

바이폴라 선형 트랜스컨덕터에 관한 연구

신 회중^{***}, 김 동용^{*}, 차 형우^{**}, 정 원섭^{*}

^{***}대원공과대학 전자계산과,

청주대학교 ^{*}반도체공학과, ^{**}전자·정보통신·반도체 공학부

^{***}390-230 제천시 신월동 산 22-8, ^{*}360-764 청주시 상당구 내덕동 36

A Study of Bipolar Linear Transconductor

Hee-Jong Shin^{***}, Dong-Yong Kim^{*}, Hyeong-Woo Cha^{**}, and Won-Sup Chung^{*}

^{***}Dept. of Electronic Computer Eng., Daewon College

Mt 22-8, Sinwoul-dong, Jechon-shi, 390-230, Tel : (0443) 649-3218

^{*}Dept. of Semiconductor Eng., ^{**}School of Electronic, Information & Communication,

Semiconductor Eng., Chongju Univ. 36, Naedok-dong, Sangdang-gu,

Chongju-shi, 360-764, Tel : (0431) 229-8441

Abstract

A novel bipolar circuit technique for realizing linear transconductor is described. The proposed circuit has superior linearity and temperature characteristics when compared with the conventional transconductor. The theory of operation is presented and computer simulation results are used to verify theoretical predictions. The simulation results show close agreement between predicted behaviours and experimental performances.

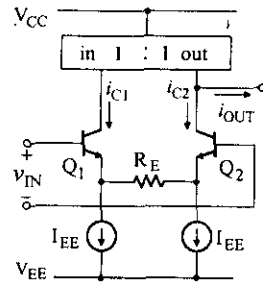


그림 1. 기본적인 바이폴라 선형 트랜스컨덕터의 블록도.

1. 서론

트랜스컨덕터(transconductor) 또는 차동 전압-전류 변환기(differential voltage-current converter)는 전압 입력 신호를 전류로 변환하는 것으로, 각종 아날로그 회로 및 시스템의 기본 빌딩 블록 회로로 사용되고 있다. 이 회로는 광대역 증폭기, 이득-조정 회로, 아날로그 승산기(multiplier), 그리고 연산 트랜스컨덕턴스 증폭기(operational transconductance amplifier: OTA)의 설계에 응용된다. 특히, 고정도의 아날로그 회로와 시스템에 응용하기 위해서는 트랜스컨덕터가 고정도의 선형성과 온도 특성을 갖고 있어야 한다.

기본적인 바이폴라 선형 트랜스컨덕터 회로를 그림 1에 나타냈다[1]. 이 회로는 기본적으로 이미터(emitter)에 디제너레이션(degeneration) 저항을 포함시킨 차동 증폭기이다. 통상의 차동 증폭기와는 달리, 이 회로는 대신 입력 전압을 거의 선형적으로 출력 전류로 변환시켜 준다. 이 회로의 기본적인 착상은 이미터에 바이어스 전류 I_{EE} 와 이미터 저항 R_E 와의 곱을 트랜지스터 열전압 V_T 보다 훨씬 크게 잡아줌으로써, 입력 전압이 R_E 저항에만 걸리게 하는 것이다. 이 회로의 v_{IN} 대 i_{OUT} 전달 특성은 다음과 같이 주어진다.

$$v_{IN} = \frac{1}{2} \left[R_E i_{OUT} + V_T \ln \left(\frac{1 + \frac{i_{OUT}}{I_{EE}}}{1 - \frac{i_{OUT}}{I_{EE}}} \right) \right] \quad (1)$$

만약, $|(i_{OUT}/I_{EE})| \ll 1$ 이면 그림 1의 트랜스컨덕턴스 $g_m = (i_{OUT}/v_{IN}) = [1/(R_E)]$ 가 얻어진다. 그러나, $|(i_{OUT}/I_{EE})|$ 의 비가 클수록 이 트랜스컨덕턴스는 더욱 비선형적이고 온도에 더욱 민감할 것이다.

이러한 문제점(비선형성과 온도 의존성)을 해결하기 위해, 최근에 개발된 회로를 그림 2에 나타냈다[2]-[3]. 이 회로는 그림 1에 나타낸 회로와 Q_3 , Q_4 , 그리고 2개의 정전류원으로 구성된다. 이 회로에 추가된 이미터-결합쌍 Q_3 과 Q_4 는 Q_1 과 Q_2 의 컬렉터 전류로 각각 바이어싱(biasing)되어 있다. 모든 트랜지스터가 정합되었다고 가정하면 입력 전압입과 4개의 베이스-이미터 접합(base-emitter junctions), 2개의 이미터 디제너레이션 저항으로 구성되는 루프(loop)에서 다음과 같은 식을 얻을 수 있다.

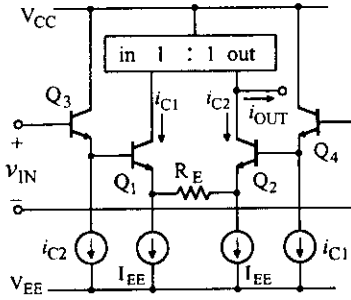


그림 2. 종래의 선형 트랜스컨덕터의 블록도.

$$\begin{aligned}
 v_{IN} = & V_T \ln \left(\frac{\alpha i_{C2}}{I_S} \right) + V_T \ln \left(\frac{i_{C1}}{I_S} \right) \\
 & + R_E (i_{C1} - i_{C2}) - V_T \ln \left(\frac{i_{C2}}{I_S} \right) \\
 & - V_T \ln \left(\frac{\alpha i_{C1}}{I_S} \right)
 \end{aligned} \quad (2)$$

여기서, α 는 공통-베이스 전류 이득(common-base current gain)이다. 일반적으로, $\alpha \approx 1$ 이므로 식 (2)를 정리하면

$$i_{OUT} = i_{C1} - i_{C2} = \frac{v_{IN}}{R_E} \quad (3)$$

이 된다. 이 전류를 전류 미러를 사용해 차동적으로 얻을 수 있으므로, 그림 2에 나타낸 회로의 트랜스컨덕턴스는 $1/R_E$ 가 될 것이다. 따라서 그림 2의 회로는 그림 1의 회로의 문제점인 트랜스컨덕턴스의 비선형성과 온도 의존성을 해결할 수 있었다. 그러나, Q_2 의 컬렉터 전류를 Q_3 의 바이어스 전류로 만들기 위해, pnp와 npn 트랜지스터로 구성된 전류 미러 2개가 필요하게 된다. 마찬가지로 Q_1 의 컬렉터 전류를 Q_4 의 바이어스 전류로 만들기 위해서도, 전류 미러 2개가 필요하게 된다. 따라서, 회로 구성이 복잡하고 고주파에서는 발진이 일어날 수 있다. 또한, 선형성과 온도 의존성이 4개의 전류 미러에 의해 결정된다고 할 수 있다.

본 연구에서는 그림 2에 나타낸 선형 트랜스컨덕터 회로의 문제점을 해결하기 위해 새로운 방안을 제시하고, 이 방안이 입각하여 선형 트랜스컨덕터를 설계한다. 설계한 회로에서는 국부 전류 귀환(local current feedback) 기법[4]을 사용하여 회로를 간략화하였고, 이에 따라 선형성과 온도특성을 향상시킬 수 있었다. 설계한 선형 트랜스컨덕터와 종래의 선형 트랜스컨덕터를 비교하여 검토함으로써, 본 연구에서 개발한 트랜스컨덕터 회로의 우수성을 입증한다.

II. 회로 구성 및 동작 원리

제한한 바이폴라 선형 트랜스컨덕터의 블록도를 그

림 3에 나타냈다. 이 회로는 그림 1에 나타낸 기본 선형 트랜스컨덕터와 Q_3, Q_4 , 그리고 2개의 정전류원으로 구성된다. 이 회로에 추가된 이미터 폴로워(emitter follower) Q_3 와 Q_4 는 Q_1 과 Q_2 의 컬렉터 전류가 각각 국부적으로 귀환되어 바이어싱(biasing)되어 있다[4]. 이 바이어스 전류에 의해, Q_3 과 Q_4 의 베이스-이미터 전압 v_{BE} 의 증가 또는 감소되는 양은 Q_1 과 Q_2 의 v_{BE} 의 증가 또는 감소되는 양과 동일할 것이다. 따라서, 입력전압 v_{IN} 은 이미터 디제너레이션 저항 R_E 의 양단에 걸리게 될 것이다. 모든 트랜지스터가 정합되었다고 가정하면 입력 전압원과 4개의 베이스-이미터 접합(base-emitter junctions), 2개의 이미터 디제너레이션 저항으로 구성되는 루프(loop)에서 다음과 같은 식을 얻을 수 있다.

$$\begin{aligned}
 -v_{IN} - v_{BE3} + v_{BE1} + R_E (i_{C1} - i_{C2}) \\
 - v_{BE2} + v_{BE4} = 0
 \end{aligned} \quad (4)$$

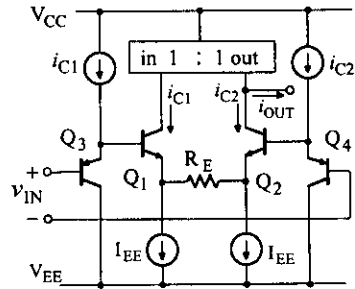


그림 3. 제한한 선형 트랜스컨덕터의 블록도.

위 식을 정리하면

$$\begin{aligned}
 v_{IN} = & -V_T \ln \left(\frac{\alpha i_{C1}}{I_S} \right) + V_T \ln \left(\frac{i_{C1}}{I_S} \right) \\
 & + R_E (i_{C1} - i_{C2}) - V_T \ln \left(\frac{i_{C2}}{I_S} \right) \\
 & + V_T \ln \left(\frac{\alpha i_{C2}}{I_S} \right)
 \end{aligned} \quad (5)$$

위 식의 우변항에서, 자연로그가 포함된 부분을 정리하면 다음과 같이 된다.

$$\begin{aligned}
 & V_T (-\ln \alpha i_{C1} + \ln I_S + \ln i_{C1} - \ln I_S) \\
 & + V_T (-\ln \alpha i_{C2} + \ln I_S + \ln i_{C2} - \ln I_S) \\
 = & V_T \left(\ln \frac{1}{\alpha} + \ln \alpha \right) = 0
 \end{aligned} \quad (6)$$

따라서, 그림 3의 출력 전류 i_{OUT} 는 다음과 같이 주어진다.

$$i_{OUT} = i_{C1} - i_{C2} = \frac{v_{IN}}{R_E} \quad (7)$$

이 전류를 전류 미러를 사용해 차동적으로 얻을 수 있으므로, 그림 3에 나타낸 회로의 트랜스컨덕턴스는 $1/R_E$ 가 될 것이다. 또한, 출력 전류식이 α 와 V_T 에 무관함을 알 수 있다. 더욱이, Q_3 와 Q_4 의 바이어스 전류 i_{C1} 과 i_{C2} 는 pnp 트랜지스터로 구성되는 1개의 전류 미러를 사용하여 실현할 수 있으므로 회로 구성이 간단해 질 수 있다.

그림 3의 회로 원리에 입각하여 설계한 선형 트랜스컨덕터의 완성된 회로도도 그림 4에 나타냈다. 트랜지스터 Q_{1A} 와 Q_{1B} , 그리고 Q_{2A} 와 Q_{2B} 는 각각 베이스-이미터 단자가 병렬로 연결되어 있기 때문에, 트랜지스터의 얼리 효과(Early effect)를 무시할 경우, $i_{C1A} = i_{C1B}$, 그리고 $i_{C2A} = i_{C2B}$ 가 된다. i_{C1A} 는 Q_5 와 Q_6 의 pnp 전류 미러에 의해 Q_3 의 바이어스 전류로 나타난다. 또한, i_{C2A} 는 Q_7 과 Q_8 의 pnp 전류 미러에 의해 Q_4 의 바이어스 전류로 나타난다. 따라서, 그림 3에 나타낸 선형 트랜스컨덕터의 동작을 하게된다.

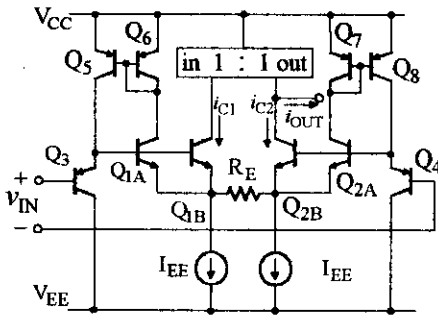


그림 4. 제안한 선형 트랜스컨덕터의 완성된 회로도.

입력 바이어스 전류, CMRR(common-mode rejection ratio), 주파수 특성, 입력 저항은 종래의 트랜스컨덕터와 동일할 것이다.

III. OTA에의 응용[3]

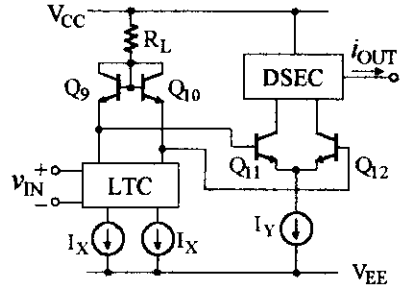
그림 4의 트랜스컨덕터를 기초로 설계한 연산 트랜스컨덕턴스 증폭기(operational transconductance amplifier:OTA)의 블록도를 그림 5에 나타냈다. 블록도는 입력 전압을 전류 출력으로 변환시키는 선형 트랜스컨덕터(linear transconductor:LTC), 차동 전류 입력을 차동 전류 출력으로 변환시키는 길버트 이득 셀(Gilbert gain cell), 그리고 차동 전류를 단일 전류 출력으로 변환시키는 차동 단일-출력 변환기(differential to single-ended converter:DSEC)로 구성된다. 길버트 이득 셀과 차동 단일-출력 변환기에 의해, 선형 입력 전압 v_{IN} 에 대한 출력 전류 i_{OUT} 는 다음과 같이 주어진다.

$$i_{OUT} = G_m v_{IN} \quad (8)$$

여기서

$$G_m = \frac{I_Y}{I_X} \frac{1}{R_E} \quad (9)$$

이다.



LTC : Linear TransConductor(선형 트랜스컨덕터)

DSEC : Differential to Single-Ended Converter

(차동-입력 단일-출력 변환기)

그림 5. 선형 트랜스컨덕터를 기초로 한 OTA.

식 (9)는 회로의 트랜스컨덕턴스 G_m 이 바이어스 전류 I_Y 에 의해 직접 제어된다는 것을 보여준다. 또한, 이 식으로부터 G_m 이 온도에 무관함을 알 수 있다.

IV. 시뮬레이션 결과 및 고찰

제안한 선형 트랜스컨덕터(그림 4)와 이를 기초로 설계한 OTA(그림 5)를 MicroSim PSpice에서 제공하는 트랜지스터 Q2N3906(pnp)와 Q2N3904(npn)를 사용하여 PSpice로 시뮬레이션(simulation)하였다. 회로에서 이미터 디제너레이션 저항 $R_E = 10 \text{ k}\Omega$, 바이어스 전류 $I_{EE} = 100 \mu\text{A}$, 그리고 공급기 전압 $V_{CC} = -V_{EE} = 5 \text{ V}$ 를 사용하였다. 입력 전압 범위는 $R_E I_{EE} = 10 \text{ k}\Omega \times 100 \mu\text{A} = 1 \text{ V}$ 로 설정했다. 본 연구에서 제안한 트랜스컨덕터의 성능을 확인하기 위하여, 종래의 트랜스컨덕터인 그림 2의 회로를 같은 실험 조건으로 시뮬레이션했다.

입력 전압 v_{IN} 에 대한 출력 전류 $i_{OUT} = i_{C1} - i_{C2}$ 의 상대 오차를 그림 6에 나타냈다. 이 그림에서 실선은 그림 3에 나타낸 종래의 선형 트랜스컨덕터에 대한

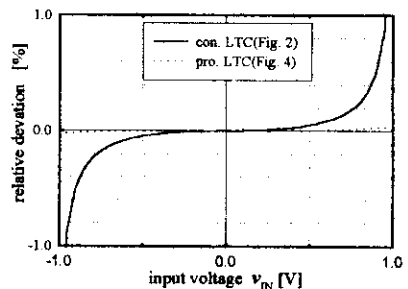


그림 6. 트랜스컨덕터의 전달 특성.

상대 오차이고, 점선은 본 연구에서 제안한 선형 트랜스컨덕터(그림 4)에 대한 결과이다. 그림으로부터 제안한 선형 트랜스컨덕터는 입력 전압의 진범위에서 상대 오차가 0.03 % 이하이며, 같은 오차에 대해서 선형 영역이 종래의 트랜스컨덕터의 선형 영역보다 1.6배 확장된 것을 알 수 있다.

그림 7은 25 °C를 기준으로 하여 -25 °C와 75 °C에 대한 출력 전류의 오프셋(offset)을 나타낸 것이다. 그림으로부터 제안한 선형 트랜스컨덕터가 종래의 그것보다 온도에 대해 약 5배 정도 덜 민감하다는 것을 알 수 있다. 여기서, 그림 7의 온도 특성들은 이미터 디제너레이션 저항 R_E 의 온도특성을 고려하지 않은 것들이다. 제안한 선형 트랜스컨덕터의 전력 소비는 3 mW이고, 종래의 선형 트랜스컨덕터의 전력 소비는 4 mW이다.

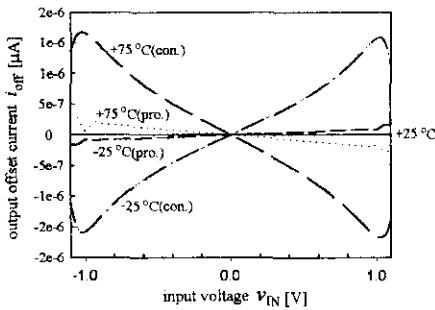


그림 7 트랜스컨덕터의 온도 특성.

제안한 선형 트랜스컨덕터를 기초로 설계한 OTA의 동작원리와 그 성능을 시뮬레이션했다. 그림 5의 OTA 회로에서 저항 $R_L = 10\text{ k}\Omega$, $I_X = 100\text{ }\mu\text{A}$, $v_{in} = 0.5\text{ V}$ 으로 각각 설정하였다. 또한, 출력단과 접지 사이에 부하저항 100 옴을 접속하였다. 그림 2와 4에 나타낸 트랜스컨덕터의 회로를 그림 5의 LTC 부분에 각각 적용하여, 제어 전류 I_Y 에 대한 트랜스컨덕터의 특성을 그림 8에 나타냈다. 여기서, conven-

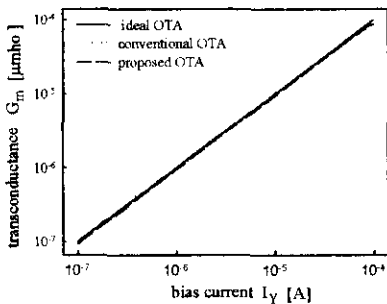


그림 8. OTA의 바이어스 전류 I_Y 에 대한 트랜스컨덕터의 특성

tional OTA는 그림 2의 선형 트랜스컨덕터를 사용한

OTA를, 그리고 proposed OTA는 그림 4의 선형 트랜스컨덕터를 사용한 OTA를 의미한다. 그림으로부터 두 회로의 특성이 동일하다는 것을 알 수 있다. 또한, 제어 전류의 범위가 3-디케이드(decade) 이상임을 알 수 있다.

그림 8과 같은 실험 조건에서 출력 전류 i_{OUT} 에 대한 주파수 특성을 그림 9에 나타냈다. 이 결과로부터 종래의 선형 트랜스컨덕터와 제안한 선형 트랜스컨덕터를 이용한 OTA의 주파수 특성이 동일하다는 것을 알 수 있다.

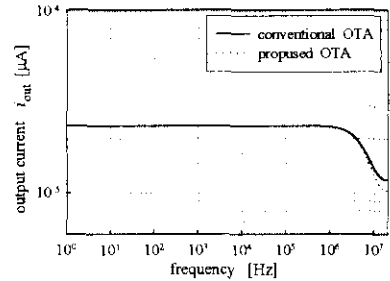


그림 9. OTA의 출력 전류 i_{OUT} 에 대한 주파수 특성.

IV. 결 론

새로운 구성의 선형 트랜스컨덕터를 제안하였고 컴퓨터 시뮬레이션을 통해 그 동작 원리를 확인하였다. 또한, 제안한 선형 트랜스컨덕터를 OTA에 응용하여, 제어 전류에 대한 트랜스컨덕터의 특성과 출력 전류의 주파수 특성을 확인하였다. 그 결과, 제안한 선형 트랜스컨덕터는 매우 우수한 선형성과 온도 특성을 갖고 있을 뿐만 아니라, 종래의 선형 트랜스컨덕터와 동일한 주파수 특성과 트랜스컨덕터 특성을 갖고 있다는 것을 알 수 있었다. 따라서, 제안한 바이폴라 선형 트랜스 컨덕터는 고성능의 OTA, 필터, 발전기, 멀티플라이어 등에 폭 넓게 이용될 것으로 기대된다.

참 고 문 헌

- [1] Gray, P. R., and Meyer, R. G, "Analysis and design of analog integrated circuits," Wiley, New York, 1984.
- [2] Won-Sup Chung and Hyeong-Woo Cha, "Bi-polar linear transconductor," *Electronics Letters*, vol. 26, pp. 619-620, May 1990.
- [3] W.-S. Chung, K.-H. Kim, and H.-W. Cha, "A linear operational transconductance amplifier for instrumentation applications," *IEEE Trans. Instrumentation and Measurement*, vol. IM-41, pp. 441-443, June 1992.
- [4] H.-W. Cha and K. Watamabe, "Wideband CMOS current conveyor," *Electronics Letters*, vol. 32, pp. 1245-1246, July 1996.