

2. BÖLÜM

İŞLEMSEL KUVVETLENDİRİCİLERİN LİNEER UYGULAMALARI

İşlemsel kuvvetlendiriciler, endüstriyel elektronik uygulamaları açısından büyük önem taşıyan bir yapı grubudur. İşlemsel kuvvetlendiriciler, endüstriyel elektronik alanında çeşitli ölçü ve kontrol düzenlerinin gerçekleştirilmesi amacıyla geniş ölçüde kullanılmakta, bu yapı grubu yardımıyla değişik özelliklerdeki lineer ve lineer olmayan devre fonksiyonları elde edilebilmektedir. Akım kaynakları, negatif empedans çevirici, integral ve türev alıcılar, logaritmik ve ters logaritmik kuvvetlendiriciler, çeşitli türden osilatör devreleri, presizyonlu doğrultucular, AC-DC çeviriciler, analog çarpma-bölme ve karekök alma devreleri, örnekleme ve tutma devreleri, karşılaştırıcılar, Schmitt tetikleme devreleri, enstrümantasyon kuvvetlendiricileri gibi devrelerin ve düzenlerin gerçekleştirilmesi gerekeceği göz önüne alınacak olursa, geniş bir çeşitlilik gösteren bu uygulamalar açısından, işlemsel kuvvetlendiricilerin ve bunların birer türevi olan OTA'lar (geçiş iletkenliği kuvvetlendiricileri) ve Norton (akım farkı) kuvvetlendiricilerinin önemli bir rol oynayacakları açıktır.

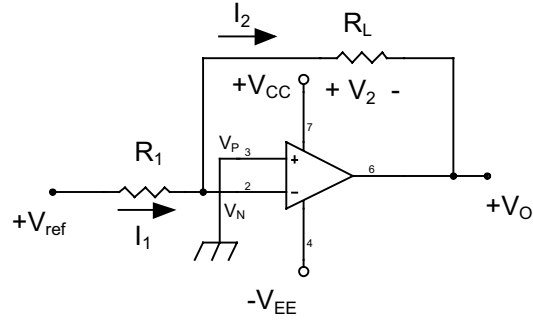
Bu Bölüm'de, işlemsel kuvvetlendiricilerin lineer uygulamaları ele alınacak, temel devre yapıları elemanın ideal olmaması durumu da göz önünde bulundurularak incelenecek, devrelerin çalışma bölgeleri ve bunların sınırları belirlenecektir.

2.1. Akım Kaynakları

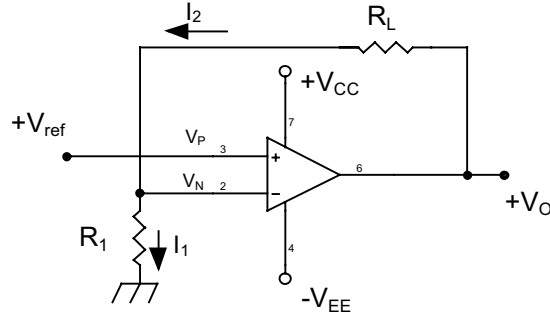
2.1.1. "Yüzen" yükler için akım kaynakları

Endüstriyel elektronik alanında bir çok uygulama için akım kaynağı yapılarına sıkça gereksinme duyulur. Bazı uygulamalarda, gerçekleştirilecek akım kaynağının büyük değerli akımlar vermesi de istenebilir. İşlemsel kuvvetlendiricilerle kurulan akım kaynağı devreleri bu gereksinmeye bir çözüm getirmektedir.

İşlemsel kuvvetlendiricilerle gerçekleştirilen en basit akım kaynağı devreleri, faz döndüren ve faz döndürmeyen kuvvetlendirici yapılarına dayanan ve **yüzen yükler** için kullanılan akım kaynağı yapılarıdır. **Yüzen yükler** için kullanılan akım kaynağı devreleri Şekil-2.1'de görülmektedir.



(a)



(b)

Şekil-2.1. "Yüzen yükler için akım kaynakları; a) faz döndüren yapı, b) faz döndürmeyen yapı.

Devreyi gerçekleştirmek için kullanılan işlemsel kuvvetlendiricinin açık çevrim kazancı sonlu ve K_V ise, kuvvetlendiricinin giriş gerilimi $V_{IN} = V_P - V_N$ sıfır olmaz. Giriş direncinin sonsuz, ancak açık çevrim kazancının sonlu olduğu kabul edilirse, devreden de yararlanılarak

$$I_1 = I_2 = \frac{V_{ref} - V_N}{R_1} \quad , \quad V_N = -\frac{V_O}{K_V}$$

$$V_2 = V_N - V_O$$

bağıntıları yazılabilir. Böylece, akım kaynağı devresinin çıkış akımı

$$I_2 = \frac{V_{ref}}{R_1} - \frac{V_2}{R_1 \cdot (1 + K_V)} \approx \frac{V_{ref}}{R_1} - \frac{V_2}{K_V \cdot R_1} \quad (2.1)$$

olur. İşlemsel kuvvetlendiricinin açık çevrim kazancının yeteri kadar büyük olması durumunda, ikinci terim ilk terimin yanında rahatlıkla ihmal edilebilir. Böylece, devrenin çıkış akımı

$$I_2 = \frac{V_{ref}}{R_1} \quad (2.2)$$

biçiminde yazılabilir. Akım kaynağının çıkış direnci ise

$$R_O = -\frac{\partial V_2}{\partial I_2} = K_V \cdot R_1 \quad (2.3)$$

bağıntısı yardımıyla hesaplanabilir. (2.3) bağıntısından fark edilebileceği gibi, akım kaynağı devresinin çıkış direnci, işlemsel kuvvetlendiricinin açık çevrim fark işaret kazancına ve R_1 direncine bağlıdır. İşlemsel kuvvetlendiricinin açık çevrim kazancı ise frekansa bağlıdır. Genel amaçlı işlemsel kuvvetlendiriciler, çoğunlukla, frekans eğrileri tek kutuplu düşme gösterecek biçimde kompanze edilirler. Şekil-2.1'deki akım kaynağı devrelerinin bu tür işlemsel kuvvetlendiricilerle kuruldukları varsayılınsın. Bu durumda işlemsel kuvvetlendiricinin açık çevrim kazancı

$$K_V(s) = \frac{K_{VO}}{1 + \tau \cdot s} \quad (2.4)$$

şeklinde yazılabilir. Burada K_{VO} işlemsel kuvvetlendiricinin açık çevrim kazancının alçak frekanslardaki değerini göstermektedir. τ büyüklüğü ise

$$\tau = \frac{1}{\omega_c} \quad (2.5)$$

şeklinde, açık çevrim transfer fonksiyonunun açısasal kesim frekansı cinsinden ifade edilebilen bir büyüklüktür. (2.3) bağıntısı uyarınca

$$R_O = R_I \cdot K_V(s)$$

olacağından hareket edilirse, akım kaynağının çıkış empedansı

$$Z_O(s) = \frac{K_{VO}}{1 + \tau \cdot s} \cdot R_I \quad (2.6)$$

şeklinde yazılabilir. (2.6) bağıntısında s yerine $j\omega$ konursa, $j\omega$ domeninde devrenin çıkış empedansı

$$Z_O(j\omega) = \frac{K_{VO}}{1 + j \frac{\omega}{\omega_c}} \cdot R_I \quad (2.7)$$

biçiminde yazılabilir. Akım kaynağının çıkış empedansı, bir R_O çıkış direnci ve bir C_O çıkış kapasitesinin paralel eşdeğeri gibi de düşünülebilir. Böylece

$$Z_O = \frac{1}{\frac{1}{K_{VO} \cdot R_I} + j \frac{\omega}{K_{VO} \cdot R_I \cdot \omega_c}} = R_O // \frac{1}{j\omega C_O} \quad (2.8)$$

yazılabilir. (2.8) bağıntısı uyarınca, devrenin çıkış direnci

$$R_O = K_{VO} \cdot R_I \quad (2.9)$$

ve çıkış kapasitesi de

$$C_O = \frac{1}{K_{VO} \cdot R_I \cdot \omega_c} \quad (2.10)$$

bağıntıları yardımıyla hesaplanabilir. Elde edilen sonuçların hem faz döndüren hem de faz döndürmeyen yapılar için geçerli olduğunu belirtmekte yarar vardır.

Örnek:

Akım kaynağı gerçekleştirmek üzere kullanılan işlemsel kuvvetlendiricinin açık çevrim kazancı $K_{VO} = 10^5$ ve 3 dB kesim frekansı da $f_c = 10$ Hz olsun. Devredeki R_1 direncinin değeri de 1 k Ω olarak verilsin. Bu durumda akım kaynağının çıkış direnci $R_O = 100$ M Ω ve çıkış kapasitesi de $C_O = 159$ pF olur. $f = 10$ kHz için akım kaynağının çıkış empedansının modülünün 100 k Ω değerine düşeceği kolayca görülebilir.

2.1.2. Bir ucu topraklanmış yükler için akım kaynağı devreleri

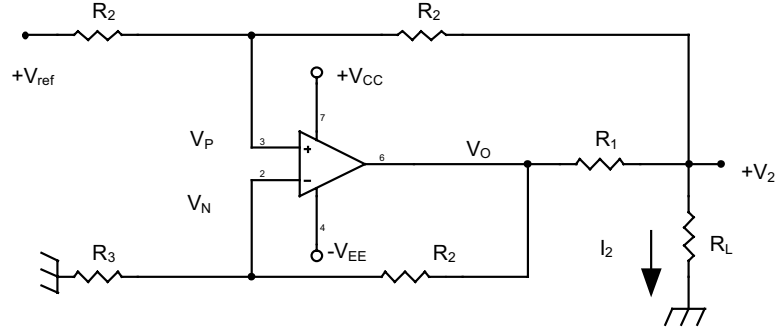
Şekil-2.1'de verilen devreler, iki ucu da toprak potansiyelinden yalıtılmış yüklerle kullanılmaya elverişli yapılardır. Bir çok endüstriyel devre uygulamasında ise bir ucu topraklanmış yükler söz konusu olur. Bu tür yüklerin sürülmesi için daha farklı devre yapılarına gereksinme duyulacağı açıktır. Bu özelliği gösteren çok sayıda devre yapısı bulunmaktadır. Bu bölümde, bir ucu topraklanmış yüklerin sürülmesi için kullanılacak akım kaynağı devrelerinden üçü ele alınarak incelenecektir.

Çıkış akımının bir direnç üzerindeki gerilim düşümü yardımıyla gözlenmesi ilkesine dayanarak çalışan bir akım kaynağı devresi Şekil-2.2'de verilmiştir. Bu yapı için devreden hareketle düğüm denklemleri yazılacak olursa

$$\begin{aligned} \frac{V_O - V_N}{R_2} - \frac{V_N}{R_3} &= 0 \\ \frac{V_{ref} - V_P}{R_2} + \frac{V_2 - V_P}{R_2} &= 0 \\ \frac{V_O - V_2}{R_1} + \frac{V_P - V_2}{R_2} - I_2 &= 0 \end{aligned}$$

elde edilir. $V_N = V_P$ olduğu kabul edilirse, devrenin çıkış akımı için

$$I_2 = \left(\frac{1}{2 \cdot R_2} + \frac{R_2 + R_3}{2 \cdot R_1 \cdot R_3} \right) V_{ref} + \left(\frac{R_2 + R_3}{2 R_1 \cdot R_3} - \frac{R_1 + 2 R_2}{2 R_1 R_2} \right) V_2 \quad (2.11)$$



Şekil-2.2. Tek ucu topraklanmış yüklerin sürülmesine elverişli akım kaynağı devresi.

bağıntısı bulunur. (2.11) bağıntısından fark edilebileceği gibi, R_3 direncinin belirli bir değeri için ikinci terim sıfır ve bunun sonucunda çıkış akımı çıkış geriliminden bağımsız olur. R_3 direncinin bu değeri

$$R_3 = \frac{R_2^2}{R_1 + R_2} \quad (2.12)$$

bağıntısıyla hesaplanabilir. Bu durumda devrenin çıkış akımı

$$I_2 = \frac{V_{ref}}{R_1 // R_2} \quad (2.13)$$

olur. Pratikte R_1 direnci R_2 direncinden yeteri kadar küçük tutulur. Bu şart altında akım kaynağının çıkış akımı

$$I_2 = \frac{V_{ref}}{R_1} \quad (2.14)$$

şeklinde belirlenebilir.

Bağlanacak yük direnci için sınır değerler

Akım kaynağı devresine bağlanacak yükün sınır değerleri, devreyi gerçekleştirmek amacıyla kullanılacak işlemsel kuvvetlendiricinin V_O çıkış geriliminin sınırları ile belirlidir. İşlemsel kuvvetlendiricinin çıkış gerilimi V_{CC} ve

$-V_{EE}$ besleme gerilimlerine ulaşamaz; ancak bu gerilimlere birer doyma gerilimi kadar yaklaşabilir.

Pozitif yöndeki doyma gerilimini V_{sat} , negatif yöndeki doyma gerilimini de V_{sat}' ile gösterelim. Böylece, işlemsel kuvvetlendiricinin çıkış geriliminin alabileceği maksimum ve minimum değerler

$$V_{omaks} = V_{CC} - V_{sat} \quad (2.15)$$

$$V_{omin} = -V_{EE} + V_{sat}' \quad (2.16)$$

bağıntıları yardımıyla hesaplanabilir. Öte yandan devrenin çıkış gerilimi yazılırsa

$$V_2 = V_O - I_2 \cdot R_1$$

bulunur. $V_{ref} = V > 0$ için $I_2 = V_{ref}/R_1 = V/R_1$ olur. Böylece

$$V_{2maks} = V_{Omaks} - I_2 \cdot R_1 = V_{Omaks} - V_{ref}$$

$$V_{2maks} = V_{CC} - V_{sat} - V \quad (2.17)$$

sınır değeri elde edilir. Buna göre, yükün uçlarındaki gerilimin değeri V_{2maks} değerinden küçük ya da en fazla bu sınır değere eşit olmalıdır. Elde edilen bu sınır değeri yardımıyla pozitif yön için yükün maksimum değeri hesaplanırsa

$$R_{Lmaks1} \cdot I_L = V_{2maks} = V_{Omaks} - V$$

$$R_L \leq \frac{V_{Omaks} - V_{ref}}{I_L} \quad (2.18)$$

şartı bulunur. Bu şart uyarınca, çıkışa olabildiğince büyük bir yük bağlayabilmek için $V_{ref} \ll V_{Omaks}$ seçilmelidir. Uygulamada, $V_{ref} = V$ referans kaynağı düşük değerli ve bir-iki volt mertebesinde seçilir; ayrıca $R_2 \gg R_1$ yapılır. Böylece işlemsel kuvvetlendiricinin ve V_{ref} gerilim kaynağının yüklenmesi önlenmiş olur.

$V_{ref} = -V < 0$ için $I_2 = -V/R_1$ olur. Bu durumda

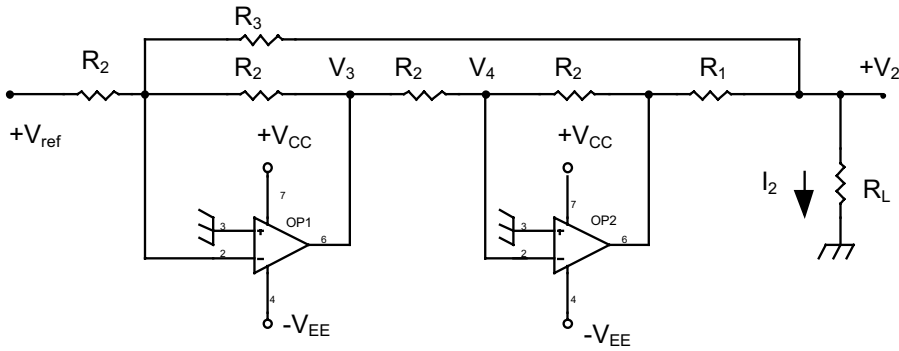
$$V_{2min} = V_{Omin} + V = -V_{EE} + V_{sat}' + V \quad (2.19)$$

sınır değeri elde edildiğinden, çıkışa bağlanabilecek maksimum yük

$$R_L \leq \frac{V_{2min}}{I_2} = \frac{V_{Omin} + V}{I_2} \quad (2.20)$$

bağıntısı yardımıyla hesaplanabilir.

Bir ucu topraklanmış yükler için akım kaynağı devreleri çeşitli biçimlerde kurulabilir. Bu yapılardan bir diğeri Şekil-2.3'de gösterilmiştir.



Şekil-2.3. Bir ucu topraklanmış yükler için diğeri bir akım kaynağı devresi.

Bu devreden hareket edilirse

$$V_4 = -V_3 = V_{ref} + \frac{R_2}{R_3} \cdot V_2$$

$$\frac{V_4 - V_2}{R_1} - \frac{V_2}{R_3} - I_2 = 0$$

bağıntıları yazılabilir. Bağıntılarda V_4 büyüklüğünün elimine edilmesiyle, I_2 çıkış akımı V_{ref} ve V_2 gerilimleri cinsinden ifade edilebilir. Bu yapırsa

$$I_2 = \frac{V_{ref}}{R_1} + \frac{R_2 - R_3 - R_1}{R_1 \cdot R_3} \cdot V_2$$

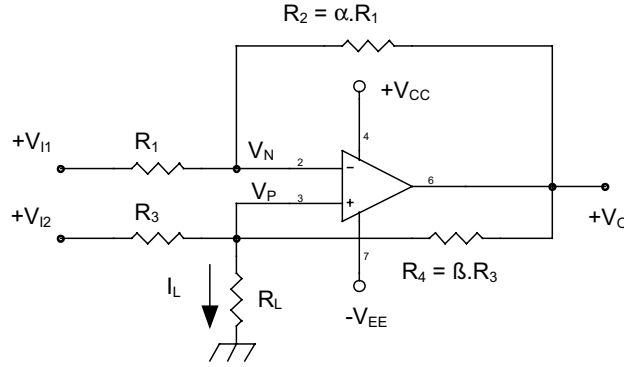
eşitliği elde edilir. $R_3 = R_2 - R_1$ alınırsa, bağıntıdaki ikinci terim sıfır ve çıkış akımı da çıkış geriliminden bağımsız olur. Böylece, çıkış akımı

$$I_2 = \frac{V_{ref}}{R_1} \quad (2.21)$$

şeklinde V_{ref} akımı ve R_1 direnci cinsinden belirlenebilir.

"Howland" akım kaynağı

Bir ucu topraklanmış yükler için kullanılacak bir diğer akım kaynağı yapısı da **Howland** akım kaynağı olarak isimlendirilen ve Şekil-2.4'de gösterilen akım kaynağı yapısıdır.



Şekil-2.4. Howland akım kaynağı devresi.

Bu devrede

$$V_N = \frac{V_{i1} \cdot R_2 + V_O \cdot R_1}{R_1 + R_2} = \frac{\alpha \cdot V_{i1} + V_O}{1 + \alpha}$$

$$I_L = I_3 + I_4 = \frac{V_{i2} - V_P}{R_3} + \frac{V_O - V_P}{\beta \cdot R_3}$$

yazılabilir. Öte yandan

$$V_O = K_V(s) \cdot (V_P - V_N)$$

$$V_P = I_L \cdot R_L$$

şeklinde. Bütün bunlar biraraya getirilecek olursa