DOI：10.13234/j.issn.2095-2805.2025.6.180 中图分类号：TM761 文献标志码：A

# 具有限流能力的电气化铁路双网互联变换器研究

刘贻军
(轨道交通工程信息化国家重点实验室(中铁一院)，西安 710043)

**摘要：**实际工程设计面临的矛盾问题证明了电气化铁路双网互联变换器研究的必要性和迫切性。对双网互联变换器实际应用中的重大需求和工程挑战展开分析。针对铁路电力供配电网络的特性提出一种具有限流能力的电气化铁路双网互联变换器拓扑结构，详细分析该双网互联变换器的工作原理和构成，提出互联变换器的电压控制模式、限流切换控制模式下的变阻抗控制策略；并通过仿真模型证明了变阻抗控制策略的可行性；特别地，工程原型机实验证明了互联变换器中变换器的电压控制模式具有良好的可实施性，并能解决实际勘察设计难、造价高、电能质量恶劣等问题。最后，对该互联变换器的未来发展潜力进行展望。

**关键词：**双网互联变换器；限流切换控制；电压控制；变阻抗控制；工程原型机

# Electrified Railway Dual-network Interconnection Converter with Current Limiting

LIU Yijun
(State Key Laboratory of Rail Transit Engineering Informatization, China Railway First Survey and Design Institute Group Co., Ltd., Xi'an 710043, China)

**Abstract:** The contradictions faced in practical engineering and design have proved the necessity and urgency of research on electrified railway dual-network interconnection converters. The major needs and engineering challenges in practical applications of dual-network interconnection converters are analyzed. According to the characteristics of the railway electric power supply and distribution network, a topological structure of an electrified railway dual-network interconnection converter with current limiting is proposed, its working principle and composition are analyzed in detail, and its variable impedance control strategy in voltage control mode and current limiting switching control mode is put forward. Moreover, the feasibility of the variable impedance control strategy is proved by a simulation model. In particular, an engineering prototype was used to prove that the voltage control mode of the converter has good practicability, and it can solve the difficulty in actual survey design, high cost, power quality degradation and other issues. Finally, the development potential of the interconnected converter in the future is prospected.

**Keywords:** Dual-network interconnection converter; current limiting switching control; voltage control; variable impedance control; engineering prototype

能源活动是$CO_2$的主要排放源，推动电力领域的节能减排，或将成为实现我国“碳中和”目标的重要贡献领域[1]。电气化铁路用电设备是电力系统的重大工业负荷[2]，也是轨道交通系统主要的碳排放源[3]。推动电气化铁路电力设备的节能转型，是降低电气化铁路、轨道交通领域$CO_2$排放的重要措施。落实“中国制造2025”[4]、国家《中长期铁路网规划》[5]《“十四五”铁路科技创新规划》[6]等国家级战略及规划的实施，实现节能减排和高质量发展必将成为电气化铁路装备发展的新要求。

**收稿日期：**2022-08-31；**修回日期：**2022-12-26，2023-03-05，2023-03-30；**录用日期：**2023-05-15；**网络首发日期：**2023-06-15
**基金项目：**陕西省工业科技攻关资助项目(2022GY-282)
This work is supported by Shaanxi Province Industrial Science and Technology Research Project under the grant 2022GY-282

铁路电力系统通常包含铁路牵引供电系统和铁路电力供配电系统[7]，铁路牵引供电系统通过铁路牵引供电臂为铁路机车提供电能；铁路电力供配电系统通过铁路自闭贯通线、站馈线为铁路沿线信号、防灾、照明等提供电力供应。为保障铁路电力供配电系统供电的可靠性，通常要设置 2~3 路 10 kV 电源供电。然而，我国中西部地区铁路常处于高原、戈壁、荒漠等地，这些地区人烟稀少、自然条件极其恶劣，部分铁路甚至穿越几百千米的无人区[7]，周围无公用电网建设项目，而沿线站场通信、信号、调度、防灾、行车等重要负荷供电又必须得到保证，因此这一供需矛盾日益凸显[8]。

传统长距离或超长距离为铁路电力供配电系统提供电源的方式，需跨越上百千米的无人区，每年造成大量线损，长距离线路的运维耗费了大量人力、物力、财力，上百千米的电缆线路耗费了大量的金属、化学绝缘材料，这些都等效产生了成千上万吨 $CO_2$。在长期的铁路建设中，电源线路走廊空间还占用了大量的土地资源。此外，利用 27.5/10 kV、27.5/0.4 kV 或 27.5/0.23 kV 获得电源的方式，虽然可以就近获得电源，但铁路机车负荷的冲击性和非线性使得接触网电压产生大范围波动和畸变，影响 10 kV 及 400 V 侧电压的稳定，各重要负荷无法可靠工作，甚至影响铁路的安全稳定运行，最终使低压负荷供电的可靠性无法得到保障。

综上，公网电源薄弱地区受传统技术装备的限制，制约了铁路供配电系统最优设置方案。若能将电气化铁路牵引供电系统与铁路电力供配电系统相连[7-8]，构建电气化铁路双网互联变换器 ER-DNIC(electrified railway dual-network interconnection converter)，则可以在网络级将牵引侧电网的能量通过互联变换器转换为符合要求的电能进行供电，同时解决网络级互联下的短路电流继电保护配合问题，因此将成为理想解决方案。本文分析了 ER-DNIC 在电气化铁路应用中的重大工程需求，并针对工程需求提出了 ER-DNIC 的拓扑结构，以及对应的限流控制方法，最后通过仿真和工程原型机实验证明了 ER-DNIC 的可行性。

## 1　面向应用层的铁路双网互联变换器的重大挑战

通过前文分析可知，通过互联变换器将铁路牵引供电网与铁路电力供配电网互联面临多种重大挑战。

(1)短路限流及与传统继电保护的协同配合。铁路电力供配电 10 kV 系统短路故障发生时，ER-DNIC 无法提供足够的短路容量，导致短路发生后，ER-DNIC 会立即封锁脉冲，使整个铁路电力供配电网络失压。在新型电力系统发展过程中，未来相当长时间内将是新型电力电子设备与传统供配电设备共存的阶段。这就造成了 ER-DNIC 脉冲封锁的速度远远快于传统继电保护故障识别及断路器动作的速度；同时，还会造成在铁路电力供配电系统的数据采集与监视控制 SCADA(supervisory control and data acquisition)系统还没识别到故障时，整个网络已经失压。这是新型电能变换设备应用与传统保护之间存在的应用矛盾。因此，解决网络级短路电流限制问题，实现与传统继电保护的配合成为重大挑战。

(2)网络启动下的负荷侧涌流冲击[7]。铁路电力供配电网作为 ER-DNIC 的网络级负荷，通常具有多条馈线，各馈线具有多台变压器向低压负荷供电(一般站馈变压器数量少，单台容量大；贯通线变压器数量多，单台容量小)。当铁路电力供配电网络启动接入 ER-DNIC 时，网络内产生的变压器励磁涌流、负荷冲击电流极易造成 ER-DNIC 逆变器的 IGBT 驱动器短路保护动作，使 ER-DNIC 停机。因此，ER-DNIC 在工程应用中需要具有极强的抗涌流能力。

(3)电能质量问题挑战。铁路牵引供电网存在谐波含量大、三相不对称[9]、受牵引机车取流和制动等影响造成的电压波动范围宽、电压波动速度快等电能质量问题[10-12]，因此，ER-DNIC 在硬件设计、锁相控制、整流控制等方面均需要特殊策略控制。同时，铁路电力供配电系统对电源电能质量的

要求高：铁路电力供配电系统一般为 10 kV，其电压谐波、对称性等应符合电能质量标准要求[13-16]，如近年通车的格库铁路、拉林铁路等[17]。

## 2 具有限流能力的混合型铁路双网互联变换器

根据电气化铁路双网互联变换器的重大工程挑战，本文针对铁路电力供配电系统短路限流协同配合问题和高质量电能质量要求，提出一种具有限流能力的电气化铁路双网互联变换器 ER-DNIC-CL(electrified railway dual-network interconnection converter with current limiting)。

ER-DNIC-CL 主要由多绕组变压器、多个功率单元、高压 LCR 输出滤波器、输出变压器及 2 组双向晶闸管组成，如图 1 所示。其中，多绕组变压器二次侧共设计 28 组绕组，划分 4 个组别；前 3 组别为每组 9 个绕组，按照依次移相 20°组成移相输出，每个绕组输出的电压分别接入功率单元的整流侧；功率单元的逆变侧组成 9 级联逆变器，且 3 个组别相连的 9 级联逆变器之间组成星形连接的三相高压级联逆变器；三相高压级联逆变输出经过 LCR 滤波器后与输出变压器相连；同时，多绕组变压器的第 4 组别通过双向晶闸管 SR2 与 LCR 滤波器的输出端相连，并通过双向晶闸管 SR1 与三相级联逆变器的三相输出端相连。功率单元由三相不可控整流桥、直流储能平波电容器组、单相全控桥组成。

多绕组变压器将铁路牵引网 27.5 kV 电压降低为 27 组低压绕组，且依次移相的 9 组低压绕组与功率单元整流侧相连，大大降低了多绕组变压器高压侧的电流畸变率；三相 9 级联逆变器级联输出高压多电平电压，等效开关频率高，逆变器输出电压畸变率低，经过 LCR 滤波后，输出波形畸变率更低；滤波器和变压器构成 LCR-T 型滤波，兼顾了滤波和隔离，同时考虑了谐振峰抑制；输入变压器通过多绕组对电流进行分流，发热小；每相采用 9 级联结构，同时备有 2 级冗余，可以实现 *N*-2 级联运行以满足输出要求，冗余控制提高了整体的可靠性。

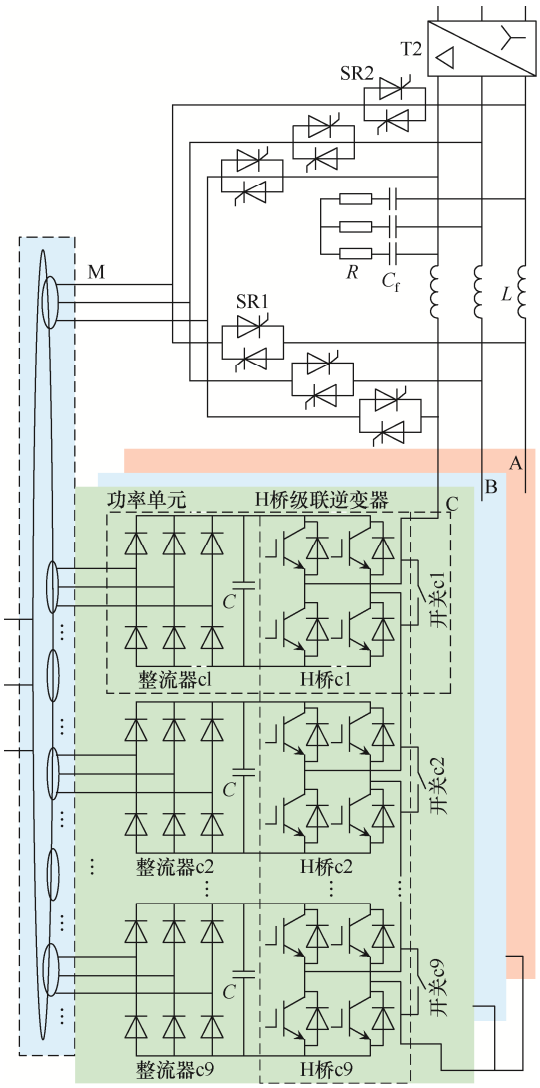



**图 1 具有限流能力的铁路双网互联变换器拓扑结构**

**Fig. 1 Topology of railway dual-network interconnection converter with current limiting**

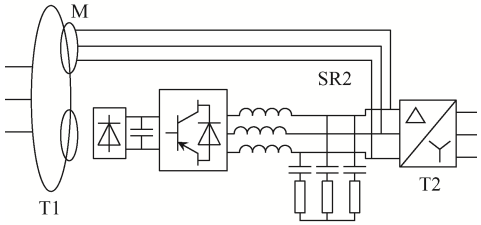
## 3 控制策略

ER-DNIC-CL 具有电压控制和限流控制 2 种工作模式。电压控制模式使铁路牵引电力系统和铁路电力供配电系统互联，将铁路牵引 27.5 kV 转换为适合铁路电力供配电系统使用的三相 10 kV；限流控制模式在铁路电力供配电网络发生短路故障时进行故障限流，实现与继电保护的协同配合。

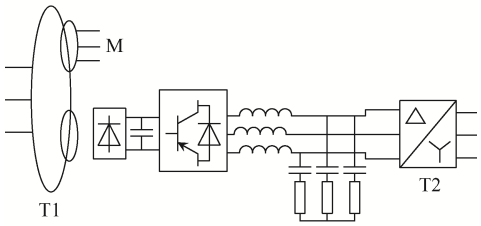
### 3.1 电压控制模式

当铁路电力供配电系统丧失电力供应时，铁路

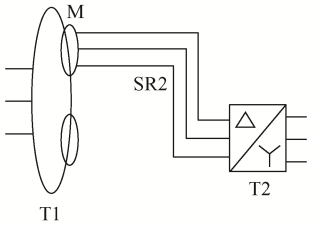
沿线各重要负荷均失去保障，给铁路机车的安全稳定运行带来风险。因此，ER-DNIC-CL 的电压控制模式以提高铁路电力供配电系统供电稳定性作为第一要务。其具有 3 种电压输出控制模式，分别为自体并网运行(如图 2(a)所示)、独立变换器运行(如图 2(b)所示)和独立绕组端口运行(如图 2(c)所示)。




(a) 自体并网运行




(b) 独立变换器运行




(c) 独立绕组端口运行

**图 2　ER-DNIC-CL 的电压控制模式**

**Fig. 2 Voltage control mode of ER-DNIC-CL**

自体并网运行是指 ER-DNIC-CL 的变换器向 T1 变压器 M 绕组输出电压并进行并网，自体并网模式下双向晶闸管 SR1 处于封锁状态，SR2 始终处于导通状态。独立变换器运行是 ER-DNIC-CL 的变换器输出电压经过 T2 变压器隔离后向铁路电力供配电网络提供电源，此时 SR1 和 SR2 均处于关断状态。独立绕组端口运行是 ER-DNIC-CL 的变压器 T1 绕组端口直接向 T2 变压器供电，然后通过 T2 向铁路电力供配电网络供电；此时 SR1 处于封锁状态，SR2 处于导通状态，且变换器处于脉冲封锁状态。关于逆变器的并网和逆变供电控制，诸多学者已经提出了很多优秀的控制方法[18-21]，本文不再重点详述。

## 3.2 限流切换控制模式

### 3.2.1　变流器并网限流切换控制

ER-DNIC-CL 通过断路器与铁路电力供配电网相连。如图 3 所示，当 ER-DNIC-CL 处于自体并网运行状态时，断路器处于闭合状态，变换器处于并网状态，且双向晶闸管 SR1 处于封锁状态，SR2 处于导通状态。在 $t_1$ 时刻铁路电力供配电网络发生短路故障；$t_2$ 时刻封锁变换器的 PWM 脉冲并给 SR2 封锁信号；$t_3$ 时刻给 SR1 导通信号且逐步缩小 SR1 的导通角；导通角减小使串入回路的 ER-DNIC-CL 滤波电抗和 T2 变压器等效阻抗变大，最终故障电流逐步减小，直到继电保护装置动作；$t_4$ 时刻故障电流被切除。

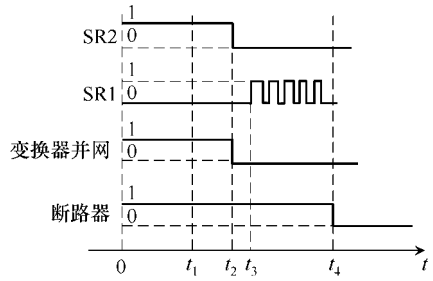



**图 3　自体并网运行变阻抗切换控制**

**Fig. 3　Variable impedance switching control of grid-connected operation**

### 3.2.2　独立变换器运行限流切换控制

正常运行时，变换器逆变输出电压通过 T2 变压器为铁路电力供配电网络供电，此时双向晶闸管 SR1 和 SR2 均处于封锁状态。当铁路电力供配电网络在 $t_1$ 时刻发生短路故障后，$t_2$ 时刻检测到短路故障并封锁 ER-DNIC-CL 变换器；在 $t_3$ 时刻对 SR1 给予导通指令，并缩短 SR1 的导通角；直到 $t_4$ 时刻继电保护动作，断路器分闸，如图 4 所示。

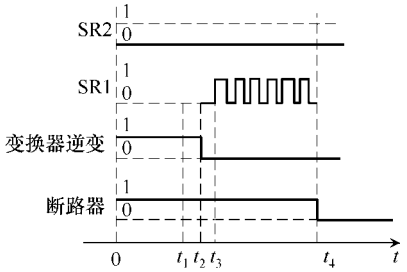



**图 4　独立变换器运行变阻抗切换控制**

**Fig. 4 Variable impedance switching control of independent converter operating**

3.2.3 独立绕组端口限流切换控制

独立绕组端口变阻抗切换控制如图 5 所示。正常运行时，变换器处于封锁状态，双向晶闸管 SR2 处于导通状态，SR1 处于封锁状态。当铁路电力供配电网络在 $t_1$ 时刻发生短路故障后，$t_2$ 时刻检测到短路故障并对双向晶闸管 SR1 给予导通信号，并逐步减小导通角；在 $t_3$ 时刻给予 SR2 封锁信号；经过 SR1 的变阻抗控制后，到 $t_4$ 时刻保护动作跳闸。

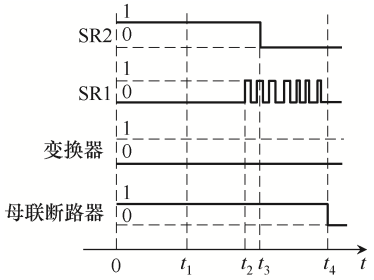



**图 5 独立绕组端口变阻抗切换控制**

**Fig. 5 Variable impedance switching control of independent winding port**

### 3.3 变阻抗控制

变换器封锁后 SR1 导通，滤波器中的电感被接入到 T2 变压器的输入侧，其等效电路模型如图 6 所示。图中：$L$ 为滤波器电感；$Z_l$ 为基波阻抗，$Z_l=\omega_0 L$；$\omega_0$ 为基波角频率。变压器 T2 的变比为 $k$:1，则线路阻抗等效到 T2 输入侧的基波阻抗为 $Z_l/k^2$。由此，ER-DNIC-CL 的内部电流被限制为

$$i_{2\mathrm{T}}=\frac{U_{\mathrm{M}}}{Z_{\mathrm{T1s}}+Z_l/k^2+\omega_0 L+Z_{\mathrm{T2s}}}=\frac{U_{\mathrm{M}}}{Z_{\mathrm{eq}}} \tag{1}$$

式中：$Z_{\mathrm{T1s}}$和$Z_{\mathrm{T2s}}$分别为 T1 变压器 M 端口等效阻抗和 T2 变压器输入侧阻抗；$U_{\mathrm{M}}$ 为 T1 变压器端口电压；$Z_{\mathrm{eq}}$ 为 ER-DNIC-CL 内部等值限流阻抗。

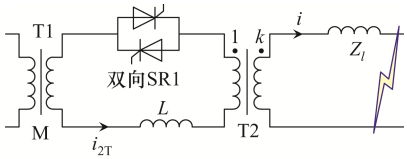



**图 6 变阻抗等效模型**

**Fig. 6 Variable impedance equivalent model**

改变晶闸管的触发角时，可以改变流过晶闸管的电流波形。增大触发角，流过晶闸管的电流等效有效值将减小，提高了晶闸管串联支路的等效阻抗。因此，设晶闸管的触发延迟角为 $\alpha$，$\alpha\in[\pi/2,\pi]$，则触发时刻为

$$\omega t=\alpha+n\pi \qquad n=0,1,2,\cdots \tag{2}$$

式中，$\omega$ 为角频率。

显然，当 2 个晶闸管均关断时，流过限流模块电感的电流为 0；当双向晶闸管导通时，忽略限流支路的电阻，电感电流满足

$$L_{\mathrm{eq}}\frac{\mathrm{d}i_{2\mathrm{T}}}{\mathrm{d}t}=V_{\mathrm{T}}\sin(\omega t) \tag{3}$$

式中：$L_{\mathrm{eq}}$ 为等值限流阻抗对应的等值电感；$V_{\mathrm{T}}$ 为等值电感两端的电压幅值。式(3)的通解为

$$i_{2\mathrm{T}}=A-\frac{V_{\mathrm{T}}}{\omega L_{\mathrm{eq}}}\cos(\omega t) \tag{4}$$

式中，$A$ 为积分常数。

由于在双向晶闸管触发时刻电感电流为 0，则由式(4)可得

$$i_{2\mathrm{T}}=A-\frac{V_{\mathrm{T}}}{\omega L_{\mathrm{eq}}}\cos(\alpha+n\pi)=0 \tag{5}$$

解出 $A$ 后代入式(4)可得到流过等值电感的电流为

$$i_{2\mathrm{T}}=\frac{V_{\mathrm{T}}}{\omega L_{\mathrm{eq}}}[\cos(\alpha+n\pi)-\cos(\omega t)] \qquad n=0,1,2,\cdots \tag{6}$$

由式(6)可知，当 $\omega t=(n+2)\pi-\alpha$ 时，电感电流重新回到 0。因此，晶闸管的导通周期为

$$\omega t\in[n\pi+\alpha,(n+2)\pi-\alpha] \qquad n=0,1,2,\cdots \tag{7}$$

则流过限流模块电感的电流波形宽度为

$$(n+2)\pi-\alpha-(n\pi+\alpha)=2(\pi-\alpha)=2\beta \tag{8}$$

式中，$\beta$ 为晶闸管的导通角，$\beta=\pi-\alpha$。

若想使在任何时刻总有 1 个晶闸管导通，则应满足

$$(n+2)\pi-\alpha=(n+1)\pi+\alpha \qquad n=0,1,2,\cdots \tag{9}$$

即前一个晶闸管关断时，后一个晶闸管瞬时开通。

当触发延迟角 $\alpha$ 从 $\pi/2$ 增大时，晶闸管的导通区间宽度将从 $\pi$ 下降，此时，在 1 个周期内电流发生断续，等值阻抗逐渐增大，相当于提高了限流模

块的限流效果。当触发延迟角 $\alpha$ 从 $\pi/2$ 增大到 $\pi$ 时，晶闸管的导通区间宽度将从 $\pi$ 下降到 0，此时，在任何时刻 2 个晶闸管均处于截止状态，等值阻抗最大，相当于限流模块的电抗器退出运行，等效阻抗无穷大。当触发延迟角 $\alpha$ 小于 $\pi/2$ 时，已经处在导通状态的晶闸管，其电流过零点的时刻将大于尚未导通的晶闸管的触发时刻，此时，当未导通的晶闸管的触发脉冲已经发出时，由于已导通的晶闸管尚未关断，故未导通的晶闸管的电压为 0，因而不能被触发导通。这样在 2 个晶闸管中总有 1 个晶闸管在任何时刻都是截止状态，这种状态将导致电感电流中的主要分量为直流分量，在正常情况下，变阻抗控制的触发角运行范围为 $\alpha\in[\pi/2,\pi]$。

由式(6)可知，由于晶闸管的控制作用，流过的电流发生畸变而不再是正弦量。调整触发角的大小将改变电流的峰值和导通区间的宽度。将电流进行傅里叶分解，其基波分量的幅值为

$$I_{2T1}=\frac{2}{\pi}\int_{\alpha}^{2\pi-\alpha}\frac{V_T}{\omega L_{eq}}(\cos\alpha-\cos\theta)\cos\theta\mathrm{d}\theta=\frac{V_T}{\pi\omega L_{eq}}[2(\alpha-\pi)-\sin(2\alpha)] \tag{10}$$

式中，$\theta$ 为触发延迟角的积分因子。

则其基波分量瞬时值为

$$i_{2T1}=I_{2T1}\cos(\omega t)=\frac{V_m}{\pi\omega L_{eq}}[(2\beta-\sin(2\beta)]\sin(\omega t-\pi/2) \tag{11}$$

式中，$V_m$ 为 $V_T$ 的峰值。

则此时等值阻抗为

$$Z_{L_{eq}}(\beta)=\frac{\pi\omega L}{2\beta-\sin(2\beta)}\qquad \beta\in\left[0,\frac{\pi}{2}\right] \tag{12}$$

等效到铁路电力供配电系统内的限流等效阻抗为

$$Z_{FCL}(\beta)=\frac{k^2\pi\omega L}{2\beta-\sin(2\beta)}\qquad \beta\in\left[0,\frac{\pi}{2}\right] \tag{13}$$

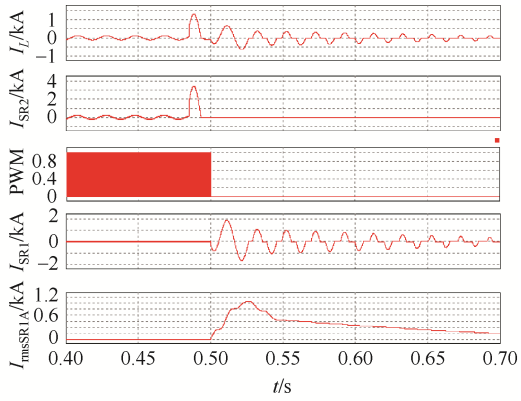
根据上述分析过程可知，铁路电力供配电系统发生短路故障时，ER-DNIC-CL 内部可以向系统插入 1 个范围可控、数值较大的等值限流阻抗，通过调节晶闸管触发角实现等值限流阻抗的可控性，从而使短路电流抑制到断路器所在保护装置的动作电流定值，实现与继电保护的协同配合。

## 4　仿真与实验

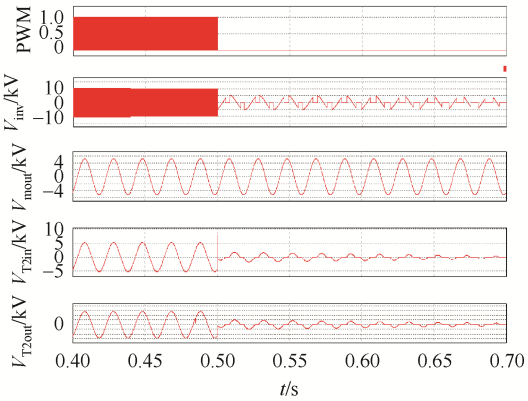
### 4.1　变阻抗控制

为了充分验证变阻抗控制策略的可行性，本文利用 PSIM 9.0 仿真软件搭建了所述 ER-DNIC-CL 的单相仿真模型。其中，T1 变压器的 M 端口电压为 3.7 kV，变流器的整流和逆变侧采用 AC-DC-AC 单级背靠背拓扑，T2 变压器的变比为 3.7/10 kV，滤波电感为 8 mH，滤波电容为 47 μF。

通过限流切换模式分析可知，变流器并网限流切换控制与独立绕组端口限流切换控制的变阻抗控制时序一致，独立变换器运行限流切换控制的变阻抗控制时序是变流器并网限流切换控制时序的一部分。因此，本文基于自体并网变阻抗控制过程建立了仿真模型。如图 7 所示，在 0.485 s 时，铁




(a) 电流变化过程




(b) 过电压情况

**图 7　变阻抗控制仿真**

**Fig. 7 Simulation of variable impedance control**

路电力供配电网络发生 10 kV 短路故障，此时 SR2 仍处于导通状态；0.495 s 时，检测到故障电流越限封锁 SR2，同时封锁变流器的 PWM 信号；0.505 s 时，对 SR1 施加导通信号，同时逐步缩短 SR1 的导通时间，SR1 的电流 $I_{SR1}$ 随之逐步减小。逆变器端口电压 $V_{inv}$、M 端口电压 $V_{mout}$、输出变压器 T2 的输出电压 $V_{T2out}$ 在逆变器封锁脉冲及双向晶闸管 SR1、SR2 切换过程中未出现过电压；输出变压器 T2 的输入侧电压 $V_{T2in}$ 在 SR1 和 SR2 的切换过程中产生了约 1.4 倍峰值的过电压，但由于 PWM 信号已封锁，且该过电压并未施加到逆变器端口，因此逆变器侧器件不会受到影响。

### 4.2 电压控制模式

目前 ER-DNIC-CL 的主要应用为解决西部地区铁路建设过程中面临的第 2 路 10 kV 电源严重匮乏问题。图 8 展示了电压控制模式下级联方案的 ER-DNIC 工程样机原貌，样机参数见表 1。同时，为了提高接入灵活性，样机在输入侧采用单相接入。通过输入输出测试、单相接地故障测试、优化前后低压侧电能质量对比测试，证明了 ER-DNIC-CL 电压控制模式的有效性。



**图 8 ER-DNIC 的工程样机**

**Fig. 8 Engineering prototype of ER-DNIC**

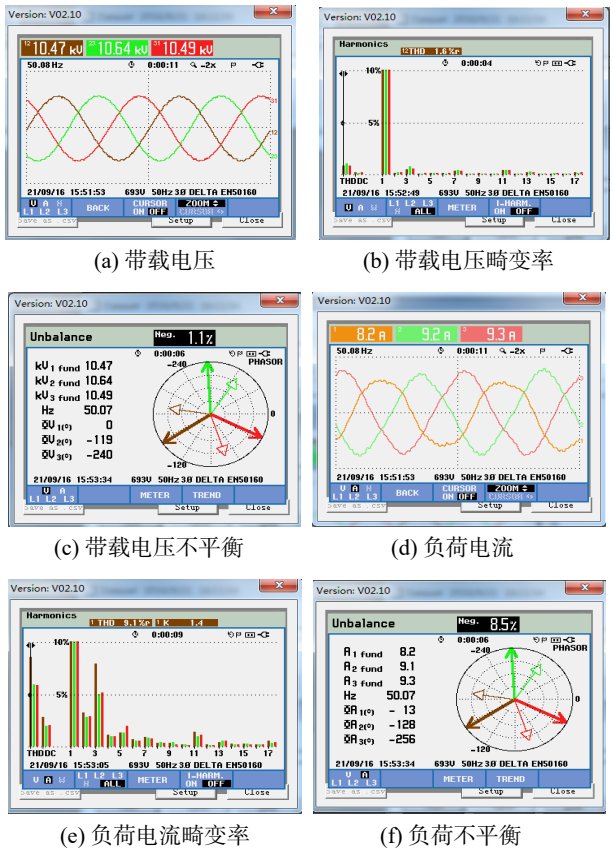
**表 1 ER-DNIC-CL 参数**

**Tab. 1 Parameters of ER-DNIC-CL**

| 参数 | 数值 |
|---|---|
| 变压器 T1 输入/kV | 27.5/0.625 |
| 变压器 T2 输出/kV | 3.7/10.5 |
| 滤波电抗/mH | 4.8 |
| 滤波电容/μF | 13.6 |
| 滤波阻尼电阻/Ω | 10 |

#### 4.2.1 谐波负荷测试

现场应用 ER-DNIC 的工程样机装置输出侧电压互感器 PT(potential transformer)变比为 10/0.1 kV。带载运行时，电压畸变率为 1.6%，负荷为谐波型，负荷电流畸变率为 6.0%~9.1%；实际运行中，输出的 10.5 kV 侧电压稳定，频率保持在 50.07 Hz，各相指标均满足电能质量要求，如图 9 所示。




(a) 带载电压 (b) 带载电压畸变率

(c) 带载电压不平衡 (d) 负荷电流

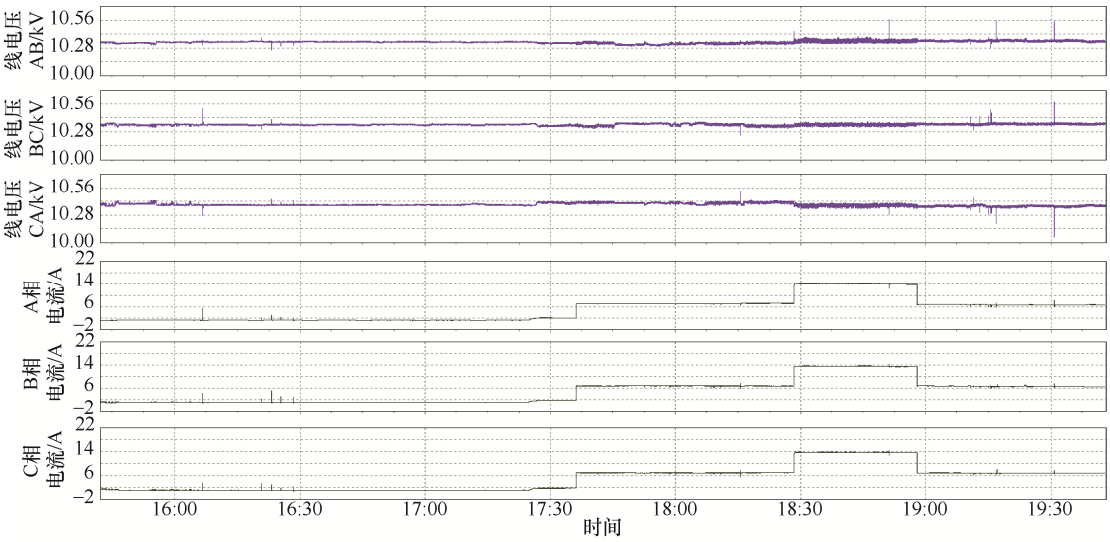
(e) 负荷电流畸变率 (f) 负荷不平衡

**图 9 谐波负荷影响测试**

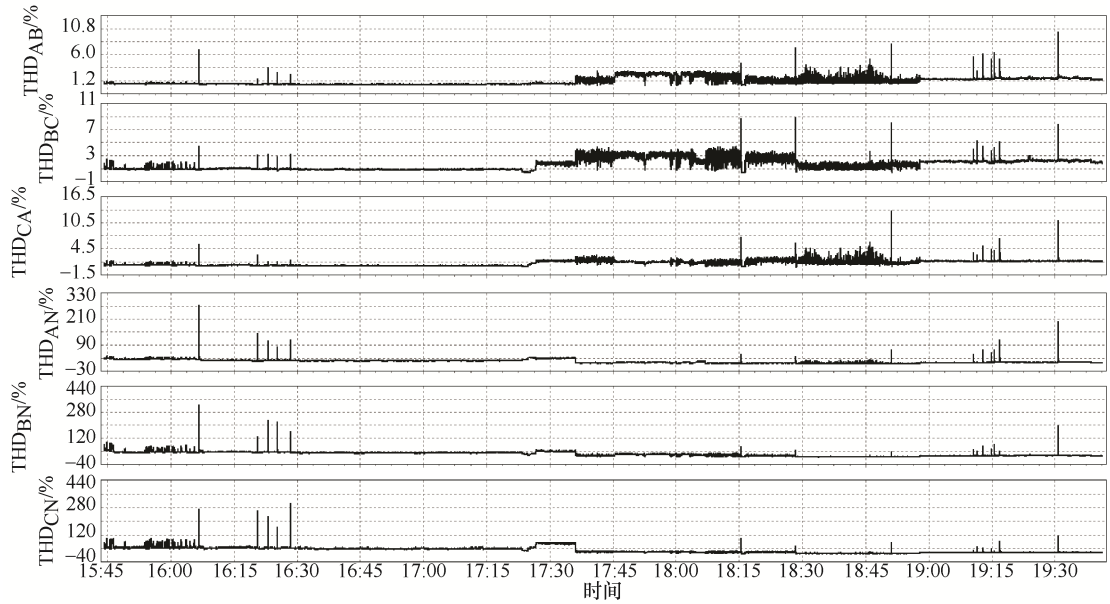
**Fig. 9 Harmonic load impact test**

#### 4.2.2 现场长期运行测试

如图 10 所示，截取某日实验的 3 h 连续数据，运行过程中带载贯通线及沿线箱变对应的负荷，其中 16:00—16:30 依次投入 80、100、100、100、200 kVA 的箱变及其箱变负荷。18:15 投入变电所所用变，18:43 投入站馈线负荷，19:12 投入风机负荷及站馈负荷，19:32 切除所内所有负荷。稳态运行下，ER-DNIC-CL 输出电压的精度范围为 10.32~10.40 kV(给定指令为 10.34 kV)；受控制增益影响，线路及变压器投切过程中，因电流变化产生的瞬时电压变化范围为 10.20~10.56 kV；电流总谐波畸变




(a)连续带载下电压、电流




(b)电压、电流畸变率趋势

**图 10　电气化铁路电力系统中 ER-DNIC-CL 原型机连续运行**

**Fig. 10 Continuous operation of ER-DNIC-CL prototype in electrified railway power system**

率在 30%~40%时，电压畸变率在 1%~3%。因此，ER-DNIC-CL 的输出性能完全满足现场应用要求。

## 5　结语

本文重点分析了电气化铁路双网互联变换器工程实践过程中面临的重大挑战，并提出了 1 种具有与传统继电保护协同匹配能力的 ER-DNIC-CL 拓扑及其电压控制、限流控制策略，通过仿真和工程原型机实验证明了其工程应用的可实施性。本文提出的双网互联变换器能够实现高效互联，显著提升了铁路电力供配电网络供电的灵活性和自主性，推动了铁路电力主体实现节能、减排、降耗等发展目标。特别是 ER-DNIC-CL 的工程化，解决了电气化铁路设计过程中部分地区铁路贯通线路无可靠电源接入的难题，减少了 10 kV 线路的建设规模，节约了线路走廊空间，实现了绿色发展。

**参考文献：**

[1]　舒印彪，张丽英，张运洲，等. 我国电力碳达峰、碳中

和路径研究[J]. 中国工程科学, 2021, 23(6): 1-14.
Shu Yinbiao, Zhang Liying, Zhang Yunzhou, et al. Carbon peak and carbon neutrality path for China's power industry [J]. Strategic Study of CAE, 2021, 23(6):1-14. (in Chinese)

[2] 李群湛, 王喜军, 黄小红, 等. 电气化铁路飞轮储能技术研究[J]. 中国电机工程学报, 2019, 39(7): 2025-2033.
Li Qunzhan, Wang Xijun, Huang Xiaohong, et al. Research on flywheel energy storage technology for electrified railway [J]. Proceedings of the CSEE, 2019, 39(7): 2025-2033. (in Chinese)

[3] 陈胜, 卫志农, 顾伟, 等. 碳中和目标下的能源系统转型与变革: 多能流协同技术[J]. 电力自动化设备, 2021, 41(9): 3-12.
Chen Sheng, Wei Zhinong, Gu Wei, et al. Carbon neutral oriented transition and revolution of energy systems: Multi-energy flow coordination technology [J]. Electric Power Automation Equipment, 2021, 41(9): 3-12. (in Chinese)

[4] 周济. 智能制造: "中国制造 2025"的主攻方向[J]. 中国机械工程, 2015, 26(17): 2273-2284.
Zhou Ji. Intelligent manufacturing: Main direction of "Made in China 2025" [J]. China Mechanical Engineering, 2015, 26 (17): 2273-2284. (in Chinese)

[5] 铁道学报. 2017 年中国铁路建设展望[J].铁道学报, 2017, 39(3): 128.
Journal of the China Railway Society. Prospects for China's railway construction in 2017 [J]. Journal of the China Railway Society, 2017, 39(3): 128. (in Chinese)

[6] 国家铁路局. 国家铁路局关于印发《"十四五"铁路科技创新规划》的通知[EB/OL]. 国铁科法[2021]45 号. (2021-12-23)[2022-08-31]. https://www.nra.gov.cn/jglz/fgzd/gfwj/202112/t20211223_337038.shtml

[7] Yao Peng, Zhu Zhiwei. Industrial design and application of a railway electric special power supply [J]. CPSS Transactions on Power Electronics and Applications, 2020, 5(4): 317-328.

[8] Yao Peng, Wang Hao, Liu Yijun, et al. Integrated railway smart grid architecture based on energy routers [J]. Chinese Journal of Electrical Engineering, 2021, 7(4): 93-106.

[9] Hu Haitao, He Zhengyou, Li Xin, et al. Power-quality impact assessment for high-speed railway associated with high-speed trains using train timetable: Part I: Methodology and modeling [J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2016, 31(2): 693-703.

[10] Mousavi Gazafrudi S M, Tabakhpour Langerudy A, Fuchs E F, et al. Power quality issues in railway electrification: A comprehensive perspective [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2015, 62(5): 3081-3090.

[11] 何棒棒, 高志宣, 马超, 等. 一种考虑再生制动能量反馈的混合铁路功率调节器[J]. 电源学报, 2023, 21(2): 106-115.
He Bangbang, Gao Zhixuan, Ma Chao, et al. Hybrid railway power conditioner considering regenerative braking energy feedback [J]. Journal of Power Supply, 2023, 21(2): 106-115. (in Chinese)

[12] 颜湘武, 李秉桢, 吴炜林, 等. 基于单相双旋转移相变压器的高速铁路系统负序补偿方法[J]. 电工技术学报, 2024, 39(15): 4643-4653.
Yan Xiangwu, Li Bingzhen, Wu Weilin, et al. Single-phase dual rotary phase shifting transformer based negative sequence compensation method for high-speed railway systems [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2024, 39(15): 4643-4653. (in Chinese)

[13] 国家技术监督局. 电能质量 公用电网谐波: GB/T 14549—1993[S].北京: 中国标准出版社, 1994.
The State Bureau of Quality and Technical Supervision. Quality of electric energy supply—Harmonics in public supply network: GB/T 14549—1993 [S]. Beijing: Standards Press of China, 1994. (in Chinese)

[14] 国家质量监督检验检疫总局, 中国国家标准化管理委员会. 电能质量 电力系统频率偏差: GB/T 15945—2008[S]. 北京: 中国标准出版社, 2008.
General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China, Standardization Administration of the People's Republic of China. Power quality—Frequency deviation for power system: GB/T 15945—2008 [S]. Beijing: Standards Press of China, 2008. (in Chinese)

[15] 国家质量监督检验检疫总局, 中国国家标准化管理委员会. 电能质量 三相电压不平衡: GB/T 15543—2008

[S]. 北京: 中国标准出版社, 2009.
General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China, Standardization Administration of the People's Republic of China. Power quality—Three-phase voltage unbalance: GB/T 15543—2008 [S]. Beijing: Standards Press of China, 2009. (in Chinese)

[16] 国家质量监督检验检疫总局, 中国国家标准化管理委员会. 电能质量 供电电压偏差: GB/T 12325—2008[S]. 北京: 中国标准出版社, 2009.
General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China, Standardization Administration of the People's Republic of China. Power quality—Deviation of supply voltage: GB/T 12325—2008 [S]. Beijing: Standards Press of China, 2009. (in Chinese)

[17] 徐键. 拉林铁路牵引供电工程建设与创新[J]. 中国铁路, 2022(3): 63-69
Xu Jian. Construction and innovation of traction power supply engineering of Lhasa-Nyingchi railway [J]. Chinese Railways, 2022(3): 63-69. (in Chinese)

[18] 于彦雪, 胡鹏飞, 陈玉树, 等. 极弱电网下并网逆变器功率传输能力分析及提升方法[J]. 电力系统自动化, 2022, 46(14): 101-108.
Yu Yanxue, Hu Pengfei, Chen Yushu, et al. Analysis and improvement method of power transfer capability for grid-connected inverter in ultra-weak grid [J]. Automation of Electric Power Systems, 2022, 46(14): 101-108. (in Chinese)

[19] 程成, 谢少军, 谭玲娟, 等. 跟网型逆变器的非线性模型及稳定性分析方法[J]. 电力系统自动化, 2022, 46(6): 137-143.
Cheng Cheng, Xie Shaojun, Tan Lingjuan, et al. Nonlinear model and stability analysis method for grid-following inverter [J]. Automation of Electric Power Systems, 2022, 46(6): 137-143. (in Chinese)

[20] 孙大卫, 刘辉, 赵峰, 等. 不同逆变电源主动支撑控制方式的对比研究[J]. 电网技术, 2020, 44(11): 4359-4369.
Sun Dawei, Liu Hui, Zhao Feng, et al. Comparison of inverter generators with different support control methods [J]. Power System Technology, 2020, 44(11): 4359-4369. (in Chinese)

[21] 李锡林, 查晓明, 田震, 等. 考虑多控制环耦合的并网逆变器非线性建模及仿真分析[J]. 电源学报, 2023, 21(1): 81-89.
Li Xilin, Zha Xiaoming, Tian Zhen, et al. Nonlinear modeling and simulation analysis of grid-connected inverter considering multi-loop coupling [J]. Journal of Power Supply, 2023, 21(1): 81-89. (in Chinese)



刘贻军

**作者简介：**

刘贻军(1969—　)，男，通信作者，本科，高级工程师。研究方向：电气化铁道铁路电力设计，电力电子技术在铁路电力系统中的应用。E-mail：597703721@qq.com。

(责任编辑：耿越)