

동기화 운전을 통한 에너지 절약형 열차군 관리에 관한 연구

A Study on the Control a Group of Trains for Energy Saving by Synchronized Driving

김경민*

Kyung Min Kim

ABSTRACT

This paper describes an energy efficient train control. In these days, the researchers develop the energy efficient railway technologies, such as energy storage system, energy efficient driving. Mass rapid transit (MRT) railways, which are an important means of public transportation in urban areas, have operational characteristics that include short headways, frequent departures and arrivals. Therefore, when multiple trains are operating in the same power supply system, it is important to synchronize the energy tractions and regenerations. This paper define the group of trains for energy saving according to a power supply. We analyze the current synchronized driving situations and estimate the effect.

1. 서론

대도시의 주요 대중교통수단인 도시철도는 제동시 회생에너지를 생산한다. 현재 차량가속시의 역행에너지의 45% 정도가 회생에너지로 발생하는 것으로 알려져 있으며 이중 주변 열차와의 역행과 회생이 정합되어 회생에너지가 재사용되는 비율은 약 22~33%이며 나머지 55~66%는 전차선에서 열로 사라진다. 이와 같은 문제점을 해결하기 위하여 에너지저장시스템 등을 활용해 전차선에서 사라지는 에너지를 저장하여 재사용하는 연구가 상당히 진전되어왔으며 실용화 되었다. 하지만, 에너지저장시스템의 효과는 우리나라와 같이 운행노선의 운행 시격이 짧은 경우 한계가 있다. 본 연구에서는 전력공급 계통 단위별로 열차의 군을 설정하고, 설정된 열차군 들을 중심으로 현재 시각표에서의 역행제동 정합을 분석하였다. 또한, 동기화 운전을 통한 에너지 절약형 열차군 관리의 효과 및 방안을 제시하고자 한다.

2. 기존연구

열차의 회생에너지의 재사용을 최대화하는 다양한 연구가 진행되어 왔다. 에너지저장장치를 통한 연구로 이한민 et. al.[1]은 에너지저장장치 설치시의 운행 시격별 전력시물레이션을 수행하여 이를 서울메트로에 도입 시 평균 에너지 절감율 16%에 설치 투자비 회수기간이 약 4년 정도 소요됨을 계산하였다. 또한 다른 연구 [2]에서는 이러한 에너지저장시스템의 설치 우선순위를 산정하는 연구를 수행하였다. 김동희 [3]는 이와 같은 에너지 저장장치를 정치용 및 탐재용으로 활용할 경우 다수 열차의 실제 운행상황에서 에너지 효율성을 실험적 방법으로 추정/제시하고, 저장장치 도입시 그 효과를 극대화하기 위한 관련 향후 연구방향을 제시하였다.

* 한국철도기술연구원 철도교통물류연구실
E-mail : kmkim@krii.re.kr (김경민)
TEL : (031)460-5491 FAX : (031)460-5499

본 연구와 같이 동기화운행을 통한 에너지 절감 방안에 대한 연구로는 Albrecht et. al.[4]은 역간 이동시간의 여유시간을 이용하여 최대에너지 소모는 분산시키고 열차들의 제동과 역행은 동기화 시켜 회생에너지사용을 극대화하는 연구를 하였고 역간 이동시간을 최적 제어하는 유전자 알고리즘(Genetic Algorithm)을 제안하였다. Gordon et. al.[5]은 에너지소모를 감소시키는 열차 운영에 대한 몇 가지 전략을 제시하였다. 특히, 타행 및 열차의 정차시간 및 출발시간을 조정(Coordination)을 통한 방법을 제시하였다. 그러나, 다른 열차의 회생에너지 수급을 위하여 정차시간을 늘려 계획 출발시간 이후에 출발하게 되는 등의 수송력을 감소시킬 수 있는 한계를 가지고 있다. 김경민 et. al[5]은 도시철도 시스템에서 동일시간에 동력운전하는 열차수를 최소화하여 전기에너지소모의 최대치를 최소화하는 열차동력운전 분산 열차 시각표 작성에 대한 수리적 해법을 제시하였고 실제 열차시각표에 적용하여 동시 동력운전 열차수를 25% 감소시켰다.

3. 동기화 기반 열차군 관리

3.1 정의

본 연구에서는 열차군을 동일 전력계통 단위에서 운행하는 열차들의 집합으로 정의한다. 일반적으로 지하철의 전력공급 프로세스는 한전변전소에서 지하철변전소로 지하철변전소에서는 각 역사로 전기를 공급하고 있다. 이때, 하나의 지하철변전소에서는 하나의 역만을 담당하는 것이 아니라 Fig. 1과 같이 다수의 역을 포함하고 있으며 이를 동일 전력계통이라고 한다.

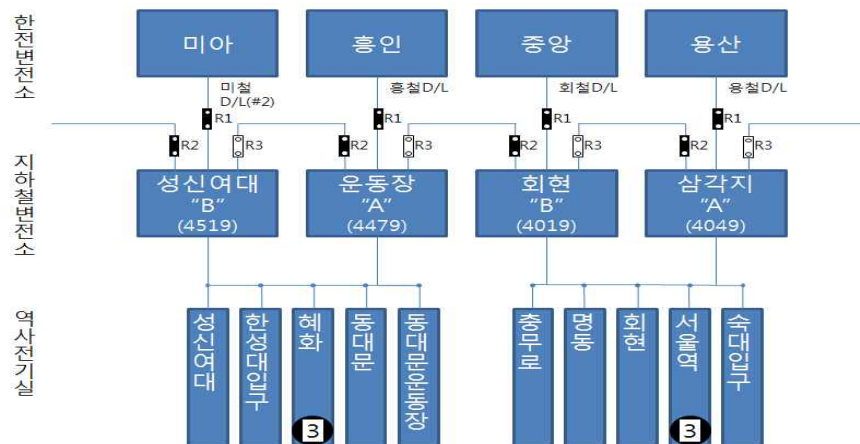


Fig. 1. Diagram of electricity distribution

또한, 전력계통에 따라 주변열차와의 역행과 회생이 정합되어 회생에너지가 재사용되는 것은 동일 전력계통상의 열차들로 한정된다. 따라서, Fig. 2와 같이 8개의 역이 2개의 전력계통으로 구성될 때, 열차군 1에는 5개 열차, 열차군 2에는 4개 열차가 포함되며 제동시 발생하는 회생에너지는 같은 열차군내의 다른 역행열차에만 활용된다. 통상적으로 회생전력 발생 위치에서 멀어질수록 손실이 발생되며, 3km 가 넘으면 의미가 없다고 알려져 있는데 이는 보통의 열차군 하나의 물리적 범위가 2~4km이기 때문이다. 그리고 각 열차군에 포함되는 열차는 운행에 따라서 시시각각 변하게 된다.

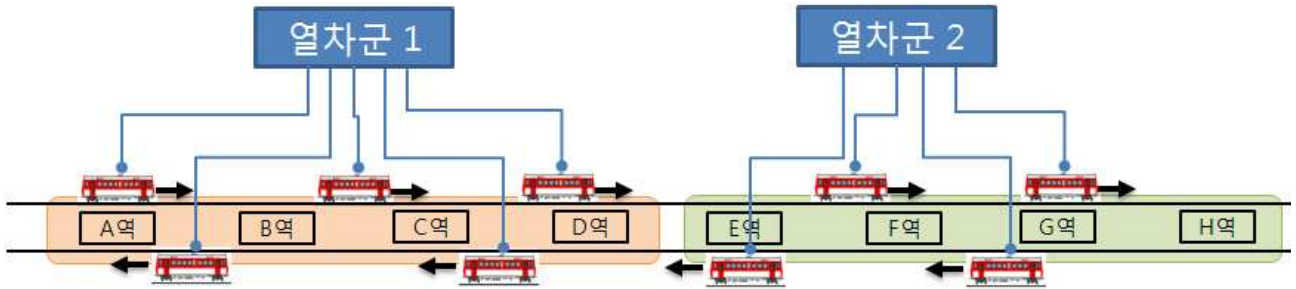


Fig. 2. Concept of the group of trains

3.2 열차군 동기화 분석

본 연구에서 제시하는 에너지 효율화 방안은 동일 열차군에 속하는 열차들의 역행운행과 제동운행을 최대한 동기화 시켜 회생에너지의 사용률을 높이는 것이다. 따라서, 각 열차의 전력시뮬레이션 결과와 시각표를 바탕으로 현재의 열차군 관리 상황을 분석하였다.

각 열차의 전력시뮬레이션은 전력분석 열차성능평가 시뮬레이션(TPS)결과를 사용하였다. 전력분석 열차성능평가 시뮬레이션은 Fig. 3과 같이 열차가 역과 역 사이를 운행할 때 시간의 경과됨에 따라 변화하는 속도, 거리 및 에너지 소모량을 계산한다. 이때, 일반적으로 열차의 상태를 3가지로 구분하는데 첫 번째로 에너지소모량이 급격하게 발생하는 역행운행(Accelerating) 두 번째로 에너지소모가 거의 없거나 작게 발생하는 타행운행(Coasting) 마지막으로 회생에너지를 배출하는 제동운행(Braking)으로 구분한다.

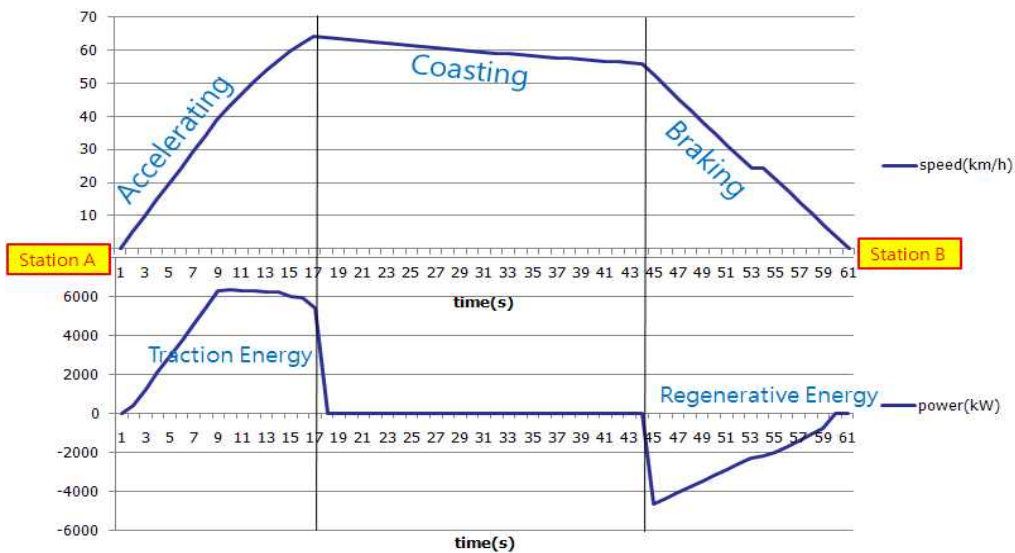


Fig. 3. Sample results of TPS

그 다음으로 열차 운행에 따른 에너지소모를 시간에 따라 나타내고 열차시각표를 바탕으로 열차 위치에 따라서 각 시간에서의 열차가 속한 열차군 및 에너지 소모량을 분석한다. 예를 들어, Table 1과 같이 역A를 5:33:00에 출발하여 역P에 6:04:00에 도착하는 시각표를 가진 열차가 있고 역 A ~ 역 F가 열차군 1, 역 G ~ 역 K가 열차군 2, 역 L ~ 역 P가 열차군 3으로 설정되어 있다면 전력시뮬레이션 결과 각 시간에서의 에너지소모 및 해당 열차군을 Table 2와 같이 계산할 수 있다. 이와 동일한 방법으로 다중 열차를 대상으로 각 시간에서의 열차군별 에너지소모 상황을 분석한다.

역	열차군	열차
A	1군	5:33:00
		5:34:30
B		5:35:00
C		5:37:30
		5:38:00
D		5:41:00
		5:41:30
E		5:43:00
		5:43:30
F		5:44:30
	5:45:00	
G	2군	5:46:30
		5:47:00
H		5:48:30
		5:49:00
I		5:50:30
		5:51:00
J		5:52:00
		5:52:30
K		5:53:30
		5:54:00
L	3군	5:56:00
		5:56:30
M		5:57:30
		5:58:00
N		6:00:00
		6:00:30
O		6:02:00
		6:02:30
P		6:04:00

Table. 1. Sample timetable

시간	열차군	에너지소모
5:33:00	1군	64406
5:33:15		11079
5:33:30		0
5:33:45		0
5:34:00		-4925
5:34:15		-35156
***		***
5:45:45		-1755
5:46:00		0
5:46:15		0
5:46:30	2군	62993
5:46:45		23452
5:47:00		0
5:47:15		0
5:47:30		-6003
5:47:45		-13729
5:48:00		0
***		***
5:54:15		-3735
5:54:30		24.5
5:54:45	0	
5:55:00	-10809	
5:55:15	-38481	
5:55:30	0	
5:55:45	0	
5:56:00	3군	64620
5:56:15		5610.9
5:56:30		-16969
5:56:45		-25064
5:57:00		0
***		***

Table. 2. Energy consumption from Table 1

4. 실험분석

4.1 Case Study

30초목으로 작성된 수도권 지하철 한 노선의 오전 6시부터 익일 1시까지 총 516개 열차, 23개역을 대상으로 시간별 열차군 에너지 소모를 시뮬레이션을 통하여 분석하였다. 전력계통도에 따라 23개역을 총 4개의 열차군으로 나누었으며(열차군 1 : 6개역, 열차군 2 : 5개역, 열차군 3 : 5개역, 열차군 4 : 9개역) 시간적 범위는 침두시간(7시30분 ~ 8시30분)과 비침두시간(14시 ~ 15시)으로 구분하였다. ‘열차수’행은 특정시간에 열차군내에 운행중인 열차수를 의미하며 ‘회생에너지율’은 회생에너지를 역행에너지로 나눈값으로 역행과 회생사이의 에너지소모량을 비교하기 위한 지표이다. ‘재사용률’은 재사용에너지를 회생에너지로 나눈값이다. 이는 회생에너지 중 다른 열차가 재사용하는량을 비교하기 위한 지표이다. 본 연구에서는 ‘평균’, ‘역행최대(역행에너지 최대발생)’, ‘회생최대(회생에너지 최대발생)’ 시점에서 위의 지표들을 계산하였다.

Table. 3. Energy consumption of group of trains on peak time

첨두시간		평균	역행최대	회생최대
열차군 1	열차수	8.1	9	10
	역행에너지(kW)	92530.4	308549.4	104860.3
	회생에너지(kW)	-38720.1	-1143.1	-137111.7
	회생에너지율	41.85%	0.37%	130.76%
	재사용에너지(kW)	25277.2	1143.1	104860.3
	재사용율	65%	100%	76%
열차군 2	열차수	4.5	6	5
	역행에너지(kW)	65936.3	254791.5	0
	회생에너지(kW)	-31222.8	0	-124648.1
	회생에너지율	47.35%	0%	-
	재사용에너지(kW)	16934.3	0	0
	재사용율	54%	-	0%
열차군 3	열차수	5.2	8	8
	역행에너지(kW)	66947.4	323751.7	0
	회생에너지(kW)	-30958.6	0	-121170.3
	회생에너지율	46.24%	0%	-
	재사용에너지(kW)	21909.9	0	0
	재사용율	71%	-	0%
열차군 4	열차수	8.3	11	11
	역행에너지(kW)	91518.0	386619.2	191064.3
	회생에너지(kW)	-37638.5	-5584.7	-118055.4
	회생에너지율	41.13%	1.44%	61.79%
	재사용에너지(kW)	26517.8	5584.7	118055.4
	재사용율	70%	100%	100%

실험결과 첨두시간에서 평균 회생에너지 생성율은 전체 역행에너지의 약 44%로 기존연구결과와 유사하였으며 평균 재사용율은 회생에너지 중 65%로 일반적으로 알려진 30%보다 높았다. 이와 같은 차이는 본 연구에서 사용한 시뮬레이션의 두 가지 가정 때문으로 보인다. 첫 번째는 열차가 주어진 시각표를 준수하여 운행한다는 것이고 두 번째는 회생과 역행 정합시 회생에너지가 전차선에서의 에너지 소모 없이 다른 열차에 100%로 사용될 수 있다는 것이다. 역행에너지가 최대인 경우에는 회생에너지가 평균에 훨씬 못미치는 약 0.45% 생성되어 에너지 정합에 의한 효과를 전혀 보지 못하고 있었다. 반대로 회생에너지가 최대로 발생하는 경우에는 역행열차가 없어 재사용을 거의 하지 못하고 있음을 확인하였다.

비첨두시간에서 평균 회생에너지 생성율은 전체 역행에너지의 약 43%로 첨두시간과 유사하였으며 평균 재사용율은 회생에너지 중 56%로 첨두시간 보다 낮았는데 이는 열차군내 평균 열차수가 비첨두시간에서는 첨두시간에 비해 낮아 정합효과를 보기 어렵기 때문으로 분석된다. 하지만, 역행 및 회생 최대시에 에너지 정합에 의한 효과는 첨두시간보다 높게 나타났다.

Table. 4. Energy consumption of group of trains on non-peak time

비첨두시간		평균	역행최대	회생최대
열차군 1	열차수	4.3	5	6
	역행에너지(kW)	48997.6	192366.2	87938.6
	회생에너지(kW)	-20840.0	-21008.5	-99141.7
	회생에너지율	42.53%	10.92%	112.74%
	재사용에너지(kW)	11976.6	21008.5	87938.6
	재사용율	57%	100%	89%
열차군 2	열차수	2.4	3	3
	역행에너지(kW)	35400.4	190498.4	0
	회생에너지(kW)	-16389.7	0	-55582.5
	회생에너지율	46.30%	0%	-
	재사용에너지(kW)	5992.4	0	0
	재사용율	37%	-	0%
열차군 3	열차수	2.8	4	4
	역행에너지(kW)	36824.0	129621	129621
	회생에너지(kW)	-16705.8	-56245	-56245
	회생에너지율	45.37%	43.39%	43.39%
	재사용에너지(kW)	10622.9	56245	56245
	재사용율	64%	100%	100%
열차군 4	열차수	4.9	5	5
	역행에너지(kW)	54039.5	192893.9	64773.1
	회생에너지(kW)	-22287.0	0	-68374
	회생에너지율	41.24%	0%	105.56%
	재사용에너지(kW)	14981.5	0	64773.1
	재사용율	67%	-	95%

4.2 기대효과 및 열차군 관리 방안

실제 시각표 분석을 통하여 동기화 기반 열차군 관리의 효과를 추정하면 현재 동기화 운전으로 인한 재사용율은 이상적으로 65%이며 역행에너지의 45% 정도가 회생에너지로 발생되고 실제 재사용율이 22%~33%임으로 이상적 재사용율을 100% 달성시 실제 재사용율은 33%~50%까지 증가될 수 있을 것이라 추정되어진다. 일반적으로 에너지저장장치로 인한 에너지 절감효과가 16%정도로 나타나므로 이를 동기화 운전과 병행한다면 회생에너지 중 최대 85%까지 재사용이 가능할 것으로 분석된다. 또한, 역행에너지가 최고로 발생하는 시점에서의 회생에너지 재사용율은 현저히 낮은 상황임으로 이를 평균 재사용율까지 높이면 최대 피크에너지를 낮출수 있을 것이다.

본 연구에서는 동기화 기반 열차군 관리를 위하여 두 가지 방안을 제시한다. 첫 번째로는 시각표 작성시 회생 에너지 사용율을 최대가 되도록 에너지 효율적 열차시각표(Energy Efficient Timetable)를 작성하는 것이다. 이와 같은 방법은 저밀도 운행구간 및 향후 시각표를 준수하며 자동 운전하는 경우 효과적일 것이다. 두 번째로 고밀도 운행구간에서 실시간 열차위치 및 속도를 기반으로 하여 열차군의 제동/기동 명령을 발생하는 On-line 열차군관리 시스템을 개발하는 것이다.

5. 결론 및 향후 연구과제

본 연구에서는 전력공급 계통 단위별로 설정된 역군을 중심으로 현재 시각표에서의 역행제동 정합을 분석하였다. 분석 결과 시뮬레이션을 통한 에너지 정합에 의한 회생에너지 재사용율은 현실과 차이가 크게 나타났다. 따라서, 이와 같은 차이가 발생하는 것이 운영상의 문제인지 하드웨어적인 한계인지에 대한 분석이 필요하다. 또한, 동기화 운전을 통한 에너지 절약형 열차군 관리의 효과 및 방안을 제시하

였다. 이와 같은 에너지 동기화의 노력은 최근 확대되고 있는 각 지방자치단체의 도시철도 운영기관의 운영비용 절감에 활용될 수 있을 것이다. 또한, 향후 에너지 절약형 열차시각표 작성에 대한 수리적 모형 및 알고리즘을 개발하는 연구와 고밀도 구간에서의 실시간 동기화 열차제어 연구가 필요하다.

참고 문헌

- [1] 이한민, 김길동, 안천현, 장길수, 권세혁, 전기철도시스템에 에너지저장시스템 적용 해석에 관한 연구, 대한전기학회 전력기술부문회 추계학술대회 논문집(2009)
- [2] 안천현, 이한민, 김길동, 이희성, 에너지저장시스템 설치 우선순위에 관한 연구, 한국철도학회 추계학술대회 논문집(2009)
- [3] 김동희, 동기화운전을 통한 철도 녹색운행 방안 연구, 한국철도학회 추계학술대회 논문집(2009)
- [4] T. Albrecht, Reducing power peaks and energy consumption in rail transit systems by simultaneous train running time control, Computers in Railways IX(2004)
- [5] S.P. Gordon, D.G. Lehrer, Coordinated Train Control And Energy Management Control Strategies, Railroad Conference(1998)