delta_{0,3} = 2.7629 - 0.2618 = \mathbf{2.5011 \text{ rad}}$$

$$\cos(158.3^\circ) = \mathbf{-0.9291 \text{ rad}}$$

Hesaplanan değerler formüle yerleştirildiğinde elde edilen sonuç:

$$\cos \delta_{cr} = \frac{2.5}{6.76} (2.5011) + (-0.9291) \approx -0.0042$$

$$\delta_{cr} = \arccos(-0.0042) \approx \mathbf{90.24^\circ}$$

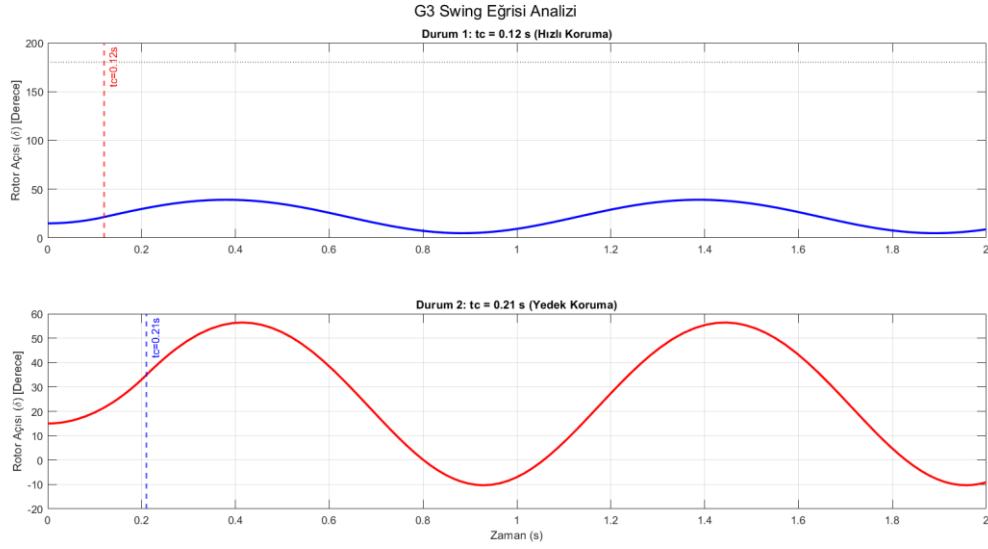
4. Sonuçlar

Bu bölümde çok makineli bir g sisteminde meydana gelen üç fazlı kısa devre arızasının geçici hal kararlılığı üzerindeki etkileri; teorik analizler, manuel hesaplamalar ve bilgisayar destekli simülasyonlar (MATLAB ve Python) kullanılarak kapsamlı bir şekilde incelenecektir.

4.1. Sistem Modellemesi ve Denklemler

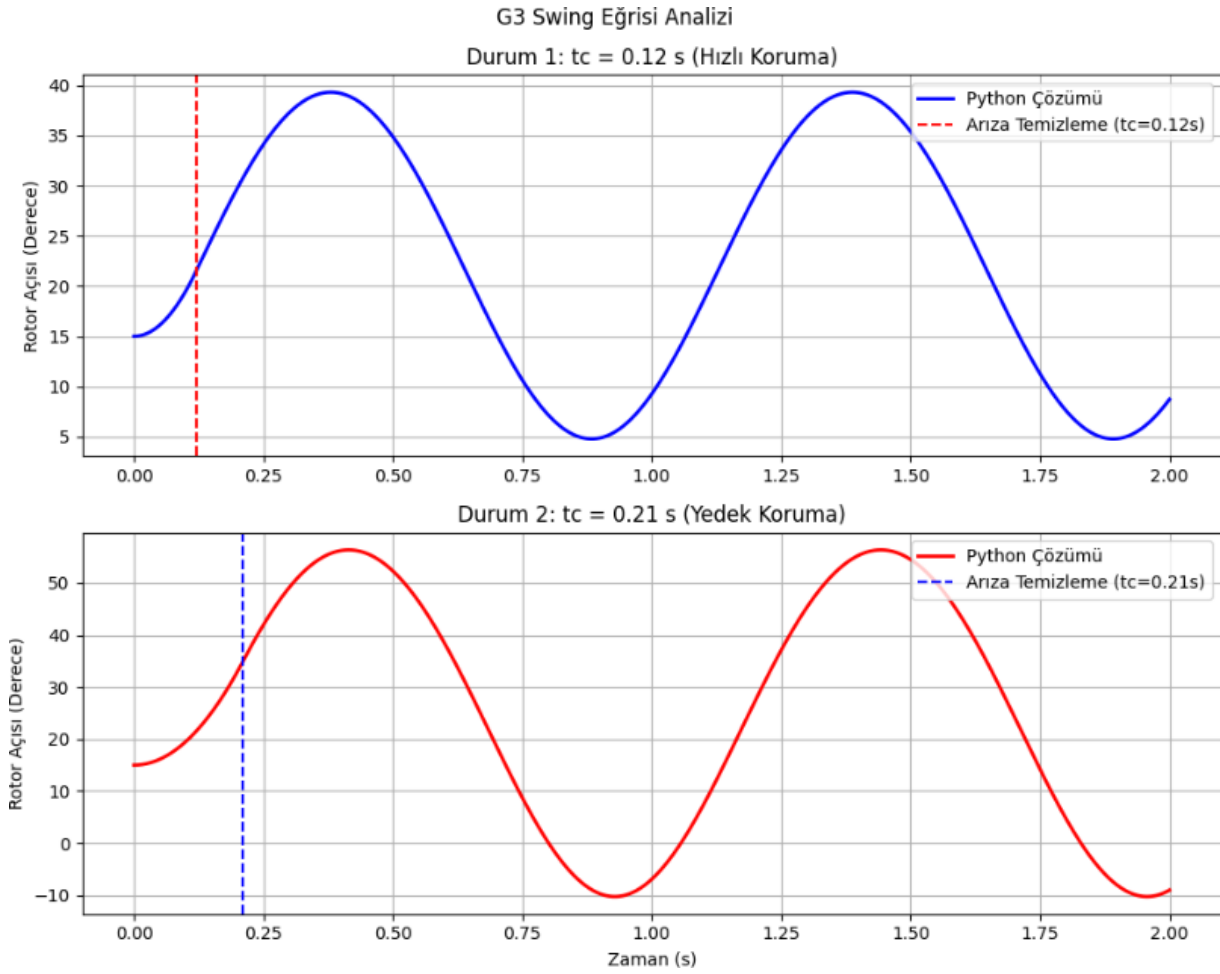
Bu bölümde sistem modellemesi için yapılan matematiksel hesaplamaların MATLAB ve Python üzerinde de hesaplanarak sonuçlarının doğruluğu incelenecektir.

MATLAB programında yazılan kodlamada ODE45 çözümü kullanılarak Swing Denklemleri çözülmüş ve Zaman Tanım Alanı Simülasyonu yapılmıştır. Elde edilen grafik aşağıdaki gibidir:



Şekil 1: MATLAB- Generatör-3 (G3) Zaman Tanım Alanı Simülasyonu

Python ile yapılan kodlamada Swing Denklemleri Python fonksiyonu olarak tanımlanarak çözülmüş ve Zaman Tanım Alanı Simülasyonu yapılmıştır. Elde edilen grafik aşağıdaki gibidir:

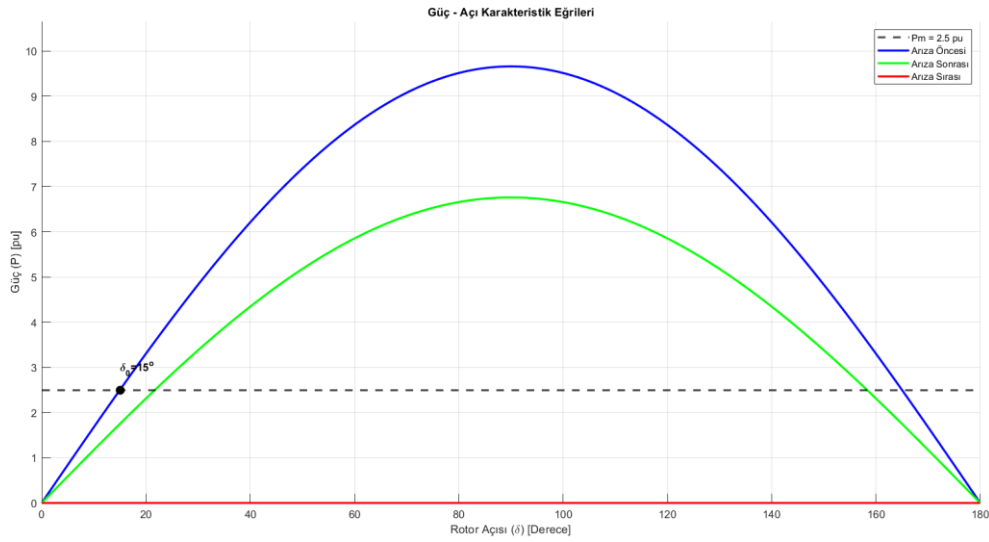


Şekil 2: Python- Generatör-3 (G3) Zaman Tanım Alanı Simülasyonu

Manuel hesaplamalar sonucu elde edilen sistem parametreleri ($H=25s$, $P_m=2.50$ pu) ve türetilen salınım denklemleri, MATLAB ve Python algoritmalarına birebir aktarılmıştır. Başlangıç koşulu olarak hesaplanan rotor açısı ($\delta_0=15^\circ$) her üç analiz yönteminde de (Manuel, MATLAB, Python) aynı referans noktası olarak kullanılmış ve model tutarlılığı sağlanmıştır.

4.2. Güç – Açı Karakteristikleri

Yapılan matematiksel hesaplamalar ile elde edilen başlangıç açısı δ_0 ve P_{max} hesabı MATLAB programı kullanılarak tekrardan hesaplatılmıştır. MATLAB programı ile yapılan kodlamada Arıza Öncesi – Arıza Anı – Arıza Sonrası Güç–Açı Karakteristiklerine ait grafik aşağıdaki gibidir:



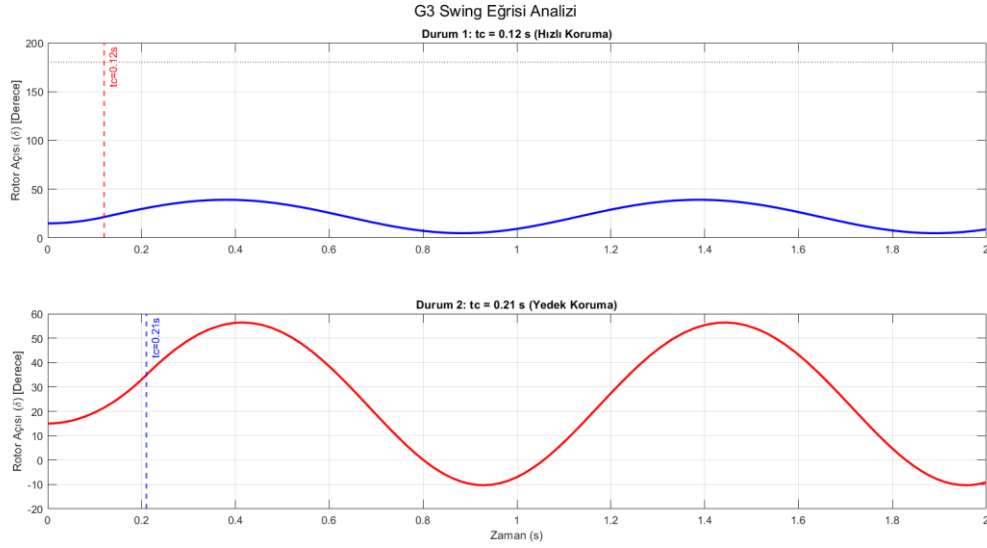
Şekil 3: MATLAB- Güç- Aç (Power-Angle) Karakteristik Eğrileri

Manuel analizde hesaplanan arıza öncesi maksimum güç ($P_{max_pre} \approx 9.66 \text{ pu}$) ve arıza sonrası maksimum güç ($P_{max_post} \approx 6.76 \text{ pu}$) değerleri, MATLAB simülasyonunda çizdirilen Güç–Açı karakteristiği eğrilerinin tepe noktalarıyla tam uyum göstermektedir. Bu durum, sistemin statik modellemesinin doğruluğunu kanıtlamaktadır.

4.3. Zaman Simülasyonları

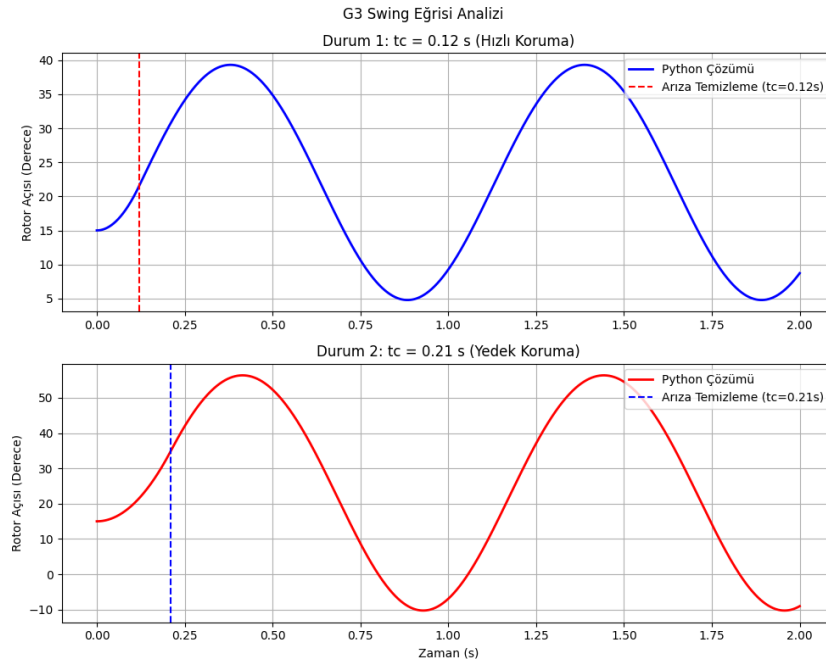
Bu bölümde ise MATLAB ve Python kullanılarak zaman simülasyonları oluşturulmuştur.

MATLAB programı kullanılarak yapılan kodlamada $t_c=0.12s$ ve $0.21s$ için elde edilen Rotor Açısı Zaman Grafiği aşağıdaki gibidir:



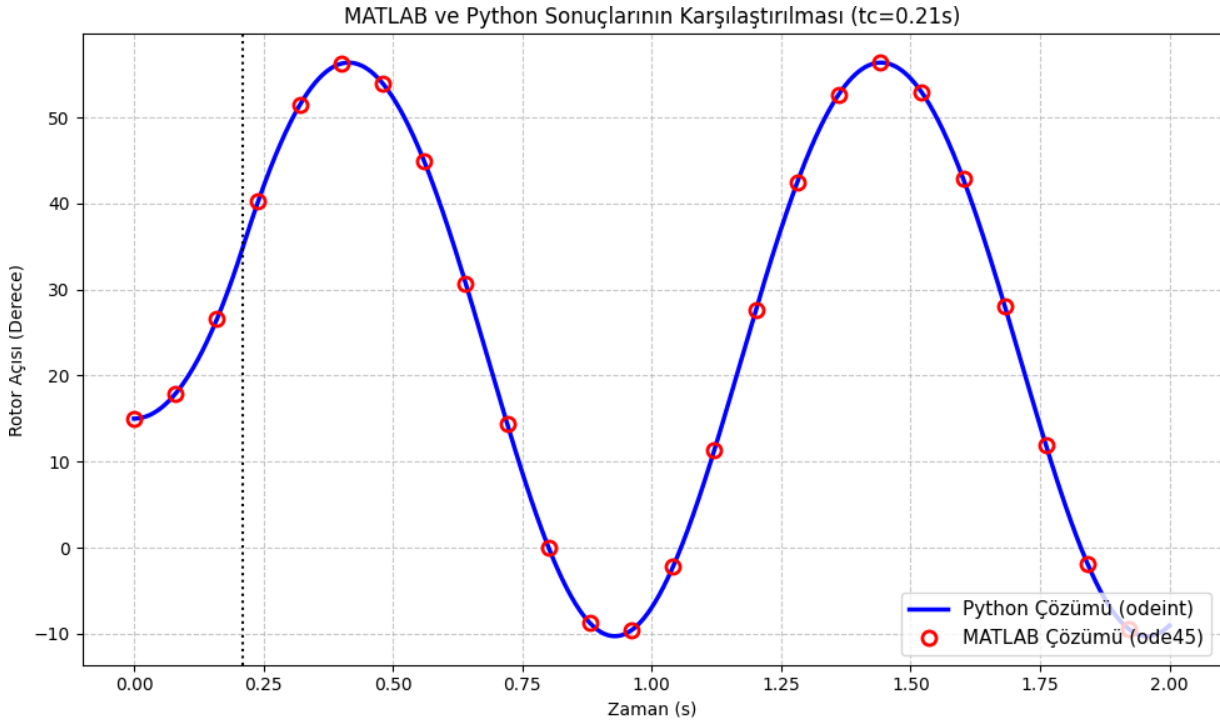
Şekil 4: MATLAB- Generatör-3 (G3) Zaman Tanım Alanı Simülasyonu

Python kullanılarak yapılan kodlamada $t_c=0.12s$ ve $0.21s$ için elde edilen Rotor Açısı Zaman Grafiği aşağıdaki gibidir:



Şekil 5: Python- Generatör-3 (G3) Zaman Tanım Alanı Simülasyonu

$t_c=0.12s$ ve $t_c=0.21s$ arıza temizleme süreleri için MATLAB (ode45) ve Python (odeint) kütüphaneleri kullanılarak yapılan dinamik simülasyonlar karşılaştırılmıştır. Her iki yazılımdan elde edilen Rotor Açısı-Zaman ($\delta - t$) değişim grafikleri üst üste çizdirildiğinde birebir örtüştüğü görülmüştür. Bu sonuç, sayısal çözüm algoritmalarının birbirini doğruladığını gösterir.



Şekil 6: MATLAB ve Python Sonuçlarının Karşılaştırılması

4.4. Kararlılık Sınırı

Bu bölümde ise Eşik Alan Kriteri formülü kullanılarak elde edilen δ_{cr} hesabının Python kullanılarak tekrardan hesaplaması yapılmıştır. Sonrasında da kararsızlık durumunu analiz edebilmek için MATLAB programı kullanılarak bu durum modellenmiştir.

Eşik alan kriteri kullanılarak yapılan manuel hesaplamada kritik temizleme açısının sonucu:

$$\cos \delta_{cr} = \frac{2.5}{6.76} (2.5011) + (-0.9291) \approx -0.0042$$

$$\delta_{cr} = \arccos(-0.0042) \approx \mathbf{90.24^\circ}$$

Eşik Alan Kriteri (δ_{cr} hesabı); Python kullanılarak Sayısal İntegrasyon (trapz) Yöntemiyle tekrar hesaplanarak manuel sonuçla karşılaştırılması yapılmıştır.

```
Temizleme Süresi (tc): 0.21 s
Temizleme Açısı (delta_cl): 34.85 Derece
-----
Hızlandırıcı Alan (A1)      : 0.8659
Mevcut Yavaşlatıcı Alan (A2): 6.4447
-----
SONUÇ: A2 > A1 olduğu için SİSTEM KARARLIDIR.
Kararlılık Marjı (Enerji)  : 5.5788
```

Şekil 7: Eşik Alan Kriterini Sayısal İntegrasyon (Trapz) Yöntemi ile Hesaplanmasının Sonuç Çıktısı

```
-----
HESAPLAMA SONUÇLARI (G3 Parametreleri)
-----
Maksimum Salınım Açısı (delta_max): 158.3003 Derece
Kritik Temizleme Açısı (delta_cr) : 90.2514 Derece
-----
```

Şekil 8: Kritik Temizleme Açısı Hesabının Sonuç Çıktısı

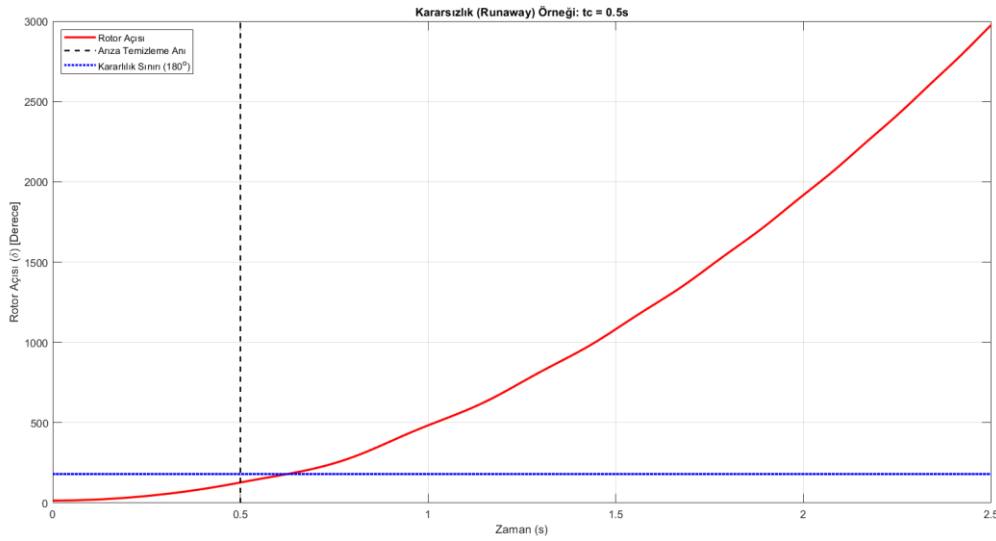
Eşik Alan Kriteri kullanılarak manuel formüllerle hesaplanan kritik temizleme açısı ($\delta_{cr} \approx 90.24^\circ$) ile Python ortamında sayısal integrasyon (trapz) ve alan eşitleme yöntemiyle hesaplanan kritik açı değeri birbirini doğrulamaktadır. Aradaki fark ihmal edilebilir düzeyde olup teorik hesaplamaların güvenilirliği sayısal yöntemle teyit edilmiştir.

4.4 Kararsızlık Analizi

Bu bölümde ise Kararsızlık Oluşan Durumlarda Rotor Açısının Kopma (Runaway) Davranışının MATLAB programı üzerinden modellenerek grafik üzerinde gösterimi yapılacaktır.

Proje kapsamında incelenen $t_c=0.12s$ ve $t_c=0.21s$ durumlarında, (sistem parametrelerine göre) sistemin yüksek atalet momenti ($H=25s$) nedeniyle kararlı kaldığı görülmüştür. Diğer bir ifadeyle; sistem parametrelerine göre hesaplanan kritik temizleme süresi (t_{cr}), verilen arıza temizleme sürelerinden ($0.12s$ ve $0.21s$) büyük olduğu için her iki senaryoda da sistem kararlıdır ve kopma gözlenmemiştir.

Bu nedenle, projede istenen kopma (Runaway) davranışını gözlemleyebilmek için, arıza temizleme süresi teorik olarak hesaplanan kritik sürenin ($t_{cr} \approx 0.41s$) üzerine çıkarılarak ($t_c = 0.50s$) için MATLAB programı kullanılarak ek bir simülasyon gerçekleştirilmiştir.



Şekil 9: MATLAB- Kararsızlık (RUNAWAY) Senaryosu (Ek Analiz)

5. Sonuç ve Değerlendirme

Generatör-3 (G3) referans alınarak yapılan analizlerden elde edilen temel sonuçlar ve mühendislik değerlendirmelerim:

Proje kapsamında gerçekleştirilen manuel hesaplamalar, MATLAB (ode45) dinamik simülasyonları ve Python sayısal analiz sonuçları karşılaştırıldığında, tüm çıktıların birbiriyle tam uyum içinde olduğu görülmüştür. Özellikle Eşik Alan Kriteri ile manuel olarak hesaplanan kritik temizleme açısı ($\delta_{cr} \approx 90.24^\circ$) ile Python simülasyonundan elde edilen sonuçların örtüşmesi, kurulan matematiksel modelin ve uygulanan çözüm yöntemlerinin doğruluğunu ve güvenilirliğini kanıtlamıştır.

İncelenen senaryoda, sistemin sahip olduğu parametreler, sisteme güçlü bir kararlılık marjı sağlamıştır. Simülasyonlarda test edilen $t_c=0.12$ saniye (hızlı koruma) ve $t_c=0.21$ saniye (yedek koruma) arıza temizleme sürelerinin her ikisinde de rotor açısının kritik değeri aşmadığı ve sistemin tekrar kararlı denge noktasına oturduğu gözlemlenmiştir. Bu durum, mevcut koruma sistemlerinin ayarlarının, sistemin kararlılık sınırları içerisinde güvenli bir bölgede çalıştığını göstermektedir.

Analiz edilen G3 generatörü, sistemden bağımsız salınması ve diğer gruplara göre farklı dinamiklere sahip olması nedeniyle kararlılık açısından en kritik bileşen olarak değerlendirilmiştir. Arıza süresince elektriksel yükün kalkmasıyla hızla ivmelenen rotor, arızanın temizlenmesiyle birlikte devreye giren güçlü yavaşlatıcı alan (A_2) sayesinde kinetik enerjisini sönmüleyebilmiştir. Hesaplanan kritik açının ($\delta_{cr} \approx 90.24^\circ$) oldukça yüksek olması, sistemin ağır arıza koşullarına karşı dirençli olduğunu ve geniş bir kararlılık bandına sahip olduğunu ifade etmektedir.

Son olarak ise; bu proje, güç sistemlerinde kararlılık analizinin sadece teorik bir kavram olmadığını, güç sistemi koruma koordinasyonu ve röle zaman ayarlarının yapılmasında yüksek öneme sahip olduğunu ortaya koymuştur. Elde edilen bulgular, enerji iletim sistemlerinin planlanmasında ve işletilmesinde, olası arıza senaryolarına karşı önceden yapılan simülasyonların sistem güvenliği (büyük kesintilerin ya da blackout riskinin önlenmesi) açısından kritik bir öneme sahip olduğunu da göstermektedir.