

FAZ İLERLETİCİ / FAZ GERİLETİCİ KOMPANSATÖRLER

HAZIRLIK SORULARI:

- 1.) Faz ilerletici kompensatörün transfer fonksiyonunu yazınız ve bu kompensatörün sisteme getireceği avantaj-dezavantajları belirtiniz.
- 2.) Faz geriletici kompensatörün transfer fonksiyonunu yazınız ve bu kompensatörün sisteme getireceği avantaj-dezavantajları belirtiniz.
- 3.) $G(s) = \frac{50}{s(s+10)}$ transfer fonksiyonuna sahip sistemin aşağıdaki gereksinimleri karşılayabilmesi için **faz-ilerletici kompensatör** tasarlayınız.
 - Baskın kutup için $\zeta \geq 0,7$ olmalı.
 - Baskın kutup için $\omega_n \geq 60$ rad/sn olmalı.
 - Hız sabiti $K_v \geq 40 \text{ sec}^{-1}$ olmalı.
- 4.) $G(s) = \frac{5000000}{s(s+200)(s+300)}$ Yukarıdaki transfer fonksiyonuna sahip sistem için, aşağıdaki gereksinimleri karşılayacak bir **faz geriletici kompensatör** tasarlayınız.
 1. Baskın kutbun sönüm oranı $\zeta \geq 0,5$ olmalı.
 2. Hız sabiti $K_v \geq 500 \text{ sec}^{-1}$ olmalı.

DENEYİN AMACI:

1. Kontrol sistemlerinde faz ilerletici, faz geriletici kompensatörün fonksiyonunu anlamak.
2. Faz ilerletici-geriletici kompensatörün, faz ilerletici ve faz geciktirmeli kompensatörlerin avantajlarına sahip olduğunu görmek.

1. GENEL BİLGİLER

Faz ilerletici kompensatör, ilgilenen frekans aralığında pozitif faz açısı sağlayan bir kompensasyon ağıdır. Bu sebeple faz ilerletici kompensatör, bir sistemin uygun faz payına sahip olmasını sağlamak için kullanılabilir.

Faz ilerletici kompensatör, sistemi daha kararlı yapma ve geçici cevabı iyileştirme fonksiyonlarına sahiptir. Böylece faz ilerletici kompensatör, aşağıdaki durumlar için uygundur.

1. P denetleyici sistem, K_p değeri ne olursa olsun, kapalı çevrim sistemi kararlı yapamaz.
2. Zayıf geçici tepkeli kararlı sistem.

Faz geriletici kompensatör, sistemin kök yer eğrisini sağa doğru çekebileceği için, iyi geçici tepke ve kötü kararlı durum tepkesine sahip olan sistem durumları için uygundur.

Faz ilerletici-geriletici kompansatör, faz ilerletici ve faz geciktirmeli kompansatörlerin bir bileşkesidir. Faz ilerletici-geriletici kompansatöre geçmeden önce, faz ilerletici ve faz geciktirmeli kompansatörlerin avantaj ve dezavantajlarını yeniden gözden geçirelim.

Faz ilerletici kompansatör, sistemin düşük frekans kazancını artırmakla birlikte aşağıdaki avantaj ve dezavantajlara sahiptir:

Avantajları:

1. Sistemin kararlı durum tepkisini iyileştirir.
2. Yüksek frekanslı gürültüden etkilenmemesi için sistemin band genişliğini azaltır.

Dezavantajları:

Band genişliğindeki azalmadan dolayı, sistemin geçici tepkisi yavaş olur.

Faz geriletici kompansatörlü bir sistem aşağıdaki avantaj ve dezavantajlara sahiptir:

Avantajları:

1. Band genişliğindeki artıştan dolayı, sistem tepkisi hızlı olur.
2. Basamak tepkesinin maksimum aşmasında azalma meydana gelir.

Dezavantajları:

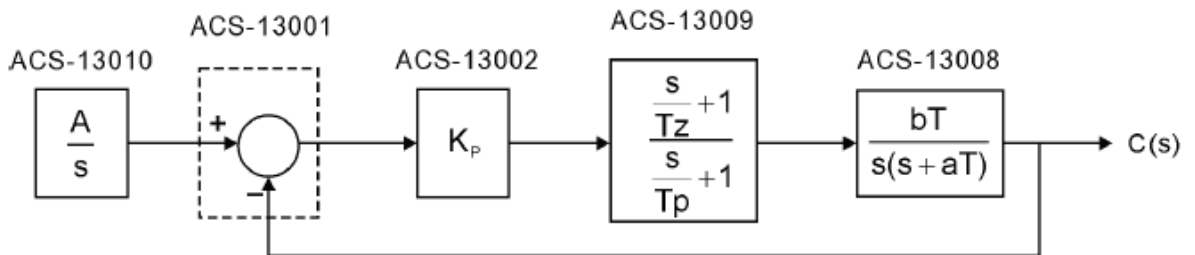
1. Band genişliğindeki artıştan dolayı, sistem yüksek frekanslı gürültüden kolayca etkilenir.
2. Sistemin kararlı durum tepkisini iyileştirmek için, düşük frekanslardaki zayıflamayı kompanse edecek ekstra kazanç yükselteci gerektirir.

Kötü geçici ve kararlı durum tepkilerine sahip bir sistem için, faz ilerletici ve faz geriletici kompansatörler (ya da faz ilerletici-geriletici kompansatör) aynı anda kullanılmalıdır.

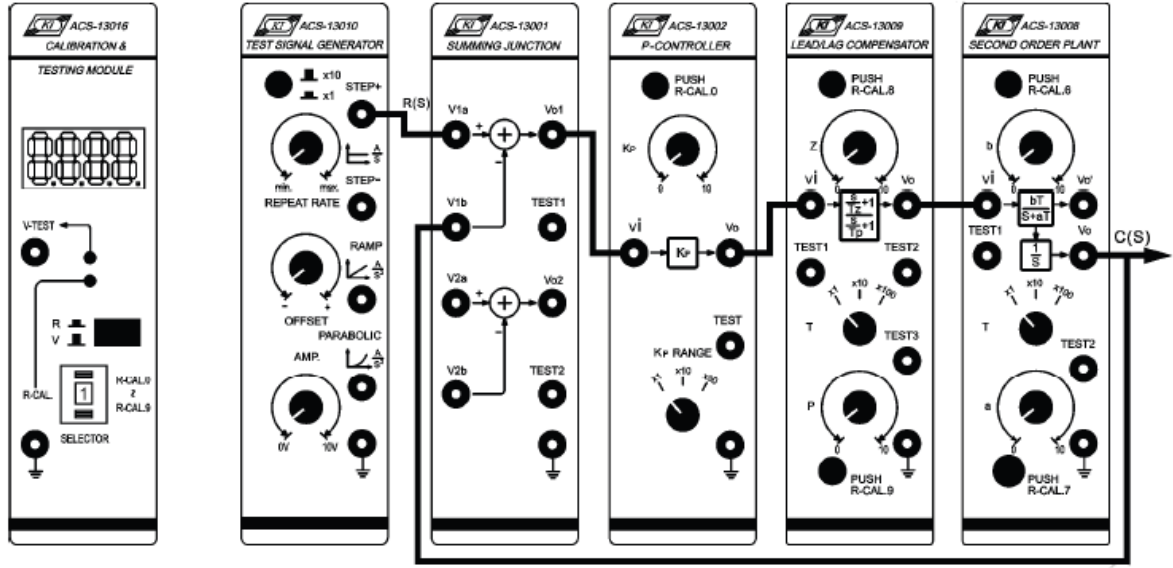
2. DENEYİN YAPILIŞI

2.1. Faz İlerletici Kompasatör

1. Şekil 1'deki blok ve bağlantı diyagramlarından yararlanarak gerekli bağlantıları yapın.



(a) Blok diyagram



(b) Bağlantı diyagramı

Şekil 1

2. Faz ilerletici kompensatörün transfer fonksiyonu aşağıdaki gibidir:

$$G_c(s) = 100 \frac{s + 2}{s + 25} = 8 \frac{s/42 + 1}{s/25 + 1}$$

- ACS-13010 STEP+ çıkış terminalinde, 0.1 Hz, 1Vpp'lik bir kare dalga üretin.
- ACS-13008'de, T seçici anahtarını x1 konumuna getirin. a=2 ve b=10 yapın.(aT=2 ve bT=10).
- ACS-13002'de, K_p RANGE seçici anahtarını, x1 konumuna getirin $K_p=8$ yapın.
- ACS-13009'da, T seçici anahtarını x10 konumuna getirin. z= 0.2 ve p= 2.5 yapın ($T_z=2$ ve $T_p=25$).
- Osiloskop kullanarak, ACS-13010 STEP+ ve ACS-13008 V_0 çıkış terminallerindeki sinyalleri ölçün ve kaydedin.
- ACS-13002 P denetleyici ile ACS-13009 Faz ilerletici/geriletici kompensatör arasındaki bağlantıyı kaldırın. ACS-13001 V_{01} çıkış terminalini, ACS-13008 V_i giriş terminaline bağlayın. 7. adımı tekrarlayın ve sonucu kaydedin.

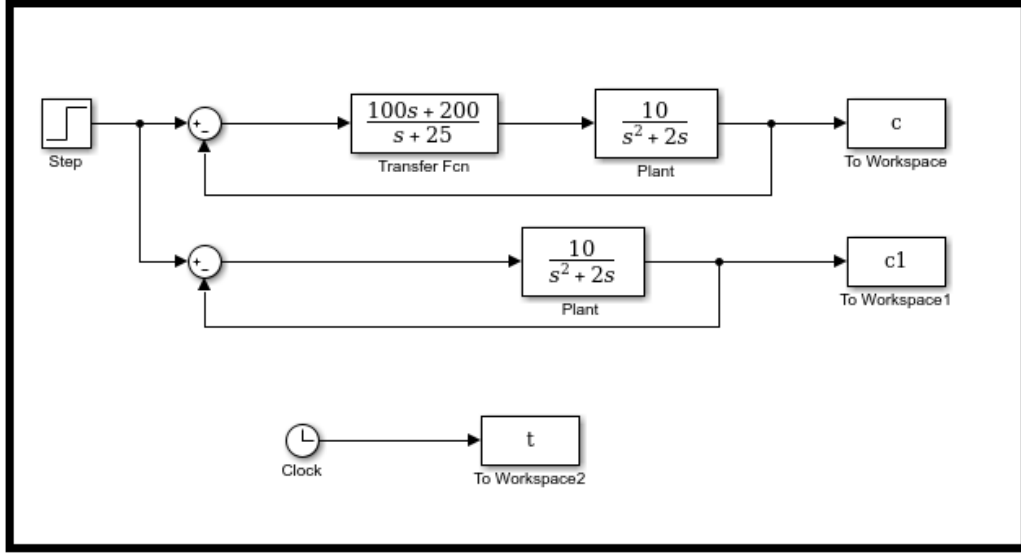
3. SIMULINK BENZETİMİ

3.1. Faz İlerletici Kompasatör

1. Faz ilerletici kompensatörün transfer fonksiyonu $G_c(s)$ yeniden yazılırsa:

$$G_c(s) = 100 \frac{s + 2}{s + 25} = \frac{100s + 200}{s + 25}$$

2. untitled adlı pencerede, şekil 2'de gösterilen blok diyagramı çizin.



Şekil 2.

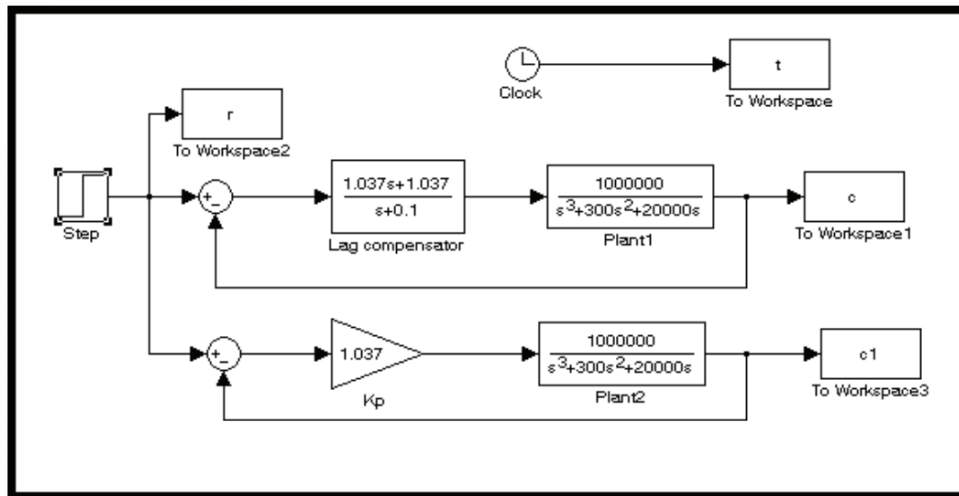
3. Step bloğunun Final value değerini 1, Step time değerini 0 yapın.
4. “Simulation/Configuration parameters” menüsüne girin ve “Simulation time” diyalog penceresinde Stop time değerini 3 olarak değiştirin.
5. Simülasyonu çalıştırın ve sistem çıkışını elde edin. Kompanze edilmiş geçici tepkenin, sistem gereksinimlerini karşılayıp karşılamadığını gözlemleyin.

3.2. Faz Geriletici Kompasatör

1. Faz geriletici kompansatörün transfer fonksiyonu $G_c(s)$ 'yi aşağıdaki gibi yeniden yazın.

$$G_c(s) = 1.037 \frac{s + 1}{s + 0.1} = \frac{1.037s + 1.037}{s + 0.1}$$

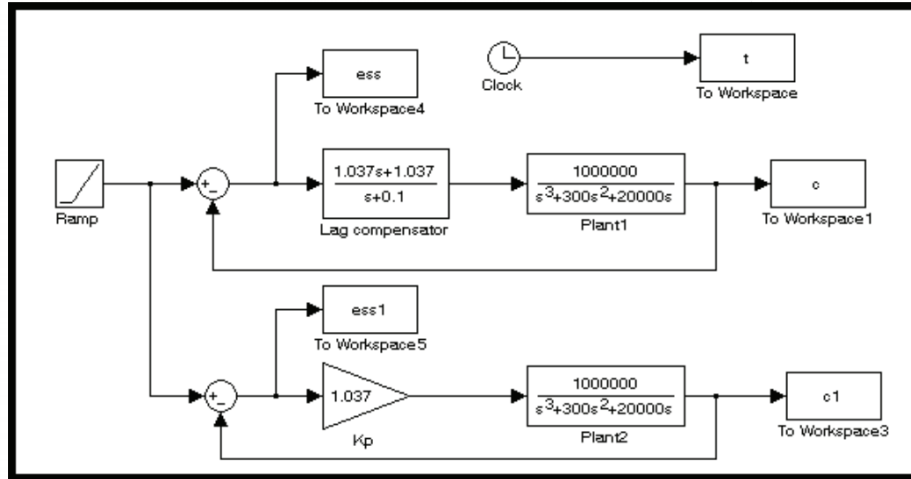
2. Untitled adlı pencerede, şekil 3'te gösterilen blok diyagramı çizin.



Şekil 3.

3. Step bloğunun Final value değerini 1, Step time değerini 0 yapın

4. “Simulation/Configuration parameters” menüsüne girin ve “Simulation time” diyalog penceresinde Stop time değerini 0.2 olarak değiştirin.
5. Simülasyonu çalıştırın ve sistem çıkışını elde edin. Kompanze edilmiş geçici tepkenin, sistem gereksinimlerini karşılayıp karşılamadığını gözlemleyin.
6. Şekil 4’te gösterilen blok diyagramı çizin. Burada, kararlı durum hatasını gözlemleyebilmek için, giriş işaretini RAMPA olarak değiştirilmiştir.



Şekil 4.

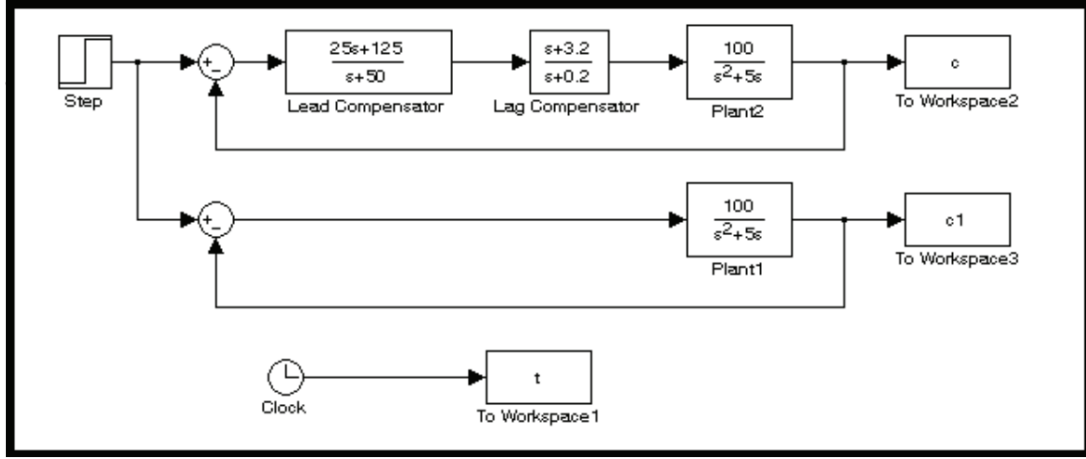
7. “Simulation/Configuration parameters” menüsüne girin ve “Simulation time” diyalog penceresinde Stop time değerini 5 olarak değiştirin.
8. Simülasyonu çalıştırın ve sistem çıkışını elde edin. Kompanze edilmiş geçici tepkenin, sistem gereksinimlerini karşılayıp karşılamadığını gözlemleyin.

3.3. Faz İlerletici-Geriletici Kompasatör

1. Faz geriletici kompansatörün transfer fonksiyonu $G_c(s)$ 'yi aşağıdaki gibi yeniden yazın.

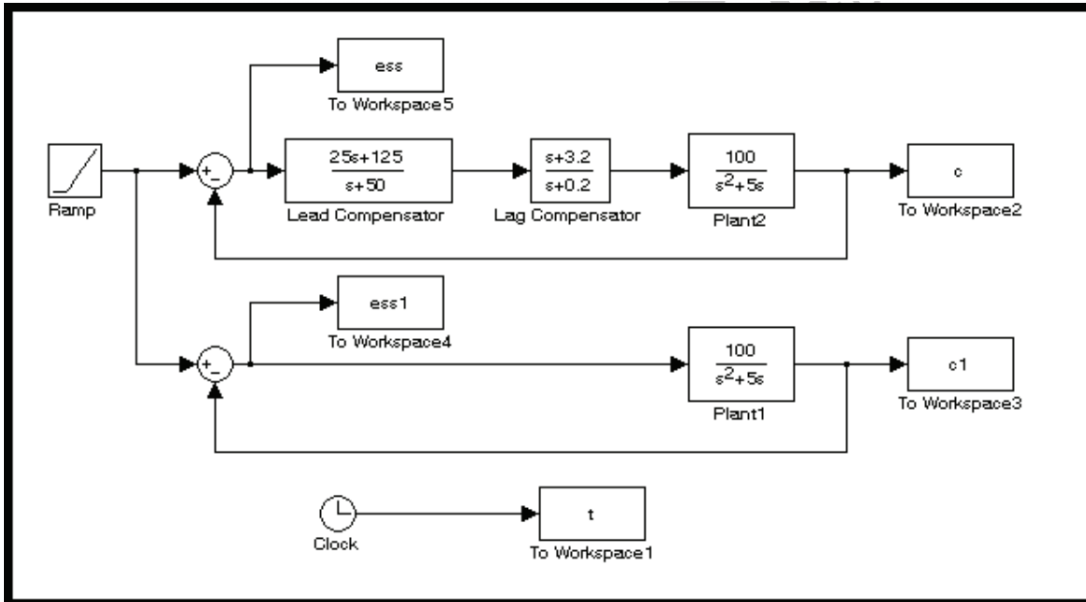
$$G_c(s) = 25 \left(\frac{s+5}{s+50} \right) \left(\frac{s+3.2}{s+0.2} \right) = \left(\frac{25s+125}{s+50} \right) \left(\frac{s+3.2}{s+0.2} \right)$$

2. untitled adlı pencerede, şekil 5’te gösterilen blok diyagramı çizin.



Şekil 5

3. Step bloğunun Final value değerini 1, Step time değerini 0 yapın.
4. “Simulation/Configuration parameters” menüsüne girin ve “Simulation time” diyalog penceresinde Stop time değerini 2 olarak değiştirin.
5. Simülasyonu çalıştırın ve sistem çıkışını elde edin. Kompanze edilmiş geçici tepkenin, sistem gereksinimlerini karşılayıp karşılamadığını gözlemleyin.
6. Şekil 6’da gösterilen blok diyagramı çizin. Burada, kararlı durum hatasını gözlemleyebilmek için, giriş işareti RAMPA olarak değiştirilmiştir.



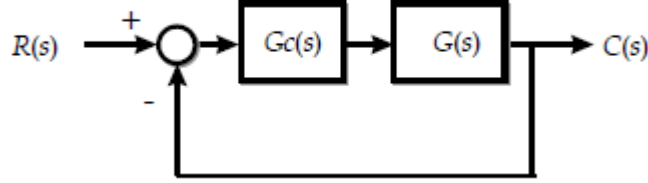
Şekil 6

7. Simülasyonu çalıştırın ve sistem çıkışını elde edin. Kompanze edilmiş geçici tepkenin, sistem gereksinimlerini karşılayıp karşılamadığını gözlemleyin.

4. EK BİLGİLER

4.1 Faz İlerletici Kompansatör

Faz ilerletici kompansatör tasarımına geçmeden önce kök-yer eğrisi yöntemini kullanarak, faz ilerletici kompansatörün fonksiyonlarını inceleyelim. Şekil 7’de gösterilen kapalı çevrim kontrol sistemini ele alalım.



Şekil 7. Kapalı çevrim kontrol sisteminin blok diyagramı

Bu şekilde, $G_c(s)$ faz ilerletici kompansatörün transfer fonksiyonu ve $G(s)$ sistemin transfer fonksiyonudur. $G_c(s)$ ve $G(s)$ ’nin aşağıdaki gibi olduğunu kabul edelim.

$$G_c(s) = K, \quad K > 0$$

$$G_c(s) = \frac{(s + z_1)(s + z_2) \dots (s + z_m)}{(s + p_1)(s + p_2) \dots (s + p_n)}$$

Kapalı çevrim sistemin karakteristik denklemi

$$1 + G_c(s)G(s) = 0$$

Ya da

$$G_c(s)G(s) = -1$$

s kompleks olduğundan, yukarıdaki denklemleri doğrulamak için, aşağıdaki iki koşulun aynı anda sağlanması gerekir.

1. Genlik koşulu

$$|G_c(s)G(s)| = 1$$

2. Açı koşulu

$$\angle G_c(s_d)G(s_d) = \mp 180^\circ (2k + 1) \quad k = 0, 1, 2, \dots$$

$$\angle G_c(s_d)G(s_d) = \sum_{i=1}^m \angle(s + z_i) - \sum_{j=1}^n \angle(s + p_j)$$

olduğu için

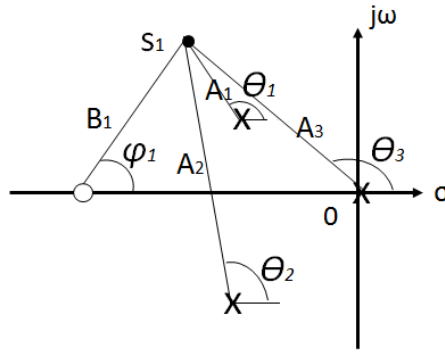
$$\sum_{i=1}^m \angle(s + z_i) - \sum_{j=1}^n \angle(s + p_j) = \mp 180^\circ (2k + 1)$$

Yukarıdaki koşulları yorumlamak için, aşağıdaki örnek ve grafik kullanılır:

$$G_c(s) = K, \quad K > 0$$

$$G_c(s) = \frac{(s + z_1)}{s(s + p_1)(s + p_2)}$$

Yukarıdaki denklemlerden, $G(s)$ transfer fonksiyonu, $-z_1$ de sıfıra, $-p_1, -p_2$ ve $p_3=0$ da kutuplara sahiptir. $G(s)$ 'nin sıfır ve kutup konumlarının, şekil 8'deki gibi olduğunu kabul edin.



Şekil 8. $G(s)$ 'nin sıfır ve kutupları

Eğer s_1 , karakteristik denklemin kökü ise,

1. Genlik koşulu

$$|G_c(s)G(s)| = \frac{|K||s_1 + z_1|}{|s_1||s_1 + p_1||s_1 + p_2|}$$

$$= \frac{KB_1}{A_1 A_2 A_3} = 1$$

2. Açık koşulu

$$\begin{aligned} \angle(s_1 + z_1) - \angle s_1 - \angle(s_1 + p_1) - \angle(s_1 + p_2) \\ = \phi_1 - \theta_1 - \theta_2 - \theta_3 \\ = \mp 180^\circ (2k + 1) \quad k = 0, 1, 2, \dots \end{aligned}$$

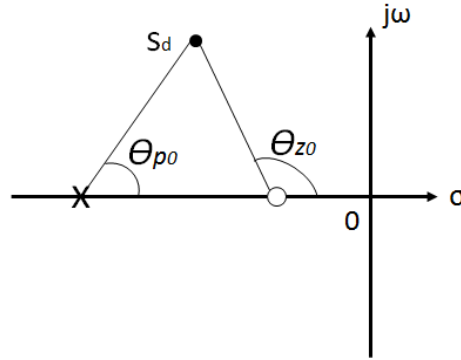
Faz ilerletici kompensatörün faz açısının negatif olduğunu düşünelim, $|z| < |p|$. Şekil 1'de gösterilen kapalı-çevrim kontrol sisteminin transfer fonksiyonu aşağıdaki gibi ifade edilebilir:

$$G_c(s) = K_c \frac{s + z_0}{s + p_0} \quad |p_0| > |z_0|$$

$$G_c(s) = \frac{(s + z_1)(s + z_2) \dots (s + z_m)}{(s + p_1)(s + p_2) \dots (s + p_n)}$$

Eğer s_d , karakteristik denklemin kökü ise, açılı koşuluna göre;

$$\begin{aligned} \angle G_c(s_d)G(s_d) &= \angle G_c(s_d) + \angle G(s_d) \\ &= \theta_{z_0} - \theta_{p_0} + \angle G(s_d) \\ &= \mp 180^\circ (2k + 1) \quad k = 0, 1, 2 \dots \end{aligned}$$



Şekil 9. Faz ilerletici kompansatörün sıfır ve kutbu

Şekil 9'dan, $\theta_{z_0} > \theta_{p_0}$ olduğu açıktır. Başka bir ifadeyle, karakteristik denklem, sistem kutbunu sola kaydıran bir pozitif açılı kompansasyonu sağlamakta ve kapalı çevrim sistemi karalı yapmaktadır.

Kök yer eğrisi yöntemini kullanarak faz ilerletici veya geriletici kompansatör tasarlamak için, aşağıdaki ön işlemler gerçekleştirilmelidir:

1. Geçici tepke, karalı durum tepkesi, aşma yerleşme süresi vs. gibi sistem gereksinimlerini belirleyin.
2. 1. Adımdaki gereksinimlere göre, matematiksel olarak kapalı-çevrim sistemin baskın kutbunu bulun.
3. Baskın kutbun, sistem tepkesine hakim olan kutup olduğundan emin olmak için, kapalı-çevrim sistemin diğer kutu ve sıfırları aşağıdaki şartları sağlamalıdır:
 - (1) Diğer kutuplar, baskın kutbun sol tarafında ve baskın kutuptan uzakta yer almalıdır.
 - (2) Eğer baskın kutba çok yakın bir kutup varsa, kutbun yakınlarında bir sıfır yer almalıdır.

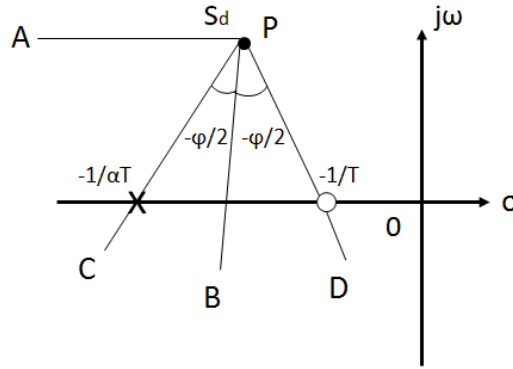
Faz ilerletici kompansatör tasarlamak için, aşağıdaki adımları izleyin:

- İstenen kapalı-çevrim sistem baskın kutbu s_d , $\angle G_c(s_d)G(s_d) \neq \mp 180^\circ(2k+1)$ ve kompanze edilecek açı sıfırdan büyük olduğu zaman, faz ilerletici kompensatöre ihtiyaç duyulur ve bu kompensatörün transfer fonksiyonu,

$$G_c(s) = K_c \alpha \frac{Ts+1}{\alpha Ts+1} = K_c \alpha \frac{s+1/T}{s+1/\alpha T}, \quad 1 > \alpha > 0$$

- $G_c(s)$ 'nin kutup ($p=1/\alpha T$) ve sıfır $z=1/T$ konumlarını belirleyin.

(1) Grafikselsel çözüm (şekil 10.)



Şekil 10. $G_c(s)$ 'nin grafikselsel çözümü

- s_d 'nin konumunu, P noktası olarak gösterin ve orjinden, P noktasına düz bir çizgi çizin.
- P noktasından herhangi bir A noktasına, gerçel eksen σ 'ya paralel, düz bir çizgi çizin.
- $\angle APO$ açısını eşit iki parçaya bölecek şekilde, P noktasından B noktasına düz bir çizgi çizin.
- $\angle CPB = \frac{\phi}{2}$ olacak şekilde, P noktasından C noktasına düz bir çizgi çizin.
- $\angle DPB = \frac{\phi}{2}$ olacak şekilde, P noktasından D noktasına düz bir çizgi çizin.
- PC çizgisi ile gerçel eksenin kesişimi, faz ilerletici kompensatörün kutbudur $-\frac{1}{\alpha T}$.
- PD çizgisi ile gerçel eksenin kesişimi, faz ilerletici kompensatörün sıfırıdır $-\frac{1}{T}$.

(2) Yukarıda anlatılan grafikselsel çözümü kullanarak faz ilerletici kompensatörün sıfır ve kutuplarını bulmak için uygun bir araç(iletkei vs.) veya bu iş için hazırlanmış yazılım gereklidir. Aşağıda daha basit bir yol anlatılmıştır:

- Kompansatörün sıfırını, gerçel eksen üzerinde, istenen baskın kutbun aşağısına yerleştirin. Eğer $G(s)$ 'nin kutbu bu yerde konumlanıyorsa, sıfır, bu kutbun sol tarafından yeniden konumlandırın.
- Kompanze edilecek açığa göre, kompensatörün kutbunu bulun.

c. $G(s_d)G_c(s_d) |_{=1}$ eşitliğini kullanarak, K_c değerini hesaplayın.

Tasarım Örneği:

[Problem] Sistem aşağıdaki transfer fonksiyonuna sahiptir.

$$G(s) = \frac{10}{s(s+2)}$$

Tek geribeslemeli kapalı çevrim sistemin, aşağıdaki özellikleri sağlaması için bir kompensatör tasarlayın.

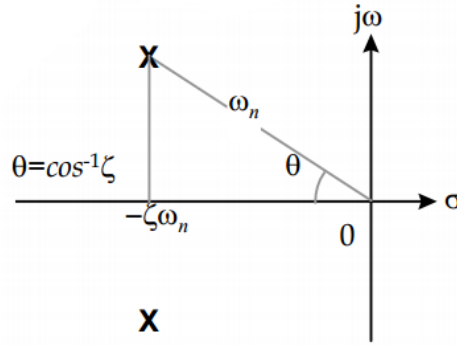
1. Baskın kutup için $\zeta \geq 0.44$ olmalı.
2. Baskın kutup için $\omega_n \geq 9$ rad/sn olmalı.
3. Hız hata sabiti $K_v \geq 15 \text{ sec}^{-1}$ olmalı.

[Çözüm]

1. Baskın kutbun konumunu bulun.

$p_{1,2} = -\zeta\omega_n \mp j\omega_n\sqrt{1-\zeta^2}$ denkleminde, $p_{1,2} = -3.96 \mp j8.08$ olarak bulunur.

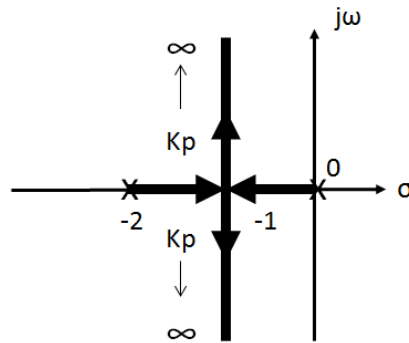
Kolaylık olması için, en yakın tam sayı seçilirse kutuplar $p_{1,2} = -4 \mp j8$ olur.



Şekil 11. ζ , ω_n ve kutup arasında ilişki

P denetleyicili sistemin, gerekli özellikleri karşılayıp karşılamadığını inceleyin.

P denetleyici sistemi gözden geçirmek için şekil 12’de gösterilen kök yer eğrisini dikkate alın.



Şekil 12. P denetleyicili kapalı-çevrim sistemin kök yer eğrisi diyagramı

Bu şekilden, P denetleyicili kapalı-çevrim sistemin, hiçbir K_p değeri için gerekli özellikleri sağlayamadığı görülmektedir. İstenen baskın kutup, P denetleyicili kapalı-çevrim

sistemin kök yer eğrisi diyagramının sol tarafında olduğu için, kök yer eğrisini sola çekmek için faz ilerletici kompensatör kullanılmalıdır.

2. Faz ilerletici kompensatör tasarlama

(1) Sıfır

Gerçel eksen üzerine, istenen baskın kutbun altına bir sıfır yerleştirin. Yani,

$$z = \frac{1}{T} = -4$$

(2) Kutup

$$\begin{aligned}\angle G_c(s_d)G(s_d)|_{s=-4+j8} &= -180^\circ \\ &= \angle G_c(s_d)|_{s=-4+j8} + \angle G(s_d)|_{s=-4+j8} \\ &= \angle G_c(s_d)|_{s=-4+j8} - \angle(-4+j8) - \angle(-2+j8) \\ &= \angle G_c(s_d)|_{s=-4+j8} - 116.57^\circ - 104.03^\circ\end{aligned}$$

Olduğu için

$$\begin{aligned}\angle G_c(s_d)|_{s=-4+j8} &= -180^\circ + 116.57^\circ + 104.03^\circ \\ &= 40.6^\circ \\ \angle G_c(s_d)|_{s=-4+j8} &= \angle(j8) - \angle(p-4+j8) \\ &= 90^\circ - \tan^{-1} \frac{8}{p-4}\end{aligned}$$

Olduğu için

$$\begin{aligned}\tan^{-1} \frac{8}{p-4} &= 90^\circ - 40.6^\circ \\ \frac{8}{p-4} &= \tan 49.4^\circ = 1.17 \\ P &= 10.8\end{aligned}$$

Böylece faz ilerletici kompensatörün transfer fonksiyonu $\frac{s+4}{s+10.8}$ olur.

(3) Kc

$$\left| \frac{10K_c(S+4)}{s(s+2)(S+10.8)} \right|_{s=-4+j8} = \frac{80K_c}{8.94 \times 8.25 \times 10.5} = 1$$

Olduğu için

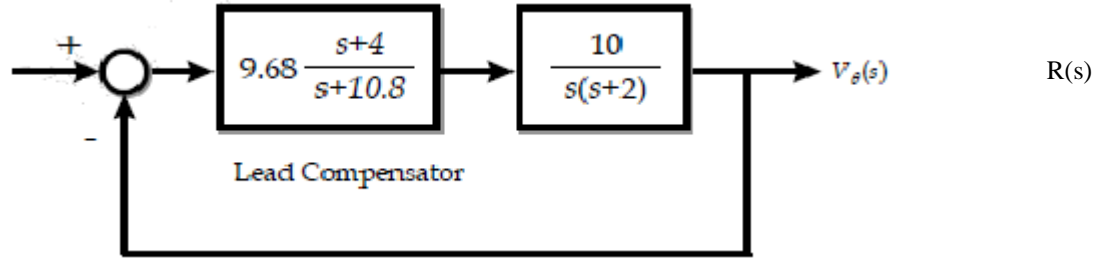
$$K_c = 9.68$$

3. Hız sabiti Kv'nin, 15 sec^{-1} den büyük olup olmadığını kontrol edin.

$$K_v = \lim_{s \rightarrow 0} sG_c(s)G(s) = 17.9 > 15$$

İstenilen şart sağlanmaktadır.

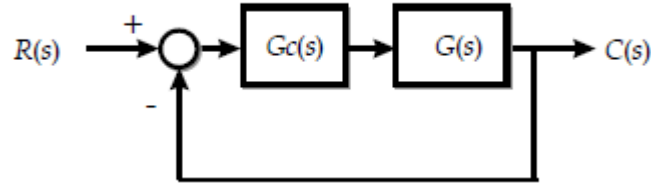
Kapalı çevrim sistemin blok diyagramı, şekil 13'te gösterilmiştir.



Şekil 13. Sistemin blok diyagramı

4.2. Faz Geriletici Kompansatör

Faz geriletici sistem tasarlamadan önce, kök yer eğrisi yöntemini kullanarak, faz geriletici kompansatörün fonksiyonunu inceleyelim. Şekil 14'te gösterilen sistemi ele alalım:



Şekil 14. Sistem blok diyagramı

Bu şekilde, $G_c(s)$ kompansatörün ve $G(s)$ sistemin transfer fonksiyonudur. $G_c(s)=K$ olduğunu Kabul edelim. Eğer system iyi bir geçici tepkeye ve kötü bir kararlı durum tepkesine sahipse, K değerinin artmasıyla kararlı durum tepkesinde iyileşme görülebilir, ancak bu durumda geçici tepke daha kötü olacaktır. Bu durumda bir faz geriletici kompansatör kullanılmalıdır. Kök yer eğrisine göre düşünürsek, sisteme faz geriletici kompansatör eklenmesiyle kararlı durum tepkesinde iyileşme görülür ve baskın kutup konumunda sadece küçük bir değişim ortaya çıkar. Şimdi, transfer fonksiyonunu kullanarak, faz geriletici kompansatörün, hız hata sabitine etkisini ele alalım. Faz geriletici kompansatörün transfer fonksiyonu

$$G_c(s) = \frac{s+z}{s+p} , \quad \beta = \frac{z}{p} > 1$$

Eğer sistemin transfer fonksiyonu $G(s)$ ise, kompanze edilmiş tek geri beslemeli sistemin hız hata sabiti;

$$K_v = \lim_{s \rightarrow 0} sG(s)$$

Faz geriletici kompansatör $G_c(s)$ 'nin eklenmesiyle, kompanze edilmiş hız hata sabiti şu şekilde olur;

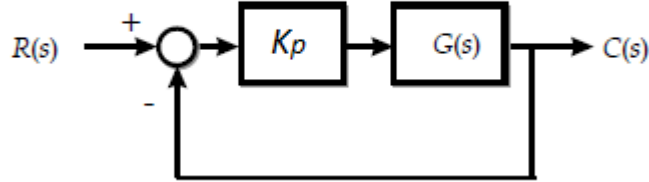
$$K_v = \lim_{s \rightarrow 0} sG(s)G_c(s) = \lim_{s \rightarrow 0} K_v K_c \frac{z}{p}$$

Yukarıdaki denklemden, faz geriletici kompansatör $G_c(s)$ 'nin eklenmesiyle hız hata sabiti K_v 'nin $K_c z/p$ katına çıktığı görülmektedir.

Faz geriletici kompansatör tasarlamak için, aşağıdaki adımlar takip edilir:

1. Oransal denetleyicili sistemin kök yer eğrisi çizilir.

Şekil 15'de gösterilen blok diyagramı ele alalım.



Şekil 15. Oransal denetleyicili sistemin blok diyagramı

Verilen gereksinimlere göre, baskın kutbun konumunu ve baskın kutbun bu pozisyonda konumlanmasını sağlayacak K_p değerini bulun. Bu değeri K_c olarak kaydedin.

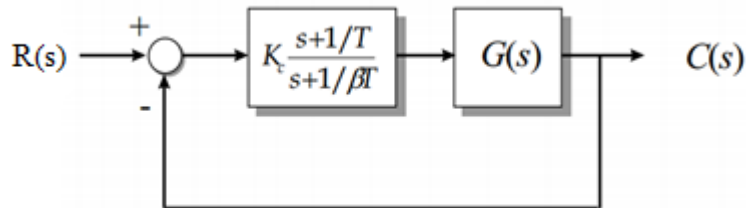
2. Sistemin, kararlı durum tepkisi gereksinimlerini sağladığı K_p değerini bulun ve bu değeri K_s olarak kaydedin.
3. Faz geriletici kompansatörün kutbunu $p=1/\beta T$, sıfırını $z=1/T$ olarak belirleyin. β 'nın hesaplanması şu şekildedir:

$$\beta = \frac{K_s}{K_c}$$

4. T'ye gerçek değerine aldirmayarak, rastgele büyük bir değer atayın. Böylece faz geriletici kompansatörün transfer fonksiyonu şu şekilde olur:

$$G_c(s) = K_c \frac{s+z}{s+p} = K_c \frac{s+1/T}{s+1/\beta T}$$

Faz geriletici kompansatör eklenmiş sistemin blok diyagramı şekil 16'dadır.



Şekil 16. Faz geriletici kompansatör eklenmiş sistemin blok diyagramı

Tasarım Örneği:

[Problem] Aşağıdaki transfer fonksiyonuna sahip sistemi ele alalım.

$$G(s) = \frac{1000000}{s(s+100)(s+200)} = \frac{1000000}{s(s^2+300s+20000)}$$

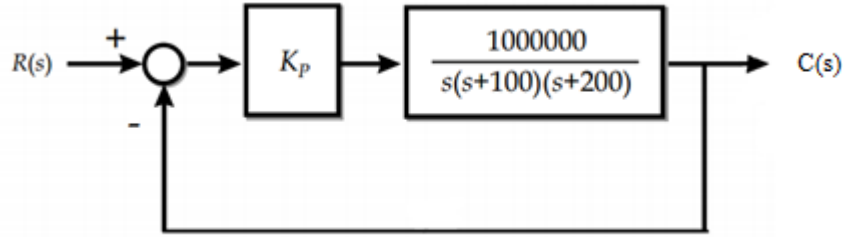
Aşağıdaki gereksinimleri karşılayacak bir sistem yapmak için bir kompensatör tasarlayalım.

1. Baskın kutbun sönüm oranı $\zeta \geq 0,5$ olmalı.
2. Hız sabiti $K_v \geq 500 \text{ sec}^{-1}$ olmalı.

[Çözüm]

1. P denetleyicili sistemin kök yer eğrisini çizin.

Şekil 17, P denetleyicili sistemin blok diyagramını göstermektedir.



Şekil 17. P denetleyicili sistemin blok diyagramı

MATLAB yardımıyla şekil 11’de gösterilen sistemin kök yer eğrisini çizin.

Kök yer eğrisini çizmek için, MATLAB Komut Penceresinde(Command Window) aşağıdaki komutları yazın.

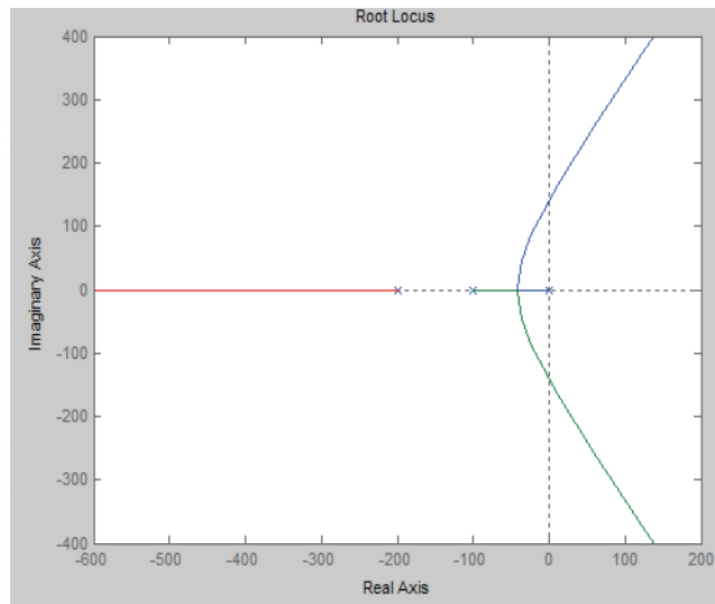
```
num=[100000]
```

```
den=[1 300 20000 0]
```

```
k=0:0.1:10
```

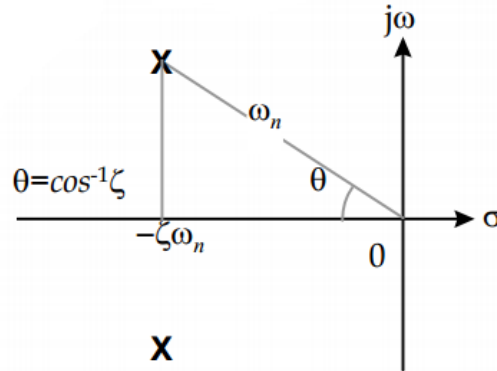
```
rlocus(num,den)
```

Sonuç şekil 18’de gösterilmiştir.



Şekil 18. P denetleyicili kapalı çevrim sistemin kök yer eğrisi diyagramı

2. $\zeta = 0,5$ iken K_p değerini bulun. Bu değer, faz geriletici kompensatörün K_c değeri olacaktır. Şekil 19, kutuplar, ζ , w_n arasındaki ilişkiyi göstermektedir.



Şekil 19. Kutuplar, ζ ve w_n ve arasında ilişki

Şekil 19'dan $\zeta \geq 0.5$ için, $\theta = \cos^{-1}\zeta \leq \cos^{-1}0.5$ olduğu görülmektedir. Bu yüzden $\theta \leq 1.0472$ olmalıdır.

MATLAB yardımıyla, $\zeta=0.5(\theta)$ yapan K_p değerini bulun.

- (1) Sistemi tanımlayın.

MATLAB Komut Penceresinde aşağıdaki komutları yazın.

num=[1000000]

den=[1 300 20000 0]

- (2) $K_p=1$ yapın ve kapalı çevrim sistemin kutuplarını (köklerini) bulun.

MATLAB Komut Penceresine aşağıdaki komutu yazın.

r=rlocus(num,den,1)

$K_p=1$ için kapalı çevrim sistemin kutupları -232.47 ve $-33.76 \pm 56.23j$ olacaktır.

- (3) θ 'yı belirleyin .

MATLAB Komut Penceresine aşağıdaki komutu yazın.

pi-angle(r(2))

sonuç $\theta = 1.03 \leq 1.0472$ olacaktır.

- (4) K_p 'yi değiştirin ve K_c 'yi bulmak için 2 ve 3. adımları tekrarlayın.

$K_p=1.05$ için, $\theta=1.053 \geq 1.0472$

$K_p=1.037$ için, $\theta=1.0472$

Böylece $K_c=1.037$ olarak belirlenir.

3. Şekil 17'deki sistemin kararlı durum tepkisi gereksinimlerini karşılaması için gerekli K_p değerini bulun.

Şekil 17'teki sistemin hız hata sabiti K_v

$$K_v = \lim_{s \rightarrow 0} s K_p G(s) = \frac{100 K_p}{2}$$

$K_v = 500 \text{ sec}^{-1}$ olması istendiği için $K_p = 10$ olmalıdır.

Kolaylık olması için, $K_s = K_p = 10.37$ seçeriz.

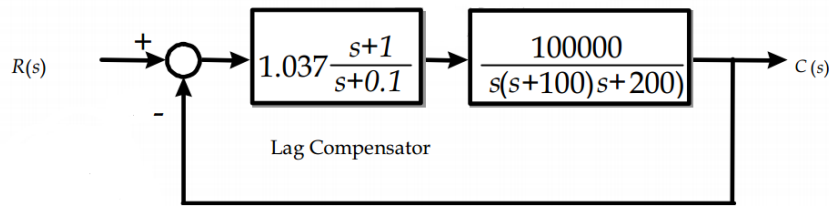
4. Faz geriletici kompensatörün kutbu $p_1 = \beta T$ ve sıfırı $z = 1/T$ olsun.

$$\beta = \frac{K_s}{K_c} = 10$$

5. T'ye büyük bir değer atayın. Bununla birlikte, eğer T çok büyük seçilirse, faz geriletici kompensatörün p ve z'si, ACS-13009 Lead/lag Compensator modülünde elde edilemeyecek düzeyde küçük olur. T=1 alınırsa, faz geriletici kompensatörün transfer fonksiyonu şu şekilde olur:

$$G_c(s) = K_c \frac{s + z}{s + p} = K_c \frac{s + 1/T}{s + 1/\beta T} = 1.037 \frac{s + 1}{s + 0.1}$$

Faz geriletici kompensatörlü sistemin blok diyagramı şekil 18'de gösterilmiştir.



Şekil 18. Faz geriletici kompensatörlü sistemin blok diyagramı

Açık çevrim transfer fonksiyonu

$$\begin{aligned} G_c(s)G(s) &= 1.037 \frac{s + 1}{s + 0.1} \frac{1000000}{s(s + 100)(s + 200)} \\ &= \frac{1037000(s+1)}{s^4 + 300s^3 + 20030s^2 + 200s} \end{aligned}$$

6. Faz geriletici kompensatörlü kapalı çevrim sistemin kutuplarını bulun. MATLAB Komut Penceresine aşağıdaki komutu yazın.
 num=[1 1]
 den=[1 300.1 20030 2000 0]
 Bulunan kutuplar -233.24, -32.92±57.31j ve -1.02 olacaktır.

$G_c(s)G(s)$ transfer fonksiyonunun -1’de sahip olduğu sıfır, -1.02 kutbuna çok yakın olduğu için, bu kutbun sisteme etkisi ortadan kalkmış olur (kutup-sıfır yok etmesi).

Sonuç olarak, kapalı çevrim sistemin kutupları $-32.92 \pm 57.31j$ ve -233.24 olur. Bu kutuplar, sadece P denetleyicili ($K_p=1.037$) kapalı çevrim sistemin kutuplarına ($-33.33 \pm 57.74j$ ve -233.33) çok yakındır. Diğer bir ifadeyle, bu iki sistemin geçici tepkeleri çok yakındır. Bu iki sistemin hız hata sabitleri karşılaştırılırsa, P denetleyicili sistemin hız hata sabiti 51.8 sec^{-1} iken faz geriletici kompensatöre sahip sistemin hız hata sabiti 518 sec^{-1} ’dir.

4.3. Faz İlerletici-Geriletici Kompensatör

Faz ilerletici-geriletici kompensatörün transfer fonksiyonunu ele alalım.

$$G_c(s) = K_c \left(\frac{s + z_1}{s + p_1} \right) \left(\frac{s + z_2}{s + p_2} \right)$$

Burada, $\alpha = (p_1/z_1) > 1$ ve $\beta = (z_2/p_2) > 1$

Zaman domenii yöntemi kullanarak faz ilerletici-geriletici kompensatör tasarlamak için, iki durum göz önüne alınmalıdır:

1. α ve β birbirine eşit olmamalıdır.
2. α ve β birbirine eşit olmalıdır.

α ve β ’nın birbirine eşit olmaması durumunda, faz ilerletici-geriletici kompensatör tasarlamak için aşağıdaki adımlar yerine getirilmelidir.

1. İstenen şartlara göre kapalı-çevrim sistemin baskın kökünü bulun. Diğer bir ifadeyle, şartları sağlayacak kapalı-çevrim sistemin kutbunu belirleyin.
2. Faz geriletici kompensatörün sıfır ve kutbunun (z_2, p_2) orjine çok yakın olduğunu kabul edin. Eğer sd kapalı çevrim sistemin baskın kutbu ise

$$\left| \frac{s_d + z_2}{s_d + p_2} \right| \approx 1$$

Bu durumda, faz ilerletici kompensatörün sıfır, kutup (z_1, p_1) ve K_c ‘sini belirleyin

3. Belirtilen kararlı durum tepkisi kriterlerine göre, faz geriletici kompensatörün sıfır ve kutbunu (z_2, p_2) tasarlayın. Faz ilerletici-geriletici kompensatörlü sistemin hız hata sabiti K_v

$$\begin{aligned} K_v &= \lim_{s \rightarrow 0} sG(s)G_c(s) = \lim_{s \rightarrow 0} K_c \left(\frac{s + z_1}{s + p_1} \right) \left(\frac{s + z_2}{s + p_2} \right) G(s) \\ &= \lim_{s \rightarrow 0} K_c \left(\frac{z_1}{p_1} \right) \left(\frac{z_2}{p_2} \right) G(s) = \lim_{s \rightarrow 0} K_c \frac{\beta}{\alpha} G(s) \end{aligned}$$

Son olarak, Kv ve 2. adımda elde edilen Kc ve α değerlerini yerine koyarak, β değerini bulun. Daha sonra, aşağıdaki koşullara göre, faz ilerletici kompensatörün sıfır ve kutbunu (z_2, p_2) belirleyin.

$$\left| \frac{s_d + z_2}{s_d + p_2} \right| \approx 1, \quad -5^\circ < \angle \left(\frac{s_d + z_2}{s_d + p_2} \right) < 0^\circ$$

Tasarım Örneği:

[Problem] Aşağıdaki transfer fonksiyonuna sahip sistemi ele alalım.

$$G(s) = \frac{100}{s(s+5)}$$

Aşağıdaki gereksinimleri sağlayacak bir sistem yapmak için bir kompensatör tasarlayalım.

1. Baskın kutup için $\zeta \geq 0.5$ olmalı.
2. Baskın kutup için $\omega_n \geq 50$ rad/sn olmalı.
3. Hız hata sabiti $K_v \geq 800 \text{ sec}^{-1}$ olmalı.

[Çözüm]

4. Baskın kutbun konumunu bulun.

$p_{1,2} = -\zeta\omega_n \mp j\omega_n\sqrt{1-\zeta^2}$ denkleminden, baskın kutupları $p_{1,2} = -25 \mp j43.3$ olarak buluruz.

5. Faz ilerletici kompensatörü tasarlayın.

(4) Sıfır

Sıfır, genellikle istenen baskın kutbun altında reel eksen üzerinde yada $G(s)$ 'nin kutbuyla kutup-sıfır yok etmesi gerçekleşecek şekilde konumlandırılır. Burada, faz ilerletici kompensatörün sıfırı, $G(s)$ 'nin kutup konumunda seçilir.

$$z = \frac{1}{T} = 5$$

(5) Kutup

$$\begin{aligned} \angle G_c(s_d)G(s_d)|_{s=-25+j43.3} &= -180^\circ \\ &= \angle G_c(s_d)|_{s=-25+j43.3} + \angle G(s_d)|_{s=-25+j43.3} \\ &= \angle G_c(s_d)|_{s=-25+j43.3} - \angle(-25+j43.3) - \angle(-20+j43.3) \\ &= \angle G_c(s_d)|_{s=-25+j43.3} - 120^\circ - 115^\circ \end{aligned}$$

Bu durumda

$$\begin{aligned} \angle G_c(s_d)|_{s=-25+j43.3} &= -180^\circ + 120^\circ + 115^\circ = 55^\circ \\ \angle G_c(s_d)|_{s=-25+j43.3} &= \angle(-20+j43.3) - \angle(-25+p_1+j43.3) \\ &= 115^\circ - \tan^{-1} \frac{43.3}{-25+p_1} \end{aligned}$$

$$\tan^{-1} \frac{43.3}{-25+p_1} = 115^\circ - 55^\circ$$

$$\frac{43.3}{-25+p_1} = \tan 60^\circ = 1.732$$

Buradan $p_1=50$ olarak bulunur.

Böylece faz ilerletici kompensatörün transfer fonksiyonu $\frac{s+5}{s+50}$ olur.

6. K_c 'yi belirleyin.

$$\left| K_c \frac{s+5}{s+50} \frac{100}{s(s+5)} \right|_{s=-25+j43.3} = \frac{100K_c}{50 \times 50} = 1$$

Böylece $K_c=25$ sonucu elde edilir.

7. Kararlı durum tepkisi kriterlerine göre faz geriletici kompensatörün sıfır ve kutbunu (z_2 , p_2) belirleyin. Hız hata sabiti $K_v=800$ olduğuna göre,

$$\begin{aligned} K_v &= \lim_{s \rightarrow 0} sG(s)G_c(s) = \lim_{s \rightarrow 0} sK_c \left(\frac{s+z_1}{s+p_1} \right) \left(\frac{s+z_2}{s+p_2} \right) G(s) \\ &= \lim_{s \rightarrow 0} s(25) \left(\frac{5}{50} \right) \left(\frac{z_2}{p_2} \right) \left(\frac{100}{s(s+5)} \right) = 50 \frac{z_2}{p_2} = 800 \end{aligned}$$

Böylece $z_2/p_2 = 16$ olarak bulunur.

Son olarak, faz geriletici kompensatörün sıfır ve kutup konumları (z_2 , p_2), aşağıdaki şartlara göre belirlenir:

$$\left| \frac{s+z_2}{s+p_2} \right|_{s=-25+j43.3} \approx 1, \quad -5^\circ < \angle \left(\frac{s+z_2}{s+p_2} \right)_{s=-25+j43.3} < 0^\circ$$

MATLAB Komut Penceresinde aşağıdaki komutları yazın:

```
>> s=complex(-25,43.3)
>> z=0.1
>> Gc=(s+z)/(s+z/16)
>> A=angle(Gc)*180/pi
>> while (A>-5)
    z=z+0.1
    Gc=(s+z)/(s+z/16)
    A=angle(Gc)*180/pi
end
```

Sonuçta $z=5.1$ değeri elde edilir. z_2 'nin 5 den küçük olması gerektiği görülmektedir. Kolaylık olması için $z_2=3.2$ olarak seçilir.

$$p_2 = \frac{3.2}{16} = 0.2$$

8. Faz ilerletici-geriletici kompensatörün transfer fonksiyonu şu şekilde elde edilmiş olur.

$$G_c(s) = 25 \left(\frac{s+5}{s+50} \right) \left(\frac{s+3.2}{s+0.2} \right)$$