

Global Report

도시 전기운송 네트워크에서 도로용량 손실영향의 정량화: 최적화 기반 접근법

1. 서론
2. 운행시간에 대한 TN의 취약성
3. PDN 운용비용의 취약성
4. 결론

1. 서론

전기자동차(EVs : Electric vehicles)는 온실가스(GHG : Green-House Gases) 배출량을 줄이고, 대도시 지역의 공기의 질을 향상시키는 데 있어 주목할 만한 혜택을 제공하고 있다. 이에 전기택시(electric taxi) (Wang 등, 2016), 전기버스(electric buses) (Kühne, 2010)와 함께 도시 도로교통의 유망한 대안으로 부각되고 있다.(Du 등, 2013) 전기자동차와 전기차 충전 스테이션의 숫자는 지난 몇 년 동안 획기적으로 증가했다. (Lopes 등, 2011; Abousleiman & Scholer, 2015; Li & Huang, 2015) 운송수단의 충전(electrification)은 교통 분야와 전기 부문 간에 상호 의존도가 매우 높은 산업이다.(Galus 등, 2012; Xiong 등, 2015) 왜냐하면 교통 네트워크(TN : Transportation Network)의 혼잡 패턴이 전기자동차의 경로 선택에 영향을 미칠 수 있기 때문이다. 이는 트래픽 흐름의 공간 및 시간적 분포에 영향을 미치게 된다. 따라서 충전/교환 스테이션에서 전력은 PDN(Power Distribution Network : 전원 분배 네트워크)을 운영하는 데 있어 전력수요에 중대한 영향을 미치게 된다. 이러한 상호작용은 ETN(Electrified Transportation Network)의 성능을 검증하기 위한 시스템적 방법론(systematic methodologies)에 대한 긴급한 수요를 창출하고 있다. 이 연구에서는 TN-PDN 결합 인프라의 관리에 대한 연구와 교통시스템의 취약성 분석 사이의 격차를 분석하고자 한다. 분석방법은 다음과 같다.

- 교통사고 위험이 가장 높은 교통링크를 검증하기 위한 이러한 정밀한 수학적 공식은 TN(TN의 취약점 및 TNV의 단점)에서 차량의 총 운행시간 또는 PDN(PDN의 취약점 및 PDN의 단점)의 생산비용의 저하를 가져올 수 있다. 제안된 모델에서 가상 공격자는 자신의 예산에 따라 네트워크 비용을 극대화할 수 있는 대상 링크의 조합을 찾게 된다. 트래픽 흐름 패턴은 운행 중인 차량이 일반적으로 경로를 변경하여 운행시간을 줄일 수 있는 Wardrop UE(user equilibrium : 사용자 평형) 원리(Wardrop, 1952)에 의해 결정된다.
- TNV 및 PDNV 문제를 해결하기 위한 계산적 방법론과 UE 조건에 따른 TNV 수익률 NPCC(Nonlinear Programming problem with Complementarity Constraints : 상호보완적인 제약조건)이 있는 비선형 프로그래밍 문제)에 대한 이론은 다양한 하위-최적화 알고리즘(Lawphongpanich & Yin, 2010)에 성공적으로 적용되었다.(He 등, 2016; He 등, 2013) 해결방법은 더 약한 최적화조건(He 등 2016)을 만족시키는 점을 찾아내어 이를 최적화하는 것이다.

2. 운행시간에 대한 TN의 취약성

2.1. 수학적 공식

교통사고 위험이 높은 교통링크는 전체 차량의 운행시간에 중대한 영향을 미칠 것이다. 제안 모델에서 이러한 취약성은 2단계 프로세스를 거쳐 가상실험 된다. 가상 공격자는 지정된 예산에 따라 대상 링크의 조합을 찾게 된다. 그런 다음 교란된 TN의 교통흐름 공격에 대한 응답으로 UE를 형성한다. 이때 공격자는 취약한 링크의 핵심 조합을 식별하기 위해 시스템에 대한 최대 총 운행시간을 식 (1)과 같이 계산할 수 있다.

$$\begin{aligned}
 & \max \sum_{a \in T_A} x_a t_a^c \\
 & s.t. \Delta c \in C_B \\
 & \text{TAP-KKT}
 \end{aligned} \quad (1)$$

여기서 결정변수(x_a , t_{ac} , ΔC_a , $\Delta C = \{\Delta C_a\}$, ΔA)들은 공격 전략을 의미한다. TAP-KKT는 공격 후 TN에 대한 변형된 Wardrop UE의 조건을 나타내며, 이는 해결하기 어려운 NPCC 이다. 가장 심각한 공격대응력이 취약한 링크를 찾기 위해 최적의 솔루션을 찾고자 한다.

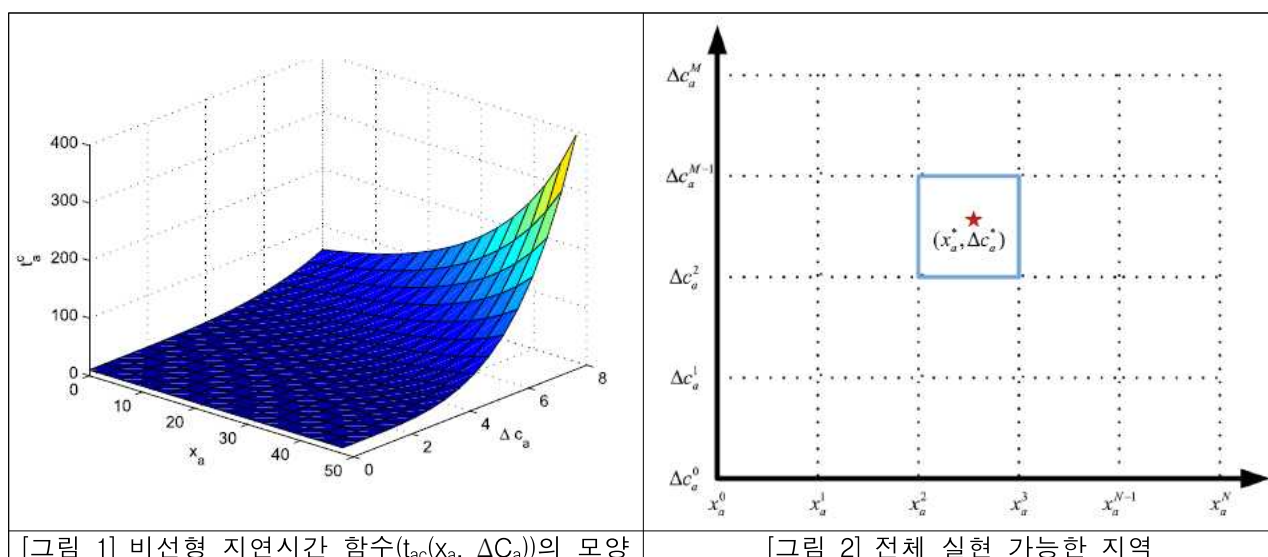
2.2. MILP 재조합

현재의 MILP(Mixed Integer Linear Programming) 재조합 방법에는 다음과 같은 3종류의 비선형 방식이 있으며, 이는 최적의 솔루션을 효율적으로 계산할 수 있는 방법을 제시한다:

- 비선형 방식의 목표는 쌍 변형 함수(bilinear function) x_a 와 t_{ac} 에 대한 해법을 찾는 것이다.(Misener & Floudas, 2010)
- TAP-KKT에서 상호보완성(complementarity) 제약조건을 찾는 것이다.(Vielma 등, 2010)
- 비 변량 비선형 지연함수 $t_{ac}(x_a, \Delta C_a)$ 에 대한 해법을 찾는 것이다.(Vielma & Nemhauser, 2011)

■ 대기시간 기능의 선형화

MILP 재조합 방법(Misener & Floudas, 2010; Vielma 등, 2010; Vielma & Nemhauser, 2011)에서 우리는 비선형 지연시간 함수($t_{ac}(x_a, \Delta C_a)$)와, 브레이크 포인트의 수를 기준으로 한 바이너리 변수 및 제약에 대한 로그 수를 사용하여 PWL(Piece Wise Linear) 근사치를 계산한다. 비선형 지연시간 함수($t_{ac}(x_a, \Delta C_a)$)의 전형적인 모양을 [그림 1]에 나타낸다. [그림 2]는 전체 실현 가능한 지역을 나타내며, 이는 $M \times N$ 으로 분할된 하위 사각형($M+N+2$)과 브레이크 포인트(x_{na} , $n=0, 1, 2, \dots, N$ and ΔC_{ma} , $m=0, 1, 2, \dots, M$)를 갖는다. 파라미터 λ 를 통해 격자점에 연결된다.



[그림 1] 비선형 지연시간 함수($t_{ac}(x_a, \Delta C_a)$)의 모양

[그림 2] 전체 실현 가능한 지역

* 자료 : Wei Wei, Jianhui Wang, Lei Wud, "Quantifying the impact of road capacity loss on urban

electrified transportation networks: An optimization based approach“, International Journal of Transportation Science and Technology (2017), p.9.

3. PDN 운용비용의 취약성

3.1. 수학적 정립

전술한바와 같이, 트래픽 흐름 패턴은 전력 부하의 공간적 분포에 영향을 미치며, 아울러 PDN에서 최적의 전력흐름을 좌우하는 요인이 된다. 따라서 PDN은 기술적 제약조건에 따라 운영되어야 한다. 과전압과 같은 일부 제약조건을 충족하지 못하면 불안정성의 위험을 초래할 수 있어 커다란 불이익을 받게 된다. PDN 프레임워크에서 연결성의 저하는 PDN의 운영비용에 영향을 미치게 된다. 즉, 공격자는 식(2)와 같은 최대-최소 공식화를 통해 PDN에서의 가장 큰 운영비용을 요구할 수 있다:

$$\begin{aligned} & \max_{\Delta c \in C} \min_{y \in Y(p^d)} d^T y \\ & \text{s.t. TAP-KKT} \end{aligned} \quad \dots\dots\dots \text{식(2)}$$

3.2. NLP 재정립 및 직접 조사 알고리즘

이 연구에서 제안한 고품질의 솔루션은 실험적 결과에 따라 Δc 의 다양한 초기값을 이용하여 교착상태에 빠진 PDN을 복구할 수 있다. NPCC(상호보완적인 제약조건이 있는 비선형 프로그래밍 문제)를 직접 해결하는 것은 매우 어려운 일이지만, 이 솔루션은 다음과 같은 보다 강력한 방식을 제공하고 있다:

- 제안한 UE의 공격 전략(Δc)을 잘 활용하면 직선도로의 볼록 최적화 문제와 전기 부하($p_d(\Delta c)$)에 대한 TAP 문제를 해결할 수 있다. 비선형 함수와 상호보완형 제약조건으로 TAP-KKT를 해결할 필요가 없다.
- UE에서 최적의 전기수요($p_d(\Delta c)$)를 파악하여 전기 부하($p_d(\Delta c)$)에 대한 TAP 문제를 해결할 수 있다. 따라서 목표값($d^T y^*$)은 공격 전략에 대한 합리적인 계산으로 평가할 수 있다.

4. 결론

도로교통 네트워크에서 교통유동 패턴은 도로 여행객이나 운전자들의 이기적인 행동을 반영하는 Wardrop UE로 모델링 할 수 있다. 인터페이스 방정식은 TN과 PDN에 걸쳐 상호의존성을 갖고 있다. 따라서 차량 운행시간에 대한 PDN 운용비용의 취약성문제는 합리적인 컴퓨팅 결과를 기반으로 한 최적의 솔루션과 효율적인 수학적 정립을 통해 해결할 수 있다. 이를 위해 이 연구에서는 최대-최소 PDN 운용비용을 산출하여 비선형 프로그래밍 공식을 통해 PDN 운용비용의 취약성 문제를 해결할 수 있는 방안을 제시하였다.

이 연구에서는 시스템 수준 관점에서 포괄적인 수학적 공식을 도입하여 교통 트래픽 흐름의 안정상태 분포에 대한 설명과 아울러 선형화된 교통흐름 브렌치 모델의 그리드 작동상태를 설명하였다. 또한 차량의 총 운행시간 대비 운영비용으로 정량화된 교통 네트워크의 도로용량 저하의 영향에 대한 조사결과

를 설명하였다. 이 연구결과는 국내 대도시의 전기운송 네트워크에서 도로의 효율적인 활용 등을 위한 정책에 벤치마킹 자료로 활용할 수 있을 것이다.