

에스컬레이터용 전력변환장치 효율 개선에 관한 연구

조수억[†]

A Study on Efficiency Improvement of Power Conversion System for Escalator

Su-Eog Cho[†]

Abstract

In the case of a motor system that converts electrical energy into mechanical energy, the region of the motor and that of the generator coexists. In the case of an escalator, the ascending escalator is operated by the motor, whereas the descending escalator is operated by the generator according to the load. To evaluate the proposed method, this study reduces the power of the ascending escalator up to approximately 35% by sharing the regeneration power of the descending escalator. The loss of transfer power nearly exists in the case of the proposed method. Furthermore, the lifetime of the DC link condenser can be extended because it is connected in parallel, thus leading to a twofold increase in capacity.

Key words: Efficiency improvement, Inverter, Escalator, Power conversion system, Motor, Generator

1. 서 론

전기에너지는 일상생활에 널리 쓰이고 있다. 그동안의 전기에너지의 대부분은 화석 에너지로 생산되고 있었다. 그러나 산업이 발전하면서 에너지의 소비가 급등하고 그로 인해 화석연료가 고갈되고 있으며, 대체원인 원자력발전소는 노후화나 자연재해로 인해 인류를 위협하는 요인이 존재 한다. 그래서 선진국들은 대체자원을 찾는 데 심혈을 기울이고 있다. 신재생에너지는 재생의 의미도 담고 있다. 본 논문에서 제안하는 알고리즘은 상승 운전 중인 에스컬레이터는 전동기로 동작하고, 하강 운전 중인 에스컬레이터의 경우는 승차인원에 따라 발전기로 동작된다. 하강운전중인 에스컬레이터의 회생전력을 상승 운전중인 에스컬레이터와 공유함으로써 에스컬레이터의 소비전력을 저감하여 에스컬레이터의 소비전력 최적화가 가능하다. 이를 실험을 통하여 신뢰성 및 효과를 확인하였다.

2. 본 론

에스컬레이터의 최대소비전력과 회생전력을 유도하기 위해서는 다음과 같은 과정을 거쳐야 한다. 에스컬레이터의 기계적 모델링을 통해 모터 용량, 탑승 인원 등을 계산하고, 에스컬레이터의 유도전동기의 수학적 모델링을 통해 모터용량 등을 구하여 서로 비교한 후, 기계적 모델링과 수학적 모델링을 이용하여, 상승 운전 에스컬레이터의 최대소비전력과 하강운전 에스컬레이터의 회생전력을 유도한다^{[1][2]}. 본 논문에서 제안하는 방식은 그림 1의 지하철 출입구의 에스컬레이터 시스템과 같이 상승 운전 중인 에스컬레이터 와 하강 운전 중인 에스컬레이터 시스템이 같이 있는 경우, 상승하는 에스컬레이터는 전동기로 동작하고, 하강 운전 중인 에스컬레이터의 경우 탑승 인원에 따라 발전기로 동작된다. 이 회생전력을 공유함으로써 에스컬레이터의 소비전력을 저감한다^{[3][6]}.

2.1 제안하는 에스컬레이터 링크 시스템의 원리

기존의 에스컬레이터는 상승운전과 하강운전으로 작동된다. 상승운전은 항상 전동기의 역할로 작동한다. 하지만 하강운전 에스컬레이터의 경우 부하에 따라 발전기로 동작 되고, 발전되는 회생전력을 그림 2에서와 같이 저항에서 소비하고 있다.

Paper number: TKPE-2016-21-6-9

Print ISSN: 1229-2214 Online ISSN: 2288-6281

[†] Corresponding author: secho@seoil.ac.kr, Dept. of Electrical Eng., Seoil University

Tel: +82-2-490-7240 Fax: +82-2-490-7803

Manuscript received Sep. 1, 2016; revised Sep. 12, 2016;

accepted Nov. 3, 2016

— 본 논문은 편집위원회에서 기술논문으로 추천됨



Fig. 1. Escalators with up and down direction in subway.

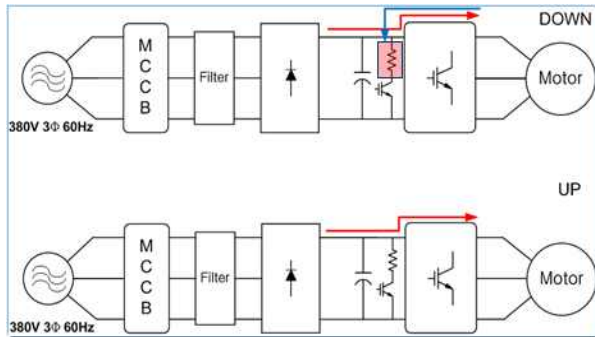


Fig. 2. Escalator system block diagram with up and down direction.

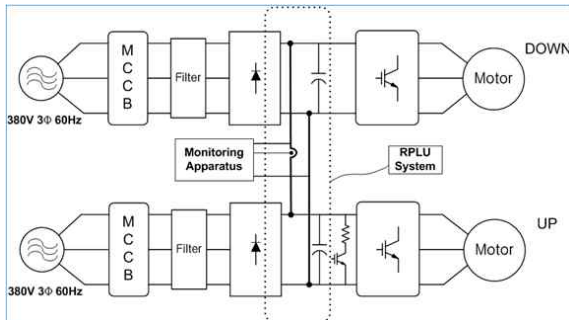


Fig. 3. Proposed escalator system block diagram with up and down direction.

그림 3은 본 논문에서 제안하는 회생전력 링크 시스템의 구성도이다. 기존 에스컬레이터에서 상승운전 에스컬레이터와 하강운전 에스컬레이터 인버터의 DC 링크를 연결하였다. 구동원리는 하강운전 에스컬레이터에서 발생하는 회생전력을 DC 링크를 통해서 상승 운전 에스컬레이터로 전송한다. 상승운전 정지 시에는 기존 에스컬레이터와 같이 회생저항을 통해 회생전력을 소비한다. 그러나 상승 운전과 하강 운전은 거의 동시에 구동하므로 회생저항에 소비될 확률은 거의 없다^{[3][6]}. 그림3의 RPLU System은 에스컬레이터에 회생전력 링크 시스템을 적용하였을 경우, 하강운전 에스컬레이터에서 상승운전 에스컬레이터로 넘어가는 회생 에너지 및 전류를 검출하여, 에스컬레이터 시스템에 문제가 발생 되었

을 때 문제 확인 및 시스템 정지를 위한 모니터링 장치이다. 모니터링 시스템은 DC 링크 전압과 전류를 검출하여 회생전력량, 회생전류, DC 링크전압을 실시간으로 모니터링하고, DC 링크 과전압 및 저전압과 회생전류의 과전류 시 보호동작을 수행하는 역할을 한다^[2].

2.2 에스컬레이터의 최소소비전력 및 회생전력 계산

에스컬레이터의 모델링을 통해 필요 모터 정격(P)을 계산하려면, 구동축 속도(N)와 구동축 토크(T)를 알아야 계산할 수 있다. 구동축 토크(T)의 경우 식 (1)과 같이 계산된다.

$$T = F \cdot \frac{D_s}{2} \cdot \frac{D_s}{D_m} \quad [kg \cdot m] \quad (1)$$

여기서, D_s : 스텝 체인 스프라켓의 지름, D_m : 메인 드라이브 체인 스프라켓의 지름, F : 구동축 스텝 체인 장력으로 식 (2)와 같이 구할 수 있다.

$$F = Q(\sin\theta + \mu\cos\theta) \quad [kg] \quad (2)$$

여기서, θ : 에스컬레이터의 기울기, μ : 스텝체인 휠과 트랙사이의 마찰계수이다.

전체 탑승 승객 (Q)은 식 (3) 과 같이 구할 수 있다.

$$Q = M \times P_s \times VS \quad [kg] \quad (3)$$

여기서, M : 탑승자의 몸무게, P_s : 스텝 당 탑승가능 인원, VS : 탑승 가능한 스텝의 수를 말한다.

구동축 속도(N)의 경우 식 (4)와 같이 계산된다.

$$N = \frac{V}{\pi \cdot D_s} \quad [RPM] \quad (4)$$

여기서 V : 에스컬레이터 속도.

식 (1) ~ (4)를 이용하여 필요 모터 정격(P)은 식 (5)와 같이 계산된다^[4].

$$P = \frac{N \times T}{974} \quad [kW] \quad (5)$$

표 1의 에스컬레이터 제원을 적용하여 계산하면, 전체 탑승 승객(Q)은 4,140[kg], 구동 축 토크(T)는 약 755[kg·m], 구동축 속도(N)은 13.973[RPM], 필요 모터 정격(P)은 10.8 [kW]로 계산된다. 에스컬레이터에 적용된 유도전동기 효율(η_M)이 0.8이고, 인버터의 효율(η_I)이 0.95이면 전체 효율(η)은 0.765이다.

TABLE I
SPECIFICATION PARAMETERS OF THE ESCALATOR

height [mm]	6957
width of escalator step[mm]	1200
transportation ability [persons/hour]	9000
speed [m/min]	30
angle of inclidation [°]	30
power supply	AC 3Φ 380[V] 60[Hz], AC 1Φ 220[V] 60[Hz]
SV0150-4NO, inverter[kW]	15

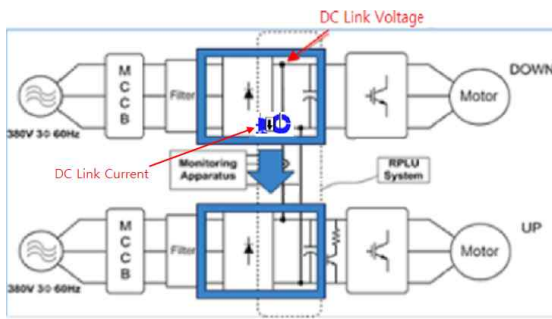


Fig. 4. Proposed escalator system block diagram with test point DC link voltage and DC link current.

$$P_m = P \div \eta \quad [kW] \quad (6)$$

$$P_{mr} = P \times (\eta \times \eta) \quad [kW] \quad (7)$$

그러므로, 최대소비전력(P_m)은 14.12[kW]로 계산되며, 에스컬레이터 하강운전시 발생하는 최대회생전력(P_{mr})은 6.32[kW]로 계산된다.

3. 실험

제안하는 방법을 검증하기 위하여, 표 1의 에스컬레이터 제원 현장에서 실험을 수행하였다. 기존 시스템 및 제안하는 에스컬레이터 회생전력 링크 시스템을 적용한 후 실험을 하였다.

DC 링크를 연결 하기전과 연결 후를 비교하여, 상승운전과 하강 운전의 전압과 전류를 측정하였다. 그림 5는 DC링크가 연결하기 전이며, 무 부하 구동을 하였을 때, 전압과 전류를 측정한 파형이다. ch1, ch2, ch3, ch4는 각각 상승운전 인버터 RS선간 입력 전압, 상승운전 인버터 ST선간 입력 전압, 상승운전 인버터 TR선간 입력 전압, 상승운전 인버터 T상전류이다. 여기서 전압은 약 370 ~ 375 [V]가 측정 되었고, 전류는 10.79 [A]가

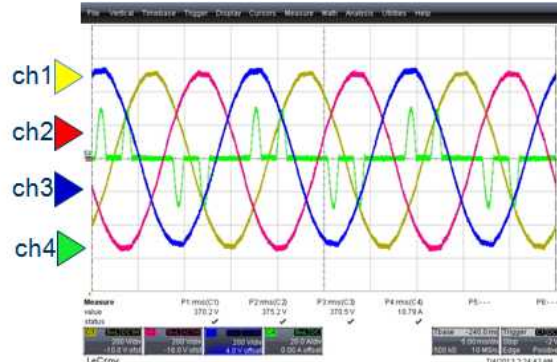


Fig. 5. Experimental wave forms of existing up directional escalator system in the no load condition.

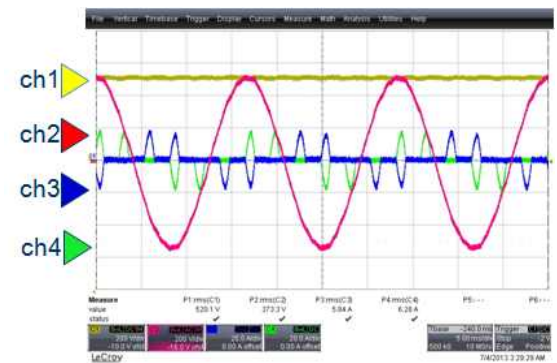


Fig. 6. Experimental wave forms of proposed method up and down directional escalators system in the no load condition.

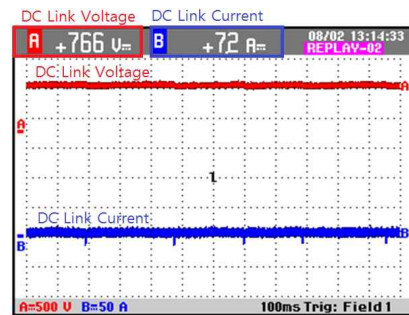


Fig. 7. Wave forms at 100% load of down escalator and 0% load of up escalator.

측정 되었다. 그림 6은 제안하는 회생전력 링크시스템을 적용 후이며, ch1은 DC링크 전압으로 약 520 [V]로 유지되었고, ch2는 하강운전시 S상 전류로 5.84 [A], ch3은 상승 운전시 R상 전류로 6.28 [A]이다. 이를 통해서 상승운전과 하강운전시의 인버터의 부하분배가 잘 이루어짐을 확인하였다. ch4는 ST선간 전압으로 373.3 [V]가 측정 되었다. 그림 7의 경우, 100% 부하 시 에스컬레이터 하강운전의 경우 DC 링크 전압: 766[V] 및 DC 링크 전류: 7.2[A] 를 측정하였다. 이 경우 회생 전력은 5.52[kW]이다. 하강운전의 경우, 80%, 100%에 대한 부하 실험을 시행하였고, 상승운전의 경우 0%, 100%

TABLE II
EXPERIMENTAL RESULTS OF REGENERATION
POWER ACCORDING TO THE LOAD OF ESCALATOR

LOAD (%)		VOLTAGE [V]	CURRENT [A]	POWER [kW]
DOWN ES	UP ES			
100	0	766	7.2	5.52
80	0	767	5.8	4.45

TABLE III
EXPERIMENTAL RESULTS OF POWER OF UP
ESCALATOR AT 100[%] LOAD

		voltage [V]	current[A]	power [kW]
measure- ment values	CH 1	368.71	31.96	5.59
	CH 2	367.30	31.89	5.58
	CH 3	368.52	31.80	5.56
sum of the power [kW]				16.7

의 부하 실험을 시행하였다. 부하에 따른 회생전력 전송량의 전압과 전류를 측정하여 표 2에 나타내었다. 하강운전부하: 80[%], 상승운전부하: 0[%]의 경우, 회생전력은 4.45[kW]로, 하강 부하의 감소비율(0.8) 과 비슷하다. 하강운전 부하에 따른 회생전력 전송 실험은 보이는 스텝의 수는 총 41개이며, 총 82명이 났을 경우를 100[%] 부하로 보고 측정하였다.

상승운전시, 100[%] 부하에서 최대소비전력을 측정하였다. 표 3과같이 최대 소비 전력은 16.7[kW]로 측정되었다.

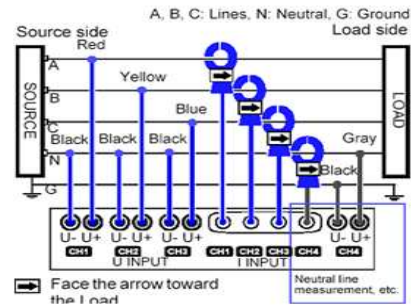
기존의 상승 및 하강용 에스컬레이터 시스템을 제안하는 방법으로 연결할 경우, DC링크의 콘덴서를 병렬로 하기 때문에 전해용량 및 정격 Ripple 전류는 2배로 증가되고 식[9]에서 전해 콘덴서의 예상수명을 연장할 수 있다. 전해 콘덴서 예상수명은 식[9]로 계산되어진다.

$$L = L_0 \times 2^{\left(\frac{T_{rated} - T_{application}}{10}\right)} \times 2^{\left(\frac{T_{ripple_rate} - T_{ripple_excess}}{T_{ripple_rate}}\right)} \quad (9)$$

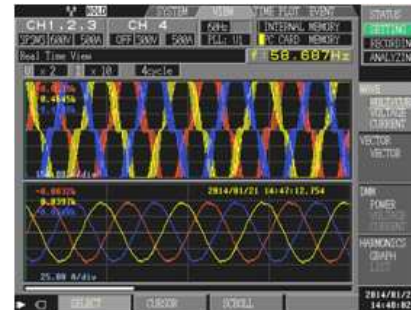
여기서, L :전해콘덴서 예상수명, L_0 :최대 사용온도에서 정격 Ripple전류 사용시 예상수명, T_{rated} : 최대 사용 온도, $T_{application}$:실사용온도, T_{ripple_rate} :정격 Ripple 전류 사용시 온도 변화분, T_{ripple_excess} :정격 Ripple 전류 초과 사용시 온도 변화분

4. 결 론

기존 에스컬레이터의 경우, 하강 운전용 에스컬레이터에서 발생하는 회생전력을 저항에서 소비한다. 하지만



(a) measurement circuit



(b) wave forms of voltages



(c) voltage and current of each phase



(d) power of each phase

Fig. 8. Measurement of 100[%] load of up escalator.

제안하는 회생전력 링크 시스템의 경우, 하강운전 에스컬레이터의 인버터에서 발생하는 회생전력을 상승 운전 에스컬레이터로 전송 하여, 최대 약 33[%]의 소비 전력을 저감하였다. 실험을 통하여, 하강운전 에스컬레이터의 부하가 100%인 경우 회생전력은 5.81[kW], 상승 운전시, 에스컬레이터의 최대소비전력은 16.7[kW]임을 확인 하였다. 제안하는 시스템의 신뢰성을 확보하기 위하

여, DC 링크 시스템을 공유한 시스템과 기존의 시스템을 비교하여, 상승 및 하강운전시 인버터의 부하분배가 잘 이루어짐을 확인하였다. 또한, 제안하는 방식의 경우 링크 케이블에서 발생하는 전송 손실 외에 다른 손실이 없으므로, 손실은 1[%] 미만이다. 기존의 상승 및 하강용 에스컬레이터 시스템을 제안하는 방법으로 연결할 경우, DC링크의 콘덴서를 병렬로 구성하기 때문에 용량 및 정격 Ripple 전류는 2배로 상승되어, 전해 콘덴서의 수명을 연장할 수 있다. 향후 제안하는 시스템의 신뢰성 향상을 위하여 DC 링크 전력 공유용 케이블이 길어지는 경우의 문제점 분석 및 대책에 대한 연구가 필요하다. 또한, DC 링크를 공유함으로써 발생하는 DC 링크 전압 방전 및 과전압 보호 대책에 대한 연구도 필요하다.



조수억(曹洙億)

1966년 9월 15일생. 1993년 부산대 전기공학과 졸업. 1993년 1월 LG산전 입사~2004년 11월 OTIS_LG Engineering Center Power Electronics팀 Senior Engineer. 2002년 8월 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 2005년 8월 동 대학원 전기공학과 졸업(공학박). 2005년 8월~2006년 2월 전남대 전기공학과 겸임교수. 2006년 3월부터 현재 서일대 전기과 부교수.

References

- [1] C. H. Jang, G. H. Lee, J. Y. Hur, D. W. Gang, G. M. Yoon, J. G. Shin, and J. P. Lee, "Inverter controller for escalator system," *Power Electronics Annual Conference*, pp. 291-294, July 1999.
- [2] S. O. Kim, J. Y. Park, S. K. Han, and S. E. Cho, "Regeneration power link system and monitoring apparatus for escalator," *Proceedings of KIIEE Annual Conference*, pp. 325-326, May 2014.
- [3] S. E. Cho, "Optimization of a escalator power conversion system with using photo voltaic," *Proceedings of KIIEE Annual Conference*, pp. 37-40, May 2011.
- [4] M. Y. H. Bangash and T. Bangash, "Lifts, elevators and moving walkways/travelators", Taylor&Francis, 2005.
- [5] S. Maniktala, "Switching power supply design & optimization," Mc Graw Hill, 2004.
- [6] S. E. Cho, Industry-Academic Cooperation of Seoil College, Samjung Elevator, "Escalator system and a power system interconnection linkage, which reduces power consumption by sharing DC links of a downstream escalator and an upturn escalator," Patent of Korea, Registration No. 1010704200000, Sep. 28 2011.